



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

HENNA KIVIOJA  
TUULETETUN KERTOPUURAKENTEISEN KATTOELEMENTIN  
LÄMPÖTEKNISEN TOIMINNAN TUTKIMINEN CALIBRATED HOT  
BOX -MENETELMÄLLÄ

Diplomityö

Tarkastaja: professori Juha Vinha  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Talouden ja rakentamisen tiedekun-  
taneuvoston kokouksessa 9. marras-  
kuuta 2016

## TIIVISTELMÄ

**HENNA KIVIOJA:** Tuuletetun kertopuurakenteisen kattoelementin lämpötekni-  
sen toiminnan tutkiminen calibrated hot box -menetelmällä

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 93 sivua, 27 liitesivua

Kesäkuu 2017

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: Professori Juha Vinha

Avainsanat: yläpohja, U-arvo, lämmönläpäisykerroin, lämmöneriste, tuuletusil-  
mavirta, kattoelementti

Tässä diplomityössä selvitettiin Metsä Woodin valmistaman Kerto-Ripa -kattoelementin lämpötekniistä toimintaa kalibroidun lämmönläpäisylaitteen (calibrated hot box) menetelmällä. Mittaukset suoritettiin marraskuussa 2016 valmistuneella yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisella tutkimuslaitteistolla TTY:n rakennuslaboratoriossa. Kattoelementille määritettyä U-arvoa voidaan käyttää suoraan rakenteen U-arvona energiateknistä vaatimustenmukaisuutta osoittaessa, sillä kokeellinen määrittäminen suoritettiin standardin SFS-EN ISO 8990 (1996) mukaisella laboratoriomittauksella. Laitteistolla tehtyjen kokeiden mittausepävarmuudeksi määritettiin laskennallisesti  $\pm 5\%$ .

Tutkimuslaitteiston koko asetti vaatimuksia tutkittaville koe-elementeille, joten mittaukset suoritettiin Kerto-Ripa -kattoelementistä muokatuille koe-elementeille, mikä täytyi ottaa huomioon koetulosten tulkinnassa. Laitteistolla tehtiin seitsemän koetta kalibrointikokeet mukaan luettuna. Matalampi koe-elementti sisälsi 400 mm ja korkeampi koe-elementti 450 mm eristettä. Normaalitilanteen U-arvomittauksissa tuuletusilmavirtana käytettiin matalammalla koe-elementillä 0,07 m/s ja korkeammalla 0,06 m/s. Korkeammalle koe-elementille tehtiin myös kokeita, joissa koe-elementin tuuletusväliin johdettiin normaalista poikkeavia ilmavirtauksia, jotka olivat 0,0 m/s, 0,13 m/s ja 0,35 m/s.

Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa D3 (2012) esitetään yläpohjarakenteiden U-arvon vertailuarvoksi 0,09 W/(m<sup>2</sup>K). Normaalitilanteessa matalamman koe-elementin U-arvoksi saatiin 0,10 W/(m<sup>2</sup>K) ja korkeamman 0,090 W/(m<sup>2</sup>K), joten vain korkeampi koe-elementti täytti vertailuarvon. Tuloksista huomattiin selkeästi, että suuremmilla ilmavirtauksilla ilmavälin eristävä vaikutus häviää ja eristeeseen muodostuu sisäistä konvektiota, mikä heikentää rakenteen U-arvoa. Koe-elementeissä oli suhteessa suurempi osa kylmäsiltoja kuin kokonaisessa kattoelementissä ja kokeissa tuuletusväliin johdettu ilmavirta oli hieman suurempi kuin elementin ilmavälissä normaalisti vaikuttava ilmavirtaus. Koe-elementin eristetilan hieman suurempi osuus otettiin huomioon laskennallisesti. Lisäksi reunojen kylmäsilta-vaikutus heikensi hieman mitattua U-arvotulosta. Tästä voitiin päätellä, että myös koe-elementistä hieman poikkeavat todelliset Kerto-Ripa -kattoelementit täyttävät U-arvon vertailuarvon normaalissa tilanteessa.

Koe-elementeille sekä todelliselle Kerto-Ripa -kattoelementille laskettiin vertailuksi Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C4 (2012) mukaiset U-arvot. Laskennallisesti korjatuksi U-arvoksi koe-elementeille saatiin hieman heikommalla U-arvot kuin mittamalla. Tällaisessa tilanteessa mittauksella saadaan etua laskennalliseen määrittämiseen nähden, koska mitattuun tulokseen ei tarvitse enää lisätä laskennallisia korjaustermejä.

## ABSTRACT

**HENNA KIVIOJA:** Calibrated hot box based study for thermal properties of a ventilated wood structured roof element

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 93 pages, 27 Appendix pages

June 2017

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Structural Design

Examiner: Professor Juha Vinha

Keywords: U-value, roof, insulation, airflow, roof element

Thermal function of Metsä Wood's Kerto-Ripa roof element was studied with calibrated hot box method in this master's thesis. The measurements were made with the new research equipment for roofs in the building laboratory in Tampere University of Technology. The structures and function of the equipment are also introduced in this thesis. The measured U-value can be used to prove that the roof element meets the energy regulations because the measurements were done according to standard SFS-EN ISO 8990 (1996). The calculated uncertainty of measurements was  $\pm 5\%$ .

There were two kinds of test elements tested. The test elements were modified from Kerto-Ripa roof element because of the size of research equipment, which should be considered when making conclusions of the test results. Seven different tests were made which included the calibration tests. In the normal test situation, thinner test element had 400 mm insulation and there was 0.07 m/s airflow to the air gap, and thicker test element had 450 mm insulation with 0.06 m/s airflow to the air gap. The additional airflow tests were made to the thicker test element with airflows 0.0 m/s, 0.13 m/s and 0.35 m/s.

The reference U-value for roofs is 0.09 W/(m<sup>2</sup>K) according to part D3 of National Building Code of Finland (2012). The result for thinner test element's U-value was 0.10 W/(m<sup>2</sup>K) and for thicker test element 0.090 W/(m<sup>2</sup>K) with a normal airflow in the element's air gap. The thicker test element met the reference U-value requirements. The results show that the insulating feature of the air in air gap is vanishing and internal convection is increasing inside the insulation as the velocity of airflow is growing. These factors are increasing the U-value. There were bigger amount of thermal bridges in the test elements than in the real roof element and a bit bigger airflow were also going to the air gap than in normal situation measured in air gap of Kerto-Ripa. The effect of a bit bigger insulation space in the test elements were calculated. Because the measured U-value was greater than the U-value of Kerto-Ripa roof element, the real Kerto-Ripa element also fulfills the U-value requirements with the normal airflow.

As a comparison, the U-values were also calculated according to part C4 of National Building Code of Finland (2012). The calculations were made to the test elements and also to Kerto-Ripa roof element. The test element's calculated results with correction factors were slightly bigger than measured values. When measuring U-value the correction factors are not taken into account.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Metsä Woodille, jota kiitän työn tilaamisesta ja yhteistyöstä. Tutkimus liittyy oleellisesti myös käynnissä olevaan COMBI-hankkeeseen, jossa on myös tehty yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisen tutkimuslaitteiston kehitystä ja rakentamista. COMBI-hankkeessa etsitään keinoja palvelurakennusten energiatehokkuuden parantamiseen lähes nollaenergiatasolle.

Kiitän Juha Vinhaa diplomityöaiheen tarjoamisesta ja suuri kiitos kuuluu diplomityöni ohjaajalle Petteri Huttuselle, joka auttoi laitteiston kehittämiseen liittyvissä ongelmissa ja antoi hyviä kommentteja diplomityön kirjoitusvaiheessa. Ilman apua en olisi selvinnyt myöskään laitteiston rakentamisesta ja koetilanteiden valmisteleminen. Kiitos suuresta avusta rakennushallin laboratoriohenkilökunnalle erityisesti Tomi Stranderille, Mika Törmälälle, Samu Häyriselle, Raimo Järviselle ja Lauri Kuusistolle.

Kiitos tuesta perheelleni ja ystäväilleni, jotka ovat tukeneet minua koko opiskelujeni ajan. Suurin kiitos tuesta kuuluu poikaystävälleni Juholle, joka on tukenut ja kannustanut minua koko diplomityöprosessini ajan.

Tampereella, 12.4.2017

Henna Kivioja

# SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
1.1	Tutkimuksen tausta.....	1
1.2	Tutkimuksen tavoitteet ja sisältö .....	1
1.3	Tutkimusmenetelmät .....	3
1.4	Tutkimuksen rajaukset .....	3
1.5	Aikaisempia tutkimuksia hot box -menetelmillä.....	4
2.	LÄMMÖN SIIRTYMINEN JA ILMAVIRTAUS .....	6
2.1	Johtuminen .....	7
2.2	Konvektio.....	12
2.3	Säteily .....	15
2.4	Ilmavirtaus.....	18
3.	YLÄPOHJARAKENTEIDEN RAKENNUSFYSIKAALINEN TUTKIMUSLAITTEISTO.....	19
3.1	Calibrated hot box -laitteistojen yleinen toimintaperiaate .....	19
3.2	Laitteiston kehitys ja rakentaminen .....	24
3.3	Laitteiston osat .....	25
3.3.1	Lämmin kammio .....	27
3.3.2	Kylmä kammio .....	32
3.3.3	Ohjausohjelma .....	35
3.3.4	Anturit ja säätölaitteet .....	38
3.4	Lämpimän kammion kalibrointi .....	42
4.	KOKEIDEN SUORITTAMINEN .....	44
4.1	Materiaalikoheet .....	44
4.1.1	Lämmönjohtavuuden mittaaminen ja mittauslaitteisto .....	44
4.1.2	Materiaalien lämmönjohtavuudet .....	45
4.2	Lämmönläpäisykokeiden valmistelu .....	47
4.2.1	Lämpötila- ja kosteusantureiden kalibrointi .....	47
4.2.2	Laitteiston kalibrointi .....	49
4.2.3	Koe-elementti .....	52
4.2.4	Antureiden sijoittelu.....	56
4.2.5	Kattoelementin tuuletus.....	57
4.2.6	Koe-elementin asentaminen tutkimusaukkoon.....	59
4.3	Kokeiden suorittaminen .....	61
4.3.1	Tavoiteltavat koe-olosuhteet .....	62
4.3.2	U-arvokoheet .....	63
4.3.3	U-arvokoheet erilaisilla tuuletusilmavirroilla.....	65
5.	KOETULOKSET .....	66
5.1	Koeolosuhteet.....	66
5.2	Stationääritilan saavuttaminen .....	68
5.3	Kalibrointikoheet .....	70

5.4	U-arvokokeiden tulokset .....	72
5.5	Koetulosten luotettavuuden tarkastelu .....	74
5.5.1	Kokeiden mittausepävarmuus.....	74
5.5.2	Koetulosten vertailu standardin vaatimukseen .....	77
5.5.3	Koetulosten vertailu RakMk C4 mukaiseen laskentaan.....	79
6.	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	82
6.1	Koetulokset .....	82
6.2	Yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisen tutkimuslaitteiston toiminta ....	84
7.	YHTEENVETO.....	86
	LÄHTEET .....	89

LIITTEET:

LIITE A: ANTURILUETTELO JA -PAIKAT

LIITE B: KUVIA LAITTEISTOSTA JA KOKEEN SUORITTAMISESTA

LIITE C: KOKEIDEN TULOKSET

LIITE D: RAKMK OSAN C4 MUKAINEN U-ARVOLASKENTA

LIITE E: KOKEIDEN VIRHEARVIO

## MERKINNÄT JA LYHENTEET

$\alpha$	säteilyn absorptiokerroin	-
$\beta$	ilman tilavuuden lämpölaajenemiskerroin	1/K
$\gamma_a$	ilman kinemaattinen viskositeetti	m <sup>2</sup> /s
$\varepsilon$	emissiviteetti	-
$\eta_a$	ilman dynaaminen viskositeetti	0,0175*10 <sup>-3</sup> Pa·s
$\lambda$	lämmönjohtavuus	W/(m·K)
$\lambda$	säteilyn aallonpituus	μm
$\rho$	tiheys	kg/m <sup>3</sup>
$\rho$	säteilyn heijastuskerroin	-
$\sigma$	Stefan-Boltzmannin säteilyvakio	5,67x10 <sup>-8</sup> W/(m <sup>2</sup> ·K <sup>4</sup> )
$\tau$	säteilyn läpäisykerroin	-
$\varphi$	ilman suhteellinen kosteus	% RH
$\Phi$	lämpövirta	W
$c$	valonnopeus	2,998*10 <sup>8</sup> m/s
$c_p$	ominaislämpökapasiteetti	J/(kg·K)
$d$	paksuus	m
$f$	taajuus	1/s
$g$	putoamiskiihtyvyys	9,81 m/s <sup>2</sup>
$h$	lämmönsiirtokerroin	W/(m <sup>2</sup> ·K)
$h_c$	konvektion lämmönsiirtokerroin	W/(m <sup>2</sup> ·K)
$h_r$	säteilyn lämmönsiirtokerroin	W/(m <sup>2</sup> ·K)
$k$	permeabiliteetti	m <sup>2</sup>
$k_a$	ilmanläpäisevyys	m <sup>3</sup> /(m·s·Pa)
$p$	paine	Pa
$q$	lämpövirran tiheys	W/m <sup>2</sup>
$q'$	lämmönkehitys tai lämpöhäviö	W/m <sup>3</sup>
$t$	aika	s, h, d, a
$A$	pinta-ala	m <sup>2</sup>
$E$	Pinnan emittoima säteilyteho	W
$Nu$	Nusseltin luku	-
$R$	lämmönvastus	m <sup>2</sup> ·K/W
$R_a$	Ilman tilavuusvirta	m <sup>3</sup> /s
$R_s$	pintavastus	m <sup>2</sup> ·K/W
$Ra_m$	muunnettu Rayleighin luku	-
$T$	lämpötila	°C, K
$U$	lämmönläpäisykerroin	W/(m <sup>2</sup> ·K)
$U$	jännite	V

COMBI Comprehensive development of nearly zero-energy municipal service buildings

FRAME Future envelope assemblies and HVAC solutions

TTY Tampereen teknillinen yliopisto

## TERMIT

Diffuusi harmaa pinta	Diffuusilla harmaalla pinnalla tarkoitetaan pintaa, jossa säteilyteho on riippumatonta aallonpituudesta ja lisäksi pinnan säteilyominaisuudet ovat riippumattomat säteilyn suunnasta. Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa pintoja käsitellään yleensä diffuuseina harmaina pintoina.
Ilmoitettu lämmönjohtavuus	Ilmoitettu lämmönjohtavuus on SFS-EN-standardin tai eurooppalaisen teknisen hyväksynnän mukaisesti määritetty arvo, joka perustuu yleensä 10 °C keskilämpötilassa suoritettuihin lämmönjohtavuuden mittauksiin sekä mittaustulosten tilastolliseen käsittelyyn. Arvoa käytetään lämmönjohtavuuden suunnitteluarvon lähtötietona.
Johtuminen	Lämmön siirtymismuoto, jossa lämpöenergia siirtyy materiaalin sisäisen värähtelyn vaikutuksesta molekyylien välityksellä. Lämpöenergia siirtyy aina korkeammasta lämpötilasta matalampaan.
Konvektio	Konvektiossa kaasu tai neste virtaa joko luonnollisena konvektiona lämpötilaerojen aiheuttamana tai pakotettuna konvektiona, jota aiheuttavat ulkopuoliset voimat kuten tuuli tai ilmanvaihtolaitteisto. Lämpö ja vesihöyry siirtyvät konvektiolla virtaavan ilman mukana.
Lämmönläpäisykerroin	Lämmönläpäisykerroin ilmoittaa lämpömäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pinta-alayksikön suoruisen rakennusosan, kun rakennusosan eri puolilla olevien ilmatilojen lämpötilaero on yksikön suuruinen. Rakennusosan lämmönläpäisykerroin eli U-arvo on kokonaislämmönvastuksen käänteisarvo.
Lämmönvastus	Lämmönvastus saadaan jakamalla kerrospaksuus lämmönjohtavuudella. Kokonaislämmönvastus on lämmönläpäisykerroimen käänteisarvo.
Lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo	Lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoa käytetään rakenteiden lämpötekniisissä laskelmissa. Arvo on SFS-EN-standardin tai eurooppalaisen teknisen hyväksynnän mukaan määritetty lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo, taulukoitu



lämmönjohtavuuden arvo standardista, Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa C4 esitetty lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo tai muulla tavalla määritetty rakennusosalle soveltuva lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo.

Lämmönjohtavuus	Lämmönjohtavuus ilmoittaa lämpömäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pinta-alayksikön suuruisen rakennusosan, kun rakennusosan eri puolella olevien ilmatilojen lämpötilaero on yksikön suuruinen.
Musta kappale	Idealisella mustalla kappaleella tarkoitetaan fysiikassa ideaalista pintaa, joka absorboi eli imee kaiken tulevan säteilyn riippumatta siitä, mikä on säteilyn aallonpituus tai tulo-suunta. Ideaalisen mustan kappaleen pinta myös emittoi eli lähettää enemmän energiaa määrättyissä olosuhteissa kuin mikään muu pinta.
Sisäinen konvektio	Sisäinen konvektio on ilmaa läpäisevän materiaalin sisällä tapahtuvaa lämmön tai vesihöyryn kuljettumista virtaavan ilman mukana. Sisäinen konvektio esiintyy yleensä lämpötilaeroista johtuvana luonnollisena konvektiona, mutta myös tuulen aiheuttama pakotettu konvektio voi vahvistaa sitä.
Stationääritila	Stationääritilassa eli jatkuvuustilassa olevaan systeemiin tuodaan ja sieltä poistuu vakiomäärä ainetta ja lämpöenergiaa samassa ajassa. Stationääritilassa lämpötilat ja aineiden pitoisuudet ovat saavuttaneet tasapainotilan eivätkä muutu ajan kuluessa.
Suhteellinen kosteus	Ilman suhteellinen kosteus ilmoittaa, kuinka paljon ilmassa on vesihöyryä vesihöyryn kyllästyspitoisuuteen verrattuna tai kuinka paljon vesihöyryn osapaine on vesihöyryn kyllästysosapaineeseen verrattuna tietyssä lämpötilassa.
Säteily	Lämpösäteilyssä lämpöenergia siirtyy sähkömagneettisina aaltoina tai fotoneina kahden eri lämpötilassa olevan pinnan välillä valon nopeudella. Lämpösäteilyä syntyy aineen atomeissa tai molekyyleissä olevien elektronien paikkojen muuttumisen seurauksena. Kaikki lämpötilaltaan absoluuttisen nollapisteen yläpuolella olevat pinnat lähettävät pitkä-

aaltoista lämpösäteilyä. Hehkuvan kuumat kappaleet lähettävät myös lyhytaaltoista lämpösäteilyä, josta osa on näkyvän valon aallonpituusalueella.

#### Terminen diffusiviteetti

Terminen diffusiviteetti on materiaaliominaisuus, joka kuvaa sitä, kuinka nopeasti lämpötilan muutokset kappaleen pinnalla vaikuttavat kappaleen sisäisiin lämpötiloihin. Mitä korkeampi materiaalin termien diffusiviteetti on, sitä nopeammin materiaalin lämpötila saavuttaa stationääritilan ympäristönsä kanssa.

# 1. JOHDANTO

Tässä luvussa kerrotaan tutkimuksen taustasta, tavoitteista ja rajoituksista sekä mainitaan käytetyt tutkimusmenetelmät. Toisessa luvussa kerrotaan tutkimuksen kannalta oleellista lämmön ja ilman siirtymiseen liittyvää teoriaa kirjallisuusselvityksen avulla. Luvut kolme ja neljä käsittelevät Tampereen teknillisellä yliopistolla rakennetun yläpohjarakenteille tarkoitetun rakennusfysikaalisen tutkimuslaitteiston toimintaa ja ominaisuuksia sekä laitteistolla tehtyjä U-arvokokeita. Viimeisissä luvussa on esitetty koetulokset ja niistä tehdyt johtopäätökset sekä yhteenveto. Liitteitä työssä on viisi kappaletta, ja ne sisältävät tutkimuksen tarkempia lähtötietoja, tuloksia, laskelmia sekä kuvia.

## 1.1 Tutkimuksen tausta

Suomessa rakennettavat julkiset rakennukset pyritään rakentamaan vuoden 2019 alusta lähtien lähes nollaenergiarakennuksina (Ympäristöministeriö 2014). Tästä syystä Tampereen teknillisen yliopiston vetämässä ja tämän työn kirjoitushetkellä käynnissä olevassa COMBI-hankkeessa pyritään tuottamaan tietoa palvelurakennusten energiatehokkuuden parantamiseen liittyvien vaikutusten ja ongelmien selvittämiseen, tutkimiseen ja ratkaisemiseen (TTY 2016). Tämä diplomityönä tehty tutkimus liittyy oleellisesti myös käynnissä olevaan COMBI-hankkeeseen ja siinä tehtävään yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisen tutkimuslaitteiston rakentamiseen ja kehittämiseen.

Aiemmin Tampereen teknillisellä yliopistolla on tehty kenttämittauksia, joissa on selvitetty RIPA-kattoelementin tuuletustilan ilman olosuhteita ja ilmavirtauksia (Leivo et al. 2013). Myös kertopuulle on määritetty aiemmin lämmönjohtavuus kokeellisesti Tampereen teknillisellä yliopistolla (Manelius & Pirinen 2011). Näiden aiemmin tehtyjen tutkimusten tuloksia on käytetty lähtötietoina tässä tutkimuksessa.

## 1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja sisältö

Diplomityön tavoitteena oli tuottaa tietoa tutkimuksen tilanneelle Metsä Woodille heidän valmistamansa Kerto-Ripa -kattoelementin lämpöteknisistä ominaisuuksista ja toiminnasta. Tutkimuksessa selvitettiin kokeellisesti tuulettuvan mineraalivillalla eristetyn kattoelementin lämpöhäviöitä ja tuuletusilmavirran vaikutusta yläpohjajaelementin lämpötekniseen toimintaan. Tutkimuksen tuloksia voidaan käyttää myös lähtötietoina ja vertailukohtana mahdollisesti myöhemmin suoritettaville laskentatarkasteluille. Kattoelementille määritettyä U-arvoa voidaan käyttää suoraan rakenteen U-arvona energiateknisten vaatimusten mukaisuutta osoitettaessa, sillä kokeellinen määrittäminen suoritettiin standardin SFS-EN ISO 8990 (1996) mukaisella laboratoriomittauksella. Tilaaja sai myös tietoa siitä,

minkä paksuinen lämmöneristekerros riittää katon lämmöneristysvaatimusten täyttämiseksi ja minkälainen vaikutus ympäristön olosuhteista aiheutuvalla tuuletusvälin ilma- virtauksella on kattoelementin lämpöteknisiin ominaisuuksiin.

Tutkimuksessa testattiin toteuttaako kattoelementti normaalia pienemmällä eristemäärällä Suomen rakentamismääräyskokoelman esittämän U-arvon vertailuarvon  $0,09 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (RakMk D3 2012). Mittaus suoritettiin Kerto-Ripa -kattoelementistä muokatuille koe-elementille. Mikäli matalamman koe-elementin U-arvo olisi ollut sallituissa rajoissa, testit erilaisilla tuuletusilmavirroilla olisi tehty kyseiselle elementille. Koska matalampi koe-elementti ei täyttänyt vaatimusten mukaisia arvoja, kattoelementtiin asennettiin tilaajan toimittama tarvittava lisäeristys ja jatkospalat kertopuisiin tukiripoihin, minkä jälkeen U-arvomittaus ja ilmapirtaustutkimukset suoritettiin normaalilla 450 mm lämmöneristettä sisältävällä koe-elementillä. U-arvo mitattiin koko kattoelementistä, jossa oli mukana myös tuuletusvälin ja vesikatteen lämpöä eristävä vaikutus. Näin on mahdollista tehdä, koska kattoelementin tuuletus on tyypillisesti melko vähäistä. (RakMk C4 2012)

Aluksi tutkimuksessa määritettiin U-arvokokeissa käytetty kattoelementin tuuletusvälin ilmapirran nopeus, joka vastaa mahdollisimman hyvin normaalia tilannetta katon tuuletusvälissä. Kokeessa käytetty ilmapirran nopeus valittiin kuitenkin hieman tavanomaista suuremmaksi, jotta U-arvokokeen tulokset olisivat varmalla puolella. Käytettävää ilmapirran nopeutta valittaessa hyödynnettiin aiemmin Tampereen teknillisellä yliopistolla tehtyä tutkimusta (Leivo et al. 2013), jossa käytössä olevassa rakennuksessa suoritettiin kenttämittauksia samantyyllisen kattoelementin tuuletusvälissä. Tässä tutkimuksessa suunniteltiin ja toteutettiin koejärjestely, jolla haluttu ilmapirran nopeus voitiin toteuttaa kokeissa kattoelementin tuuletusväliin.

Laitteisto kalibroitiin sekä matalampaa että korkeampaa koe-elementtiä varten. Ensimmäisessä vaiheessa suoritettiin U-arvon mittaus koe-elementille 400 mm lämmöneristyspaksuudella  $20 \text{ °C}$  lämpötilaerolla standardin SFS-EN ISO 8990 (1996) mukaisesti. U-arvokokeissa oli tavoitteena alittaa Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D3 (2012) määrittämä lämmönläpäisykertoimen vertailuarvo  $0,09 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , joka on asetettu lämpimän, erityisen lämpimän tai jäähdytettävän kylmän tilan yläpohjarakenteille. Koska matalamman elementin mittauksessa koe-elementti ei täyttänyt vaadittua arvoa, korotettiin koe-elementin eristepaksuutta normaaliin 450 mm:iin ja tehtiin korotetulla koe-elementillä testi uudelleen.

Toisessa vaiheessa selvitettiin tuuletusilmavirran vaikutusta rakenteen lämpöhäviöihin kolmella eri tuuletusilmavirran nopeudella. Tuuletusilmavirran nopeuksina käytettiin  $0 \text{ m/s}$ , eli tuuletustilan aukot pidettiin täysin suljettuina,  $0,13 \text{ m/s}$  ja  $0,35 \text{ m/s}$ , joka vastasi todella rajuja ulkoilman tuuliolosuhteita normaaleihin olosuhteisiin nähden. Suurella ilmapirran nopeudella voitiin tutkia, paljonko tuuletusvälin eristävän vaikutuksen häviäminen ja mahdollinen eristeen sisäinen konvektio vaikuttivat rakenteen U-arvoon.

Laitteistolla suoritettiin testauskokeita marraskuun lopun ja joulukuun 2016 aikana. Varsinaisiin mittauksiin liittyvät kalibroinnit ja U-arvokokeet suoritettiin 22.12.2016–3.2.2017 välisenä aikana. Yhden mittauksen suorittamiseen kului noin 3–5 vuorokautta.

### 1.3 Tutkimusmenetelmät

Aluksi luvussa 2 on käsitelty tutkimuksessa tapahtuvia ilmiöitä kirjallisuuskatsauksen avulla. Yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisen tutkimuslaitteiston lämpöteknisten ominaisuuksien mittaussosiot ovat valmistuneet mittauskäyttöön marraskuussa 2016. Ennen virallisia U-arvokokeita laitteistolla suoritettiin testausta ja kalibrointia. Tutkimuslaitteistoa on kuvattu paremmin luvussa 3. Menetelmänä käytettiin kvalitatiivista eli laadullista tutkimusta.

Yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalinen tutkimuslaitteisto eli sähkövastuksilla lämmitettävä kammio asetettiin pakkahuoneen sisään, jolloin kokeita voitiin suorittaa kalibroйдun lämmönläpäisylaitteen menetelmällä eli calibrated hot box -menetelmällä, jonka periaatteet on kerrottu luvussa 3. TTY:n rakennuslaboratoriossa olevassa uudemmassa pakkahuoneessa, joka toimii kokeen kylmänä kammiona, on mahdollista luoda luotettavasti lämpötiloja välille  $-20\text{ °C} \dots +20\text{ °C}$ . Koko laitteiston mittausepävarmuudeksi suoritetuille kokeille on määritetty  $\pm 5\%$ .

U-arvojen laskentaan tarvittavat suureet mitattiin kuuden tunnin keskiarvoina tasapainotilanteessa olevasta mittaussysteemistä. U-arvot laskettiin mittaustulosten ja laskennallisesti määritettyjen lähtöarvojen avulla. Lämpötiloja seurattiin kokeiden aikana lämpötilantureiden avulla ja ilman suhteellista kosteutta kosteusantureiden avulla. Tuuletusväliin johdettavan ilmapinnan mittaus toteutettiin kattoelementin tuuletusvälistä kuumalanka-anemometreillä. Lisäksi tutkittavan koe-elementin pinnoilla vaikuttavaa ilmavirtausta mitattiin myös kylmästä sekä lämpimästä kammioista kuumalanka-anemometreillä.

U-arvokokeiden tulosten vertailua varten suoritettiin myös Suomen rakennusmääräyskoelman osan C4 (RakMK C4 2012) mukainen U-arvolaskenta sekä koe-elementeille että todelliselle Kerto-Ripa -kattoelementille. Laskelmat on esitetty liitteessä D ja tuloksia on vertailtu luvussa 5.

### 1.4 Tutkimuksen rajaukset

Tutkimuksessa tutkittiin vain kattoelementin lämpökäyttäytymistä ja tuuletusvälin ilmavirtauksen vaikutusta rakenteen lämpötekniseen toimintaan. Kosteustekniset ominaisuudet jätettiin tarkastelun ulkopuolelle koetilassa tehtyä suhteellisen kosteuden mittausta lukuun ottamatta. Painesuhteita ei säädetty eikä mitattu kokeiden aikana. Kattoelementin ilmatiiviys oletettiin riittävän suureksi sekä koeolosuhteissa vallitsevat paine-erot niin pieniksi, että ilmavuotojen vaikutus voitiin olettaa mitättömäksi.

Lämmön siirtymismuotoja ovat johtuminen, konvektio ja säteily (Hens 2007). Käytetyssä tutkimuslaitteistossa ei ollut mahdollisuutta tutkia säteilemällä siirtyvää lämpöä erikseen. Myöskään tarkempia konvektiotarkasteluja ei ole suoritettu tässä tutkimuksessa. Kaikki lämmön siirtymismuodot ovat kuitenkin mukana kokeiden tuloksissa.

Kirjallisuusselvityksessä on keskitytty lämmön siirtymiseen vain niiltä osin, jotka liittyvät suoritetuissa kokeissa tapahtuvaan lämmön siirtymiseen. Esimerkiksi auringon säteilyn vaikutusta ei otettu huomioon. Mahdollisesti myöhemmin suoritettavat simulointitarkastelut tutkitusta elementistä sekä mitattujen ja simuloitujen tulosten vertailu eivät myöskään kuulu tähän diplomityöhön.

## 1.5 Aikaisempia tutkimuksia hot box -menetelmillä

Hot box -menetelmää eli esimerkiksi kalibroituja lämmönläpäisylaitteistoa on käytetty varsinkin pystyrakenteiden, kuten seinien ja ikkunoiden tutkimiseen sekä rakennusmateriaalien ominaisuuksien selvittämiseen. Menetelmän juuret sijoittuvat 1970-luvun alkupuolelle, jolloin Mumaw (1974) käytti laitetta hyvin eristettyjen isojen seinärakenteiden tutkimiseen. 1970-luvun lopulla Klems (1979) kehitti kalibroituja lämmönläpäisylaitetta ja mittaustekniikkaa edelleen ja loi kalibrointikäytännön laitteistolle tutkiessaan hyvin eristäviä ikkunoita.

Muun muassa Wakili ja Tanner (2003) sekä Haavi et al. (2012) ovat tutkineet hot box -mittausten ja laskennallisesti saatujen tulosten yhteneväisyyttä. Wakili ja Tanner (2003) tutkivat rei'itettyjen huokoisten savitiilien U-arvoa sekä kalibroidulla lämmönläpäisylaitteistolla että laskennallisesti BISCO-ohjelmalla kahdella eri laskutavalla. Heidän tutkimuksestaan selvisi, että tiilien aukkoihin tunkeutuneella laastilla saattaa olla merkittävä vaikutus tiilimuurin lämmönvastukseen. Kun tunkeutunut laasti otettiin huomioon laskennassa, tulokset olivat samassa suuruusluokassa. Tutkittaessa laskennallisesti monesta rakennusosasta koostuvaa rakennetta, tulee siis määrittää todella tarkasti laskennan alkuarvot ja tutkittu tilanne. Mittauksessa nämä kaikki asiat vaikuttavat aina mittaustulokseen.

Asduribali ja Baldinelli (2011) ovat tutkineet kolmen eri standardin mukaisesti tehtyä lämmönläpäisylaitteiston kalibrointia, kokeita ja epävarmuusanalyysiä. Eurooppalaisten ja yhdysvaltalaisien standardien mukaan täytyy tehdä yksityiskohtainen kalibrointi kammioille. Venäläinen standardi ei vaadi kammion kalibrointia, mutta jokaisen kappaleen syvälinen tutkimus vaaditaan ennen kokeiden aloittamista. Tutkimuksesta selviää, että lämmönläpäisylaitteiston U-arvonmittaukselle saadaan pienin epävarmuus venäläisen standardin GOST 26602.1-99:n mukaisesti, mikäli tutkittava kappale on suhteellisen homogeeninen. Epähomogeenisilla tutkittavilla kappaleilla venäläisen standardin mukainen epävarmuus kasvaa suhteessa enemmän kuin eurooppalaisilla ja yhdysvaltalaisilla standardeilla suoritetuissa kokeissa. Tulokset eurooppalaiselle standardille EN ISO 8990 ja yhdysvaltalaiselle standardille ASTM C1363-05 ovat melko lähellä toisiaan johtuen myös niiden samantyylisestä suoritustavasta.

Hot box -tutkimuslaitteilla on tehty vähemmän tutkimuksia vaakasuuntaisille rakenteille kuin pystysuuntaisille. Elmahdy ja Haddad (2000) ovat tutkineet kattoikkunoita ja vinoja lasituksia kalibroidulla lämmönläpäisylaitteistolla. TTY:llä on tehty aiemmin ilmaa läpäisevien eristeiden konvektiotarkasteluja pienillä kalibroiduilla lämmönläpäisylaitteistoilla (Vinha et al. 2013; Pakkanen 2012).

## 2. LÄMMÖN SIIRTYMINEN JA ILMAVIRTAUS

Lämmön siirtymisellä tarkoitetaan lämpöenergian siirtymistä rakenteiden sisällä tai niiden välillä lämpötilaeroista johtuen. Lämpöenergialla on kolme siirtymismuotoa: johtuminen, konvektio ja säteily. Siirtymismuodot voivat vaikuttaa keskenään samaan aikaan. Lämmön siirtyminen johtumalla ja konvektiolla vaatii aina väliaineen, mutta säteilyn avulla lämpöenergia voi siirtyä myös tyhjiössä. (Hagentoft 2001)

Systeemillä tarkoitetaan termodynamiikassa määrättyä joukkoa partikkeleita, jotka täyttävät suljetun pinnan rajaaman tilavuuden. Termodynamiikka käsittelee termodynaamisia prosesseja ja pyrkii selvittämään systeemien termodynaamisia tiloja prosessien välillä ja aikana. Näitä voivat olla esimerkiksi lämpötilan, paineen ja entropian väliset yhteydet systeemien välillä. Lämmön- ja aineensiirto puolestaan käsittelee siirtyvään lämpöön ja massaan liittyviä matemaattisia ongelmia. Termodynamiikan ensimmäisen lain eli energian säilymislain mukaan systeemiin tuodun energian kokonaismäärä säilyy samana, mutta se voi muuttua toisiksi energiamuodoiksi (Mills 1999).

Klassisen fysiikan mukaan systeemin kokonaisenergia on systeemin sisäenergian ja mekaanisen energian summa. Mekaanista energiaa ovat systeemin kokonaismassan liikeenergia ja painovoimaan liittyvä potentiaalienergia. Systeemin sisäenergia koostuu lämpöenergiasta eli partikkeleiden kineettisestä energiasta, latentista energiasta, joka on partikkeleiden mahdollisesti sisältämää kemiallista energiaa sekä partikkeleiden massaan liittyvästä ydinenergiasta. (Kellet et al. 1993). Ydinenergia voidaan kuitenkin jättää huomiotta rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa.

Systeemin sisäenergia muuttuu, jos systeemin ja sen ympäristön välillä siirtyy lämpöä tai systeemi tekee työtä ympäristöään vastaan tai päinvastoin. Systeemin ja sen ympäristön välinen työ edellyttää aina tilavuuden muuttumista prosessin aikana. Isobaarisessa prosessissa paine pysyy vakiona, mutta systeemin tilavuus muuttuu. Esimerkiksi lämpötilojen kasvaessa vakioapaineessa systeemin tilavuus kasvaa lämpölaajenemisen seurauksena. Mikäli tarkasteltavan systeemin tilavuus ei muutu, on kyse isokoorisesta prosessista, jolloin ainoastaan lämmön siirtyminen vaikuttaa systeemin sisäenergian muutokseen. (Mills 1999)

Aineille voidaan ilmoittaa kaksi eri ominaislämpökapasiteettia kuvaamaan energian siirtymisestä aiheutuvia lämpötilan muutoksia riippuen siitä, tapahtuuko prosessi vakioapaineessa vai vakiotilavuudessa. Näiden kahden ominaislämpökapasiteetin arvot poikkeavat kaasuilla merkittävästi toisistaan johtuen kaasujen tyypillisesti voimakkaasta lämpölaajenemisesta.



Toistensa kanssa termisessä kontaktissa olevat prosessit pyrkivät aina kohti tasapainotilaa eli samaa yhteistä lämpötilaa, jossa systeemin sisältämien partikkeleiden keskimääräinen kineettinen energia on sama systeemistä riippumatta. Clausiuksen määrittelemän termodynamiikan toisen lain mukaan lämmin eli enemmän energiaa sisältävä systeemi luovuttaa energiaansa kylmempään systeemiin tasapainotilan saavuttamiseen saakka. Entropia on tilasuure, ja sen muutos kertoo energian jakautumisesta, kun systeemi muuttuu tilasta toiseen. Termodynamiikan toisen lain Clausiuksen epäyhtälön mukainen entropia muuttuu niin, että lämpö ei siirry ikinä spontaanisti johtumalla alemmasta lämpötilasta kohti korkeampaa lämpötilaa. (Mills 1999; Lampinen 1997)

## 2.1 Johtuminen

Johtumisessa lämpöenergia siirtyy molekyylien liike-energiana molekyylistä toiseen ilman, että molekyylien keskimääräinen sijainti muuttuu. Kiinteissä aineissa rakenteen sisällä värähtelevät molekyylit törmäilevät toisiinsa siirtäen lämpöenergiaa. Värähtelyn lisäksi johtumiseen vaikuttaa materiaalin sisältämien vapaiden elektronien kyky siirtää energiaa, minkä vaikutus johtumiseen on merkittävä etenkin metalleilla ja muilla sähköä johtavilla materiaaleilla. Johtuminen tarvitsee aina väliaineen, joka voi olla kaasumaisessa, nestemäisessä tai kiinteässä olomuodossa. Termodynamiikan toisen lain mukaan lämmön siirtyminen tapahtuu johtumisessa aina lämpimämmästä kylmempään suuntaan, kun lämpö ja pitoisuudet pyrkivät tasaantumaan väliaineessa. (Hens 2007)

Lämmönjohtavuus  $\lambda$  on jokaiselle materiaalille ominainen suure, jonka määräytymiseen vaikuttavat muun muassa materiaalin tiheys, huokoisuus ja kosteuspitoisuus (RIL 2014). Kokeellisesti määritettävä lämmönjohtavuuden arvo sisältää huokoisilla materiaaleilla myös huokosten sisällä tapahtuvan säteilyn ja konvektion vaikutuksen johtumisen lisäksi. Lämmöneristemateriaalien lämmönjohtavuuden määrittämisessä on otettu huomioon johtuminen materiaalin kiinteässä osassa, esimerkiksi mineraalivillan mineraalikuuduissa, sekä johtuminen, säteily ja konvektio huokosilmassa. Paikalliset huokosten sisällä tapahtuvat mikroskooppiset konvektiovirtaukset vaikuttavat kuitenkin yleensä vain hyvin vähän lämmönjohtavuuteen. (Hagentoft 2001; Mills 1999)

Lämpövirran tiheys homogeenisissa ja isotrooppisissa eli suunnasta riippumattomissa materiaaleissa noudattaa Fourierin lakia (RIL 2014). Lämpöenergia siirtyy alhaisemman lämpötilan suuntaan eli päinvastaiseen suuntaan lämpötilagradienttiin nähden, minkä takia lämpövirran tiheyden kaavassa 2.1 on negatiivinen etumerkki (Bergman et al. 2011). Kaavassa 2.1 Fourierin laki on ilmaistu vektorimuodossa.

$$\mathbf{q} = -\lambda \nabla T = \left( -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \lambda \frac{\partial T}{\partial y}, \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.1)$$

missä

$q$  = johtumisesta aiheutuva lämpövirran tiheys ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$\lambda$  = aineen lämmönjohtavuus ( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ )

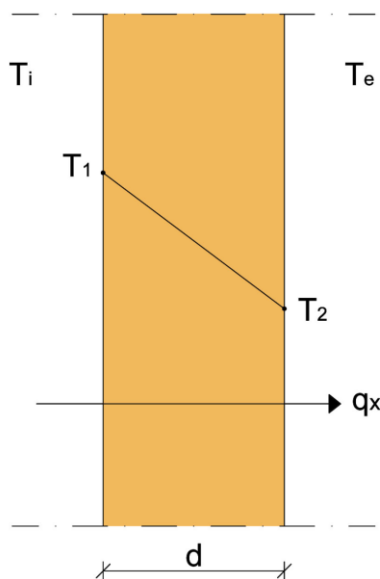
$T$  = lämpötila (K)

Kaava 2.1 johtaa stationääritilassa eli ajan suhteen muuttumattomassa tasapainotilanteessa kaavan 2.2 mukaiseen lämpövirran tiheyteen, kun tarkasteltava rakenne on yksidimensionaalinen. Kun lämpötilat ovat vakioita rakenteen molemmin puolin, voidaan homogeenisen ja tasapaksun rakennekerroksen läpi johtuva lämpövirta ilmaista edelleen kaavalla 2.2 käyttämällä lämpötilana  $T_1$  rakenneosan sisäpinnan lämpötilaa ja lämpötilana  $T_2$  rakenneosan ulkopinnan lämpötilaa (Hagentoft, 2001). Tilannetta on havainnollistettu kuvassa 2.1.

$$q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{d} = \lambda \frac{T_1 - T_2}{d} \quad (2.2)$$

missä

$d$  = rakenneosan paksuus (m)



**Kuva 2.1.** Homogeenisen tasapaksun rakennekerroksen läpi johtuva lämpövirta ja pintojen lämpötilat.

Kokonaislämpövirta määritellään rakenneosan läpi siirtyvän lämpövirran tiheyden ja tarkasteltavan pinta-alan tulona kaavalla 2.3. Toinen kokonaislämpövirran merkintätapa rakennusfysiikan julkaisuissa on kirjain  $Q$ . (Hagentoft 2001)

$$\Phi = qA \quad (2.3)$$

missä

$\Phi$  = kokonaislämpövirta (W)

$A$  = pinta-ala ( $\text{m}^2$ )

Lämmönvastus  $R$  ilmaisee stationääritilassa olevan tasapaksun ainekerroksen läpi siirtyvän lämpövirran määrän pinta-alayksikköä kohti, kun lämpötilaero kerroksen pintojen välillä on yksikön suuruinen (RakMk C4 2012). Lämmönvastuksen arvon kasvaessa materiaalin tai rakenteen läpi siirtyvä lämpövirta pienenee. Yhden ainekerroksen lämmönvastus voidaan laskea kerroksen paksuuden ja lämmönjohtavuuden suunnitteluarvon perusteella kaavasta 2.4.

$$R = \frac{d}{\lambda_U} \quad (2.4)$$

missä

$R$  = lämmönvastus ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ )

$d$  = materiaalikerroksen paksuus (m)

$\lambda_U$  = materiaalin lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo ( $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )

Kerroksellinen rakennusosa koostuu useista ainekerroksista, jotka voivat olla lämmönjohtavuudeltaan ja paksuudeltaan erilaisia. Kun ainekerrokset ovat lämpövirran suuntaan nähden peräkkäisiä, koko rakennusosan kokonaislämmönvastus  $R_T$  lasketaan kaavalla 2.5. (RakMk C4 2012)

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} \quad (2.5)$$

missä

$R_{si}$  = sisäpinnan lämmönvastus ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ )

$R_{se}$  = ulkopinnan lämmönvastus ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ )

$R_1 \dots R_n$  = rakennusosan ainekerrosten lämmönvastukset ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ )

Rakennusosan sisältäessä lämpövirran suuntaan nähden lämmönjohtavuudeltaan erilaisia rinnakkaisia ainekerroksia, lasketaan rakennusosan kokonaislämmönvastus kaavalla 2.6. Tällöin lasketaan keskiarvo rakennusosan kokonaislämmönvastukselle lasketusta yläkiarvosta  $R'_T$  ja alalikiarvosta  $R''_T$ . (SFS-EN ISO 6946 2008)

$$R_T = \frac{R'_T + R''_T}{2} \quad (2.6)$$

missä

$R'_T$  = rakennusosan kokonaislämmönvastuksen yläkiarvo ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ )

$R''_T$  = rakennusosan kokonaislämmönvastuksen alalikiarvo ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ )

Rakennusosan kokonaislämmönvastuksen yläkiarvoa laskettaessa rakennusosa jaetaan toisistaan riippumattomiin lohkoihin, joissa on lämpövirran suuntaan nähden vain peräkkäisiä lämmönjohtavuudeltaan erilaisia ainekerroksia, joiden lämmönvastukset voidaan laskea kaavalla 2.5. Lohkojako tehdään lämpövirran suuntaisesti koko rakennusosan läpi.

Yhtälöllä 2.7 saadaan laskettua kokonaislämmönvastuksen yläkiiarvo lohkojen kokonaislämmönvastusten avulla.

$$\frac{1}{R_T'} = \frac{f_a}{R_{Ta}} + \frac{f_b}{R_{Tb}} + \dots + \frac{f_n}{R_{Tn}} \quad (2.7)$$

missä

$f_a \dots f_n$  = lohkojen a, b, ..., n osuudet rakennusosan lämpövirran suuntaan nähden kohtisuorasta pinta-alasta (-)

$R_{Ta} \dots R_{Tn}$  = lohkojen a, b, ..., n kokonaislämmönvastukset ( $\text{m}^2\text{K/W}$ )

Rakennusosan kokonaislämmönvastuksen alalikiarvoa laskettaessa rakennusosa jaetaan kerroksiin siten, että jokainen kerros on lämmönjohtavuudeltaan yhtenäinen lämpövirran suunnassa. Lohkojako tehdään lämpövirran suuntaan nähden kohtisuoriin kerroksiin, jotka ulottuvat koko rakennusosan läpi. Kaavaa 2.8 käyttäen saadaan yhdistettyä kerroksen lämmönjohtavuudeltaan erilaisten rinnakkaisten lohkojen lämmönvastukset. Kerroksen paksuutena käytetään matkaa, jonka yhdistettävät lämmönjohtavuudeltaan erilaiset lohkot kulkevat rinnan. Lopulta rakennusosan kokonaislämmönvastuksen alalikiarvo saadaan laskettua kaavalla 2.9.

$$\frac{1}{R_j''} = \frac{f_a}{R_{ja}} + \frac{f_b}{R_{jb}} + \dots + \frac{f_n}{R_{jn}} \quad (2.8)$$

missä

$R_j''$  = rakennusosan kerroksessa j yhdistettävien rinnakkaisten lohkojen a, b, ..., n yhteenlaskettu lämmönvastus ( $\text{m}^2\text{K/W}$ )

$R_{ja} \dots R_{jn}$  = rakennusosan kerroksessa j yhdistettävien rinnakkaisten lohkojen a, b, ..., n lämmönvastukset ( $\text{m}^2\text{K/W}$ )

$$R_T'' = R_{si} + (R_1'' + R_2'' + \dots + R_j'') + (R_1 + R_2 + \dots + R_k) + R_{se} \quad (2.9)$$

missä

$R_1'' \dots R_n''$  = rakennusosan kerroksissa a, b, ..., n olevien rinnakkaisten lohkojen yhdistetyt lämmönvastukset ( $\text{m}^2\text{K/W}$ )

$R_1 \dots R_k$  = rakennusosan tasa-aineisista ja tasapaksuista ainekerroksista muodostuvien kerrosten 1, 2, ..., k lämmönvastukset ( $\text{m}^2\text{K/W}$ )

Rakenteen lämmönläpäisykerroin kuvaa lämpövirran tiheyttä, joka läpäisee rakennusosan stationääritilassa, kun rakennusosan eri puolilla vallitsevien lämpötilojen ero on yhden yksikön suuruinen. Kaavan 2.10 mukainen rakennusosan lämmönläpäisykerroin eli U-arvo on kokonaislämmönvastuksen käänteisluku. (RakMk C4 2012)

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (2.10)$$

missä

$U$  = rakenteen lämmönläpäisykerroin ( $W/(m^2K)$ )

Lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoa  $\lambda_U$  käytetään rakenteiden vaatimustenmukaisuutta osoitettaessa lämpöteknisillä laskelmilla. Se ottaa huomioon lämmönjohtavuuden mittaustulosten hajonnan ja lämpötilan, kosteuspitoisuuden sekä ikääntymisen vaikutuksen lämmönjohtavuuteen. Korjatun lämmönläpäisykerroimen  $U_c$ -arvoa määritettäessä, täytyy lämmöneristeessä olevien ilmarakojen ja huonosta asennuksesta sekä lämmöneristeen suuresta ilmanläpäisevyydestä aiheutuvat lämmön siirtymisen lisäykset ainekerroksessa tarkistaa, koska ne eivät sisälly lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoon. Nämä eri tekijät otetaan tarvittaessa huomioon korjatun  $U$ -arvon laskennassa. (RakMk C4 2012)

Rakennusosan lopullisena lämmönläpäisykerroimen vaatimustenmukaisuutta osoitettaessa ja energiankulutuslaskelmissa käytetään korjattua lämmönläpäisykerrointa  $U_c$ . Korjattu lämmönläpäisykerroin saadaan, kun kaavalla 2.10 laskettuun lämmönläpäisykerroimeen lisätään lämmönläpäisykerroimen korjaustermi  $\Delta U$ . Korjaustermi sisältää piste- ja viivamaisten kylmäsiltojen korjaustekijät  $\Delta U_f$  ja  $\Delta U_\psi$ , ilmarakojen aiheutuvan korjaustekijän  $\Delta U_g$  ja käännetyistä katoista aiheutuvan korjaustekijän  $\Delta U_r$ . (RakMk C4 2012). Kylmäsiltoja lisäävät vaipparakenteiden johtumislämpöhäviöitä. Kylmäsiltoja voivat muodostaa esimerkiksi lämmöneristekerrosta läpäisevät osat, joiden lämmönjohtavuus on paljon suurempi kuin lämmöneristemateriaalin. Standardin SFS-EN ISO 6946 (2008) mukaan korjaustermin vaikutusta ei tarvitse ottaa huomioon, jos kokonaiskorjaus on vähemmän kuin 3 % lämmönläpäisykerroimen arvosta.

Pintavastus  $R_s$  kuvaa pinnan ja ympäristön välisen rajapinnan lämmönvastusta. Rakennusosan kokonaislämmönvastus sisältää sisäpinnan ja ulkopinnan pintavastusten arvot, jotka riippuvat lämpövirran suunnasta. (RakMk C4 2012). Lisäksi pintavastusten arvoihin vaikuttavat pintaan tuleva ja siitä poistuva lämpösäteily sekä ilmapirtaukset pinnan lähellä (Paroc 2016). Pintavastusten karkeina arvoina voidaan käyttää sisäpinnan pintavastukselle lämpövirran suunnan ollessa ylöspäin  $0,10 \text{ m}^2\text{K/W}$ , vaakasuoraan  $0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$  ja alaspäin  $0,17 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Ulkopuolen pintavastuksen arvona voidaan käyttää kaikkiin suuntiin  $0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Tapauksissa, joissa lämpövirran suunta on muihin suuntiin, pintavastusten arvoja voidaan interpoloida lineaarisesti. (RakMk C4 2012).

Pintavastuksille voidaan laskea myös taulukkoarvoja tarkempia arvoja kaavalla 2.11, kun tunnetaan konvektion ja säteilyn lämmönsiirtokerroimet (SFS-EN ISO 6946 2008). Konvektion lämmönsiirtokerroin kasvaa sitä suuremmaksi mitä voimakkaampi ja pyörteisempi ilman virtaus pintaan kohdistuu. Säteilyn lämmönsiirtokerroin on matemaattisesti epälinearisempi ja riippuu muun muassa pinnan emissiviteetistä sekä pinnan ja sen ympäristön lämpötilaeroista. Pintavastuksissa ei tarvitse ottaa huomioon johtumalla siirtyvän lämpövirran osuutta sen ollessa häviävän pieni verrattuna konvektion ja säteilyn lämmön-

siirtokertoimiin. (Hens 2007). Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C4 luonnoksessa (2012) on esitetty tehollisia lämmönvastusarvoja myös suljetuille ilmapäälle, sillä niissä lämmön siirtyminen tapahtuu myös konvektion ja säteilyn avulla.

$$R_s = \frac{1}{h_c + h_r} \quad (2.11)$$

missä

$R_s$  = rakenteen pintavastus ( $\text{m}^2\text{K/W}$ )

$h_c$  = konvektion lämmönsiirtokerroin ( $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ )

$h_r$  = säteilyn lämmönsiirtokerroin ( $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ )

Jotta epästationäärisen tilanteen lämpötilat ja lämpövirran tiheydet voidaan määrittää eri ajanhetkinä, tarvitaan yhtälön 2.12 mukaista ajasta riippuvaa johtumisen energiataseyhtälöä.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q' \quad (2.12)$$

missä

$\rho$  = materiaalin tiheys ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$c_p$  = materiaalin ominaislämpökapasiteetti ( $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ )

$t$  = aika (s)

$q'$  = lämmönlähde tai -nielutermi ( $\text{W}/\text{m}^3$ )

Yhtälön vasen puoli kertoo varastoidun energian eli sisäenergian muutoksen ja oikea puoli tarkasteltavaan pisteeseen tulevan ja siitä lähtevän lämpövirran erotuksen, johon lisätään mahdollinen lämmönkehitys tai lämpöhäviö. (Hagentoft 2001)

## 2.2 Konvektio

Konvektiossa lämpöenergia siirtyy kaasun tai nesteen mukana. Virtauksia aiheuttavat esimerkiksi lämpötila- ja paine-erot. Konvektio tarvitsee aina väliaineen ja sen avulla lämpöä siirtyy aineiden tai pintojen välillä. Konvektio voi olla tyypiltään luonnollista, pakotettua tai yhdistelmä luonnollisesta ja pakotetusta konvektiosta. Luonnollinen konvektio aiheutuu painovoimasta ja lämpötilaeroista aiheutuvista ilman tiheyseroista. Pakotettua konvektiota aiheuttavat esimerkiksi tuuli, ilmanvaihtokoneet ja puhaltimet. (Hagentoft 2001; Bergman 2011). Ilmavirtaukset kuljettavat sekä lämpöä että kosteutta. Ilma liikkuu rakennuksessa tarkoituksen mukaisesti ilmanvaihdon avulla. Ilmavuotojen määrä sen sijaan pyritään minimoimaan.

Konvektiivinen lämmön siirtyminen pinnan ja ilman välillä voidaan ilmaista kaavalla 2.13. Konvektion lämmönsiirtokerroimen  $h_c$  arvon laskennalle on olemassa empiirisiä kaavoja, joissa muuttujina ovat virtausnopeus ja suunta pintaan nähden. Eri tilanteisiin

parhaiten soveltuvat laskentatavat riippuvat ilmavirtauksen tyypistä. Pakotetulle ja luonnolliselle konvektiolle on olemassa omat kaavansa, joista voidaan erottaa kaavat vielä rakennuksen vaipan ulkopinnoilla, kuten seinillä ja katolla, tapahtuvaan konvektioon erikseen tuulen- ja suojanpuolella.

$$q_c = h_c(T_s - T_a) \quad (2.13)$$

missä

$q_c$  = konvektiivinen lämpövirran tiheys ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$h_c$  = konvektion lämmönsiirtokerroin ( $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ )

$T_s$  = pinnan lämpötila (K)

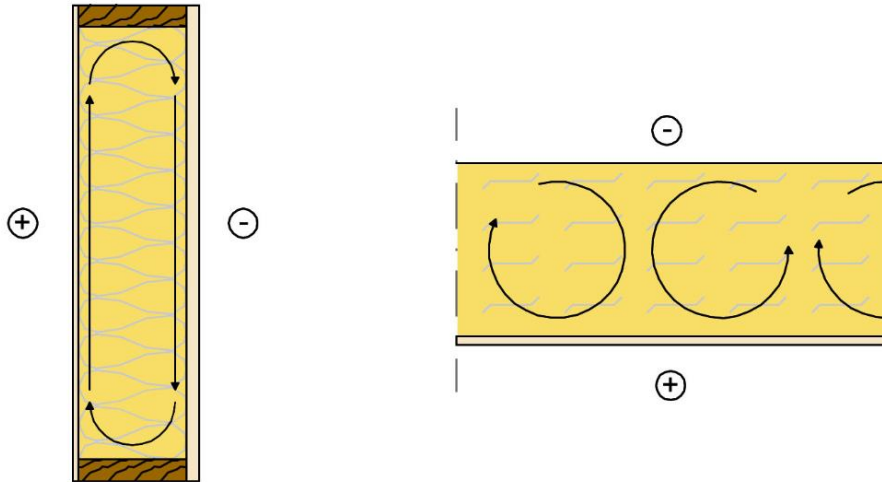
$T_a$  = ympäröivän ilman lämpötila (K)

Hagentoft (2001) on esittänyt laskentakaavoja konvektion lämmönsiirtokertoimelle  $h_c$ , jota voidaan merkitä myös termillä  $\alpha_c$ . Muun muassa Emmel et al. (2006) ja Defraeye et al. (2011) ovat esittäneet mittauksiin perustuvia konvektion lämmönsiirtokertoimia tarkemmin artikkeleissaan.

Huokoisessa hyvin ilmaa läpäisevissä materiaalissa, jonka yli vaikuttaa lämpötilaero, saattaa esiintyä materiaalin sisällä luonnollisen konvektion aiheuttamia ilmavirtauksia, jotka lisäävät kerroksen läpi siirtyvää lämpövirtaa. Tätä ilmiötä kutsutaan rakenteen sisäiseksi konvektioksi. Sisäinen konvektio kuljettaa myös vesihöyryä, ja siten sillä voi olla vaikutusta rakenteen kosteustekniseen toimintaan. Sisäinen konvektio syntyy lämpötilaerojen ja painovoiman vaikutuksesta. (Vinha et al. 2013). Huokoisessa materiaalissa lämmön siirtymiseen vaikuttavat kaikki lämmön siirtymismuodot huokosten sisällä. Konvektio suurentaa rakenteen lämmönläpäisykerrointa eli heikentää sen eristävyttä. (Hagentoft 2001)

Konvektiivisen ilmavirtauksen suuruuteen vaikuttavat muun muassa lämpötilaero ja materiaalikerroksen geometria, paksuus sekä ilmanläpäisevyys. Ilma kiertää huokoisen materiaalin sisällä siirtäen lämpöä lämpimämmästä pinnasta kylmempään. Vaakasuuntaisissa rakenteissa konvektio on mahdollinen vain silloin, kun lämpimämpi puoli on rakenteen alapuolella. Alapohjassa ei siis tapahdu rakenteen sisäistä konvektiota, koska lämmin kevyt ilma on jo rakenteen yläpinnassa. (Vinha et al. 2013)

Seinäarakenteilla sisäisen konvektion aiheuttamat ilman virtaus suunnat ovat helpommin mallinnettavissa kuin vaakarakenteilla. Vaakarakenteiden sisäisen konvektion aiheuttamien virtauspyörteiden arvioiminen on hankalampaa, sillä rakenteen sisälle aiheutuvat pyörteet vaikuttavat myös toisiinsa ja niiden virtaus suunnat eivät välttämättä ole aina samaan suuntaan. (Vinha et al. 2013). Sisäisen konvektion aiheuttamista virtauspyörteistä on esimerkkejä kuvassa 2.2.



**Kuva 2.2.** Esimerkkejä sisäisen konvektion aiheuttamista ilmavirtauksista sekä pysty- että vaakarakenteilla.

Laskennallisesti luonnollisen konvektion tapahtumista voidaan arvioida Nusseltin luvulla sekä muunnetulla Rayleighin luvulla. Nusseltin luku kertoo konvektion vaikutuksesta lisääntyneen lämpövirran määrään. Se on kaavan 2.14 mukainen määritelmä, joka saadaan jakamalla koko rakenteen läpi virtaavan lämpövirran tiheys pelkän johtumisen aiheuttamalla lämpövirran tiheydellä. Sisäistä konvektiota ei tapahdu, jos Nusseltin luku on 1,0. Nusseltin luvun arvo riippuu voimakkaasti muunnetusta Rayleighin luvusta, joka kuvaa potentiaalia luonnollisen konvektion muodostumiselle. (Hagentoft 2001; Vinha et al. 2013)

$$Nu = \frac{q_{cd+conv}}{q_{cd}} \quad (2.14)$$

Muunnettu Rayleighin luku on dimensioton luku, jonka avulla voidaan arvioida lämpötilaeron aiheuttaman sisäisen konvektion suuruutta. Standardin SFS-EN ISO 10456 (2008) mukainen muunnetun Rayleighin luvun määritelmä on esitetty kaavassa 2.15, ja sen arvo riippuu materiaalin ilmanläpäisevyydestä, paksuudesta ja vaikuttavasta lämpötilaerosta.

$$Ra_m = \frac{\rho_a c_{pa} g \beta dk (T^+ - T^-)}{\gamma_a \lambda} \quad (2.15)$$

$Ra_m$  = muunnettu Rayleighin luku (-)

$\rho_a$  = ilman tiheys ( $\text{kg/m}^3$ )

$c_{pa}$  = ilman ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa  $\text{J}/(\text{K}\cdot\text{kg})$

$g$  = putoamiskiihtyvyyys ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )

$\beta$  = ilman tilavuuden lämpölaajenemiskerroin ( $1/\text{K}$ )

$\gamma_a$  = ilman kinemaattinen viskositeetti eli dynaaminen viskositeetti jaettuna tiheydellä ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$T^+, T^-$  = lämpötilat eristekerroksen pinnoilla (K)



Kun kaavan 2.15 ilman ominaisuudet korvataan 10 °C lämpötilassa määritetyillä arvoilla, saadaan kaava yksinkertaistettua kaavan 2.16 mukaiseen muotoon (SFS-EN ISO 10456 2008). Rakentamismääräyskokoelman osan C4 luonnos (2012) antaa raja-arvoja yläpohjarakenteiden ja ulkoseinien lämmöneristekerroksissa tapahtuvalle luonnolliselle konvektiolle, jota tarkastellaan muunnetun Rayleighin luvun avulla. Muunnettua Rayleighin lukua tarkasteltaessa sisä- ja ulkoilman välisenä lämpötilaerona käytetään 50 °C. Vaaka-suorilla rakenteilla Nusseltin luku ja Rayleighin luku riippuvat myös siitä, onko huokoisin materiaalin pinta avoin vai peitetty ilmatiiviillä kerroksella (Hagentoft 2001).

$$Ra_m = k \frac{dK_a \eta_a \Delta T}{\lambda_U} \quad (2.16)$$

missä

$K_a$  = lämmöneristeen ilmanläpäisevyys ( $\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ )

$\eta_a$  = ilman dynaaminen viskositeetti 10 °C lämpötilassa ( $0,0175 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )

$k$  = kerroin, jonka arvo on ( $3 \cdot 10^6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^3 \cdot \text{K}^2)$ )

$\Delta T$  = lämmöneristekerroksen sisä- ja ulkopinnan välinen lämpötilaero (K)

Ulkoseinillä lämpövirran kulkiessa vaakasuuntaan suurimman sallitun muunnetun Rayleighin luvun raja-arvo on 2,5. Yläpohjarakenteilla lämpövirran suunnan ollessa ylöspäin raja-arvo on 15, kun lämmöneristeen yläpinta on avoin ja 30, jos lämmöneristeen yläpinnassa on tuulensuoja. Kaltevilla katoilla muunnetun Rayleighin luvun raja-arvo voidaan interpoloida. Pienimmillään raja-arvona voidaan käyttää kuitenkin ulkoseinän arvoa 2,5. Useammasta erilaisesta ilmaa läpäisevästä lämmöneristeestä koostuvalle eristerakenteelle lasketaan yhdistetty muunnettu Rayleighin luku, jossa lasketaan yhdistetty lämmönjohtavuus ja ilmanläpäisevyys kerrosten paksuuksien suhteen painotettuna keskiarvona. Raja-arvon ylittyessä on tehtävä yksityiskohtainen analyysi tai mittaus, jonka perusteella päätetään, onko tehtävä rakenteellisia muutoksia tai vaihdettava eriste vähemmän ilmaa läpäisevään materiaaliin haitallisen konvektion estämiseksi. (RakMk C4 2012). FRAME-tutkimuksen tulosten perusteella muunnetun Rayleighin luvun raja-arvot vaakarakenteille tulisi laskea molemmissa tilanteissa arvoon 5, jotta sisäistä konvektiota ei tapahtuisi (Vinha et al. 2013). Myös Shankar ja Hagentoft ovat saaneet samansuuntaisia tuloksia laskennallisessa tutkimuksessaan (Shankar & Hagentoft 2000).

## 2.3 Säteily

Säteily on partikkeleiden tai elektromagneettisten aaltojen etenemistä. Lämpösäteily on ainoastaan sähkömagneettista säteilyä. Säteilyn fysikaaliset lait eroavat suuresti johtumisesta ja konvektiosta. Johtumisesta ja konvektiosta poiketen lämpösäteily ei tarvitse väliainetta, vaan se voi siirtyä myös tyhjiössä. Pintaan tuleva kokonaissäteilyteho on yleensä summa eri suunnista tulevista säteistä, joilla voi olla eri aallonpituuksia. Lämpötilan ol-

lessa yli 0 K kaikki kappaleet lähettävät lämpötilaerojen vaikutuksesta tapahtuvaa lämpösäteilyä. (Hagentoft 2001). Pinnan lähettämää lämpösäteilyä voidaan pitää kappaleen elektronien konfiguraatioiden muutoksina atomeissa tai molekyyliessä (Bergman 2011).

Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa säteily voidaan jakaa karkeasti lyhytaaltoiseen auringonsäteilyyn ja pitkäaaltoiseen lämpösäteilyyn. Lämpösäteilyn aallonpituus vaihtelee välillä 0,1–100  $\mu\text{m}$ , mikä vastaa lämmön emittoitumista  $-100\text{ }^\circ\text{C}$  ja  $10\,000\text{ }^\circ\text{C}$  välillä. Lämpösäteily sisältää myös näkyvän valon aallonpituuksilla 0,40–0,70  $\mu\text{m}$ . Säteilyn aallonpituus määritellään kaavalla 2.17, jossa säteilyn taajuuden kasvaessa aallonpituus pienenee. (Hagentoft 2001; Hens 2007)

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.17)$$

missä

$\lambda$  = säteilyn aallonpituus (m)

$c$  = valonnopeus tyhjiössä ( $2,998 \cdot 10^8$  m/s)

$f$  = taajuus (Hz)

Säteilyenergian törmätessä pintaan, osa siitä heijastuu ( $\rho$ ), osa absorboituu ( $\alpha$ ) ja osa läpäisee pinnan muodostaman väliaineen ( $\tau$ ). Näiden tekijöiden yhteenlaskettu summa on aina yksi kaavan 2.18 mukaisesti. Rakennusmateriaalit eivät tyypillisesti läpäise lämmön siirtymisen kannalta käytännössä ollenkaan lämpösäteilyä, jolloin  $\tau = 0$ . Poikkeuksena on lasi ja valoa läpäisevät muovit, jotka läpäisevät ja johtavat lyhytaaltoista säteilyä. (Hagentoft 2001)

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (2.18)$$

Mustalla kappaleella tarkoitetaan fysiikassa ideaalista pintaa, jolla on tietyt ominaisuudet. Se absorboi eli imee kaiken tulevan säteilyn riippumatta siitä, mikä on säteilyn aallonpituus tai tulosuunta. Ideaalisen mustan kappaleen pinta myös emittoi eli lähettää enemmän energiaa samassa lämpötilassa kuin mikään muu pinta, joten todelliset pinnat eivät voi ikinä emittoida yhtä paljon säteilyä kuin mustan kappaleen pinta. (Hagentoft 2001; Mills 1999)

Stefan-Boltzmannin laki esittää laskentatavan (kaava 2.19) mustan kappaleen pinnan lähettämälle teoreettiselle suurimmalle kokonaisemissiviteetin teholle. Se on saatu integroimalla aallonpituudesta riippuva säteilyteho kaikkien aallonpituuksien yli (Hagentoft 2001).

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (2.19)$$

missä

$\sigma$  = Stefan-Boltzmannin vakio ( $5,67 \cdot 10^{-8}$  W/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>))

$T_s$  = pinnan lämpötila (K)

Emissiviteetti ilmaisee, kuinka paljon pinta emittoi pitkäaaltoista lämpösäteilyä verrattuna mustan kappaleen pintaan. Mustan kappaleen pinnan emissiviteetti on 1 ja todellisten pintojen emissiviteetit ovat välillä 0–1. Emissiviteetin arvoon vaikuttavat tarkasteltava materiaali ja erityisesti sen pinnan lämpötila sekä säteilyn suunta ja aallonpituus (Bergman 2011). Pinnan kokonaisemissiviteetti  $\varepsilon$  määräytyy todellisen pinnan ja mustan kappaleen lähettämän säteilytehon suhteena tietyssä lämpötilassa kaavalla 2.20 (Hagentoft 2001).

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} \quad (2.20)$$

Harmaalla pinnalla tarkoitetaan pintaa, jossa säteily on riippumaton aallonpituudesta. Diffuusin pinnan säteilyominaisuudet ovat riippumattomat säteilyn suunnasta. Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa pintoja käsitellään yleensä diffuuseina harmaina pintoina. Absorptiossa pinta imee säteilyä kasvattaen materiaalin sisältämää lämpöenergiaa. (Bergman 2011; Hagentoft 2001) Kirchhoffin lain mukaan harmaiden pintojen välillä pintojen lämpötilojen ollessa samassa kokoluokassa pitkäaaltoisen lämpösäteilyn emissiokerroin  $\varepsilon$  on sama kuin säteilyn absorptiokerroin  $\alpha$  (kaava 2.21). Tätä oletusta voidaan käyttää rakennusfysiikan sovellutuksissa määrittäessä kahden kappaleen pintojen välistä lämpösäteilyä. Lyhytaaltoiselle auringonsäteilylle emissiviteetti ei ole sama kuin säteilyn absorptiokerroin, vaan siihen vaikuttaa oleellisesti pinnan väritys. Myös absorptiokerroin vaihtelee emissiviteetin tapaan välillä 0–1 ja se pienenee pinnan muuttuessa vaaleammaksi. (RIL 255-1-2014)

$$\varepsilon = \alpha \quad (2.21)$$

Todellisen kappaleen pinnan emittoima säteilyteho  $E$  saadaan laskettua yhdistämällä kaavat 2.20 ja 2.21 kaavaksi 2.22.

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (2.22)$$

Kun tarkastellaan rakennuksen pintoja, joiden oletetaan olevan diffuuseja harmaita pintoja, voidaan nettosäteilyn lämpövirran tiheys  $q_{rad}$  laskea kaavalla 2.23.

$$q_{rad} = h_r \cdot (T_s - T_{sur}) \quad (2.23)$$

missä

$h_r$  = tarkasteltavan pinnan säteilyn lämmönsiirtokerroin (W/(m<sup>2</sup>K))

$T_s$  = pinnan lämpötila (°C, K)

$T_{sur}$  = ympäristön välinen lämpösäteily (°C, K)

Kahden tai useamman pinnan väliseen lämpösäteilytaseeseen vaikuttavat pintojen ominaisuuksien lisäksi pintojen väliset näkyvyyskertoimet, jotka ovat pelkästään tarkasteltavien pintojen geometrioista laskettavia suureita. Näkyvyyskertoimet ovat aina välillä 0-1 ja niiden määrittystapoja on esitetty muun muassa lähteissä (Hagentoft 2001; Bergman 2011).

## 2.4 Ilmavirtaus

Avohuokoisen materiaalin yli vaikuttavan paine-eron aikana ilmaa virtaa materiaalin läpi. Paine-eroja rakennuksissa aiheuttavat tuuli, lämpötilaerot sekä ilmanvaihto. Ilmavirtaus-  
ten suuruutta voidaan mitata muun muassa kuumalanka- tai siipipyöräänemometrillä. Tyypillisimmät ilmamäärän mittaussuureet ovat m/s, m<sup>3</sup>/s ja l/s.

Tietyn paksuisen materiaalikerroksen läpi siirtyvä ilmavirta voidaan laskea kaavalla 2.24. Ilman ominaisuuksien lisäksi ilmavirtauksen suuruuteen vaikuttavat paine-ero, materiaalin paksuus ja pinta-ala. (Hagentoft 2001)

$$R_a = A \cdot \frac{k}{\eta_a} \cdot \frac{\Delta P}{d} \quad (2.24)$$

missä

$R_a$  = ilmavirta (m<sup>3</sup>/s)

$k$  = ilman permeabiliteetti (m<sup>2</sup>)

$\eta_a$  = ilman dynaaminen viskositeetti ( $\approx 17,5 \cdot 10^{-6}$  s·Pa, N·s/m<sup>2</sup>)

$d$  = materiaalin paksuus

$\Delta P$  = paine-ero (Pa)

Raon tai ilmavälin läpi siirtyvä ilmavirtaus voidaan laskea kaavalla 2.25, kun ilman virtaus on laminaarista, jolloin raon alku- ja loppupään ilmanvastusten merkitys on usein melko pieni.

$$R_a = \frac{b^2 \cdot A \cdot \Delta P}{12 \cdot \eta_a \cdot L} \quad (2.25)$$

missä

$b$  = ilmavälin korkeus (m)

$A$  = ilmaväin pinta-ala kohtisuoraan ilmavirtaukseen nähden (m<sup>2</sup>)

$L$  = ilmavälin pituus (m)

Ilman virtaus on laminaarista eli tasaista, mikäli kaavan 2.26 ehto täyttyy. Laminaarisen virtauksen vastakohta on turbulenti eli pyörteinen virtaus. (Hagentoft 2001)

$$\frac{R_a \cdot 2 \cdot b \cdot \rho_a}{\eta_a \cdot A} < 2000 \quad (2.26)$$

missä

$\rho_a$  = ilman tiheys 20 °C:ssa (1,2 kg/m<sup>3</sup>)

### 3. YLÄPOHJARAKENTEIDEN RAKENNUSFYSIKAALINEN TUTKIMUSLAITTEISTO

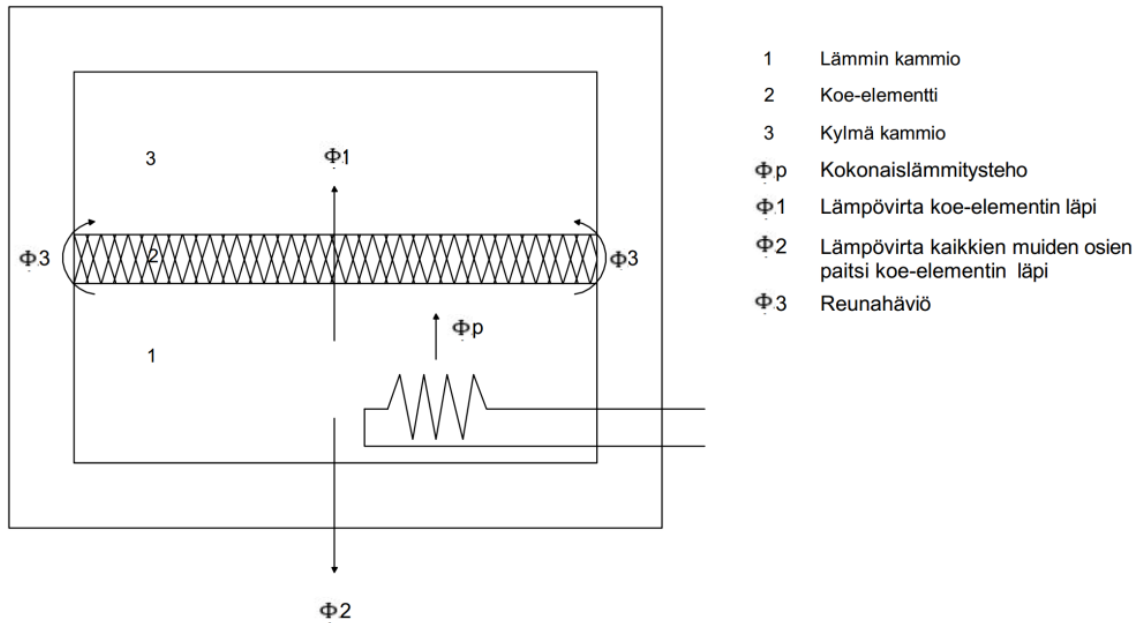
TTY:llä vuonna 2016 valmistunut yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalinen tutkimuslaitteisto on periaatteeltaan kalibroitava lämmönläpäisylaitteisto, jolla tutkitaan vaakarakenteita. TTY:llä on aiemmin tehty vastaavanlainen laitteisto, jota kutsutaan seinärakenteiden rakennusfysikaaliseksi tutkimuslaitteistoksi. Professori Juha Vinha on tehnyt lisensiaatintutkimuksensa (Vinha 1998) ja väitöskirjansa (Vinha 2007) rakennusfysikaaliseen tutkimuslaitteistoon liittyen. Rakennusfysikaalinen tutkimuslaitteisto on valmistunut ensimmäisiä kokeita varten vuonna 1996, ja sillä voidaan tutkia pystyrakenteita, kuten seiniä ja ikkunoita.

TTY:llä vuonna 2009–2012 käynnissä olleeseen FRAME-projektiin rakennettiin myös pienikokoinen lämmönläpäisylaitteisto, jolla tutkittiin muun muassa yläpohjarakenteiden hyvin ilmaa läpäisevien eristeiden sisäistä konvektiota. (Vinha et al. 2013; Pakkanen 2012). Tutkimuksen tuloksena pääteltiin kuitenkin, että kyseisen laitteiston tutkimusaukon pinta-ala (1,44 m<sup>2</sup>) oli liian pieni ja reunojen osuus suhteessa tutkittavaan pinta-alaan oli liian suuri, jotta laitteistolla olisi pystytty luotettavasti kuvaamaan yläpohjarakenteissa tapahtuvaa luonnollista konvektiota. Uutta yläpohjarakenteiden tutkimukseen tarkoitettua rakennusfysikaalista tutkimuslaitteistoa on kehitetty edellisten tutkimuslaitteistojen rakentamisesta saatujen kokemusten perusteella. Yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalinen tutkimuslaitteisto on pyritty rakentamaan mahdollisuuksien mukaan vastaamaan standardin SFS-EN ISO 8990 (1996) asettamia toiminnallisia vaatimuksia.

#### 3.1 Calibrated hot box -laitteistojen yleinen toimintaperiaate

Lämmöneristysominaisuuksien mittaaminen rakenteista tapahtuu laboratoriossa yleensä lämpökammion menetelmään perustuvilla mittauslaitteistoilla. Lämmönläpäisylaitteistot koostuvat kahdesta eri lämpötilassa olevasta kammioista. Kylmän ja lämpimän kammion väliin jää tutkimusaukko, johon tutkittava rakenne asetetaan. Erilaisia lämmönläpäisylaitteistoja ovat kalibroitu lämmönläpäisylaitteisto (calibrated hot box, CHB), suojattu lämmönläpäisylaitteisto (guarded hot box, GHB) sekä lämpövirtalevymenetelmää käyttävä lämpövirtalevylaitteisto (hot box with heat flow meter, HFM HB). (SFS-EN ISO 8990 1996; Vinha 1998)

Kalibroitava lämmönläpäisylaitteisto koostuu kylmästä ulkoilman olosuhteita mallintavasta kammioista ja lämpimästä sisäilman olosuhteita mallintavasta kammioista, joiden lämpötilat ovat säädettävissä. Tutkimusaukko sijaitsee lämpimän kammion päällä. Kuvassa 3.1 on esitetty kalibroitavan lämmönläpäisylaitteiston toimintaperiaate.



**Kuva 3.1.** Kalibroittavan lämmönläpäisylaitteiston toimintaperiaate.

Lämmönläpäisykoetta suoritettaessa asetetaan rakenteen sisä- ja ulkopuolelle tavoiteltava lämpötilaero kylmän ja lämpimän kammion lämpötiloja säätämällä. Kokeessa mitataan lämpimään kammioon syötettävä kokonaislämmitysteho, kun systeemi on saavuttanut tasapainotilan (SFS-EN ISO 8990 1996). Tasapaino- eli stationääritilanne tarkoittaa lämmönläpäisykokeessa sitä, että lämpötilat ja lämpövirta ovat riippumattomia ajasta eli lämpötilat ja rakenteen läpi siirtyvä lämpövirta ovat käytännössä vakioita (Hens 2007) ja kammioiden lämpötilojen ja kokonaislämmitystehon vaihtelu pysyy 1 % sisällä vähintään kahden peräkkäisen testijakson aikana. Testijakson pituus on vähintään kolme tuntia. (SFS-EN ISO 8990 1996). Stationääritilanne saavutetaan lisäämällä ja vähentämällä tasaisin väliajoin lämmitystehoa lämpimässä kammiossa tai jäähtytysaikaa kylmässä kammiossa siten, että lämpötilat pysyvät mahdollisimman muuttumattomina tavoitearvoissa.

Stationääritilan saavuttamiseen kuluvaan aikaan vaikuttavat rakenteessa käytettävien materiaalien terminen diffusiviteetti ja rakenteen paksuus sekä kokeen lähtötilanne. Termisen diffusiviteetin pienentyessä myös lämpötila muuttuu hitaammin rakenteen sisällä, eli sen arvoon vaikuttaa lämmönjohtavuuden lisäksi tiheys ja ominaislämpökapasiteetti. Ohuissa materiaaleissa lämpötilat tasoittuvat nopeammin kuin paksuissa. (Vinha 2007).

Laitteiston ja tutkittavien materiaalien ominaisuuksien ja tutkittavan rakenteen paksuuden lisäksi stationääritilan saavuttamiseen kuluvaan aikaan vaikuttavat lämpimän kammion ja tutkittavan rakenteen ulkopinnoilla vallitsevat olosuhteet, tutkittavan rakenteen kosteuspitoisuus sekä käytettävän säätöjärjestelmän tehokkuus. Lämmön siirtyminen rakenteiden ja ilman välillä tapahtuu sitä nopeammin mitä suuremmat ovat pintojen lämmönsiirtokertoimet. Eristetyllä koe-elementillä koe-elementin lämmönvastus on kuitenkin merkittävästi suurempi kuin pintavastukset yhteensä, joten sen vaikutus laitteiston

tasaantumisaikaan on suurempi kuin pintojen lämmönsiirtokertoimien. Lämmönsiirtokerroin koostuu konvektion, säteilyn sekä johtumisen lämmönsiirtokertoimista, joista kuitenkin johtumisen lämmönsiirtokertoimen vaikutus on niin pieni, että se voidaan jättää ottamatta huomioon. Kammion ja koerakenteen säilyttäminen samanlaisissa kosteusolosuhteissa jo ennen koetta nopeuttaa tasapainotilanteen saavuttamista. (Vinha 1998). Kun systeemi on saavuttanut stationääritilan mittaustilanteessa, voidaan U-arvon laskemiseen tarvittavat suureet mitata vähintään 3 tunnin keskiarvona (SFS-EN ISO 8990 1996). Suureiden mittaamiseen on kuitenkin varmempaa käyttää ainakin 6 tunnin keskiarvoa. Keskiarvon laskentaan käytettävä aikaväli on arvioitava koetilanteen mukaan.

Kokeessa tapahtuva lämmön siirtyminen koerakenteen pintojen välillä sisältää lämmön siirtymisen sekä konvektiolla että säteilyllä. Lämmön siirtyminen konvektiolla riippuu ilman lämpötilasta ja rakenteen ilmanläpäisevyydestä. Lämmön siirtyminen säteilemällä taas riippuu emittoituneesta lämpöenergiasta ja kappaleen näkemistä pinnoista. (SFS-EN ISO 8990 1996). Rakenteen sisällä tapahtuu lämmön siirtymistä myös johtumalla.

Jotta rakenteen lämmönvastus ja lämmönläpäisykerroin voidaan määrittää kokeen avulla, täytyy määrittää tutkittavan rakenteen läpi siirtyvä lämpövirta. Tämä saadaan laskettua kaavalla 3.1, kun lämpimään kammioon syötetystä kokonaislämpövirrasta vähennetään lämpimän kammion vaipan läpi siirtyvä häviölämpövirta, joka saadaan selville lämpimän kammion kalibroinnilla. (Vinha 1998; Vinha et al. 2013). Kalibroinnista on kerrottu enemmän luvussa 3.4.

$$\Phi_{rak} = P_{kok} - \Phi_h \quad (3.1)$$

missä

$\Phi_{rak}$  = tutkittavan rakenteen läpi siirtyvä lämpövirta (W)

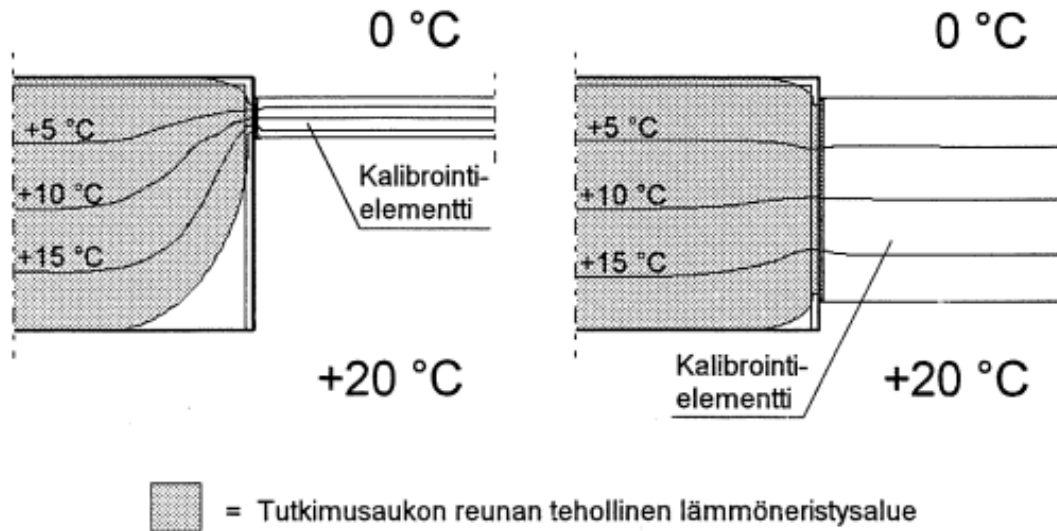
$P_{kok}$  = kokonaislämmitysteho (W)

$\Phi_h$  = lämpimän kammion vaipan läpi siirtyvä lämpövirta eli lämpöhäviö, joka määritetään kalibrointikokeella (W)

Lämpimään kammioon syötetty kokonaislämmitysteho koostuu lämmitysvastusten tehosta sekä kaikkien sisätuulettimien tehosta. Kaikki lämpimässä kammiossa olevat anturit tuottavat myös hieman lämmitystehoa, mutta tämän katsotaan olevan niin pieni verrattuna sisätuulettimista aiheutuvaan tehoon, että sitä ei oteta mukaan laskennalliseen lämmitystehton suuruuteen. Tuulettimia käytetään samoilla virransyöttöasetuksilla sekä kalibrointikokeessa että varsinaisessa kokeessa, joten niiden aiheuttama lämmitysteho voidaan olettaa olevan suunnilleen sama molemmissa kokeissa.

Kalibroinnin suorittaminen tutkittavan rakenteen paksuisella kalibrointielementillä on erittäin tärkeää, koska lämpimän kammion läpi siirtyvä lämpövirta muuttuu elementin paksuuden muuttuessa. Tätä reuna-alueilla tapahtuvaa lämpövirran muutosta kutsutaan reunahäviöksi, jolloin tutkimusaukon reuna-alueiden tehollinen lämmöneristyspaksuus muuttuu. Kalibrointielementin paksuuden kasvaessa reunahäviön osuus pienenee, jolloin

sen luotettava määrittäminen hankaloituu. Reunahäviö sisältyy häviölämpövirtaan, ja reunahäviön osuus on se, joka muuttaa häviölämpövirran suuruutta, kun elementin paksuus muuttuu. (Vinha 1998). Vinha on havainnollistanut lisensiaatintyössään (Vinha 1998) tätä reunan tehollisen lämmöneristyspaksuuden muuttumista elementin koon muuttuessa kuvassa 3.2.



**Kuva 3.2.** Tutkimusaukon reunan tehollisen lämmöneristyspaksuuden muutos eri kokoisilla kalibrointielementeillä (Vinha 1998).

Kun tutkittavan rakenteen läpi siirtyvä lämpövirta on tiedossa, voidaan rakenteen U-arvo laskea kaavalla 3.2.

$$U = \frac{\Phi_{rak}}{A \cdot \Delta T} \quad (3.2)$$

missä

$U$  = lämmönläpäisykerroin ( $W/(m^2K)$ )

$A$  = tutkittavan rakenteen pinta-ala ( $m^2$ )

$\Delta T$  = lämpötilaero kylmän ja lämpimän kammion välillä (K)

Lämpötilaeron laskennassa käytettävät lämpötilat voidaan mitata joko ilma- tai pintalämpötilojen erotuksena. Ilman lämpötiloja käytettäessä lämpötilaeron laskennassa tulokseen sisältyy koetilanteen mukaiset ulko- ja sisäpintojen pintavastukset, jotka poikkeavat toisistaan hieman aina koetilanteen vaihtuessa. Jotta tulokset saataisiin standardin SFS-EN ISO 8990 (1996) mukaisiksi, täytyy ilmavirran nopeudet koetilanteessa saada sellaiselle tasolle, että standardissa vaaditut pintavastukset täyttyvät. (Vinha 2013). Kun lämpötilaero lasketaan käyttäen rakenteen pintalämpötiloja, tulos kuvaa pinnasta pintaan U-arvoa, jossa ei ole mukana pintavastusten vaikutusta ja eri kokeiden väliset tulokset ovat paremmin vertailtavissa. Näiden koetulosten mukaisesti lämmönvastuksiin voidaan lisätä standardin SFS-EN ISO 6946 (2008) mukaisen pintavastusten vaikutus, joka on yhteensä



0,14 m<sup>2</sup>K/W, kun lämpövirran suunta on ylöspäin. Näin saatua lämmönläpäisykerroimen arvoa voidaan merkitä termillä  $U_{0,14}$ . Pintavastusten summa on 0,17 m<sup>2</sup>K/W lämpövirran suunnan ollessa vaakasuoraan.

Koetilanteen mukaisen U-arvon laskennassa lämpötilaerona käytetään yleensä ympäristölämpötilojen erotusta. Ympäristölämpötiloja ohjeistetaan käyttämään varsinkin silloin, jos tutkittava kappale on epähomogeeninen. Ympäristölämpötilat lasketaan kokeessa mitattujen lämpötilojen sekä pintojen emissiviteettien avulla ja niitä voidaan käyttää myös kokeen aikana vallinneiden rakenteen sisä- ja ulkopinnan pintavastusten määrittämiseen. Ympäristölämpötilojen laskennassa tarvittavat säteilyn lämmönsiirtokerroimet lämpimässä ja kylmässä kammiossa voidaan laskea kaavoilla 3.3. ja 3.4.

$$h_{r,i} = \frac{4 \cdot \sigma \cdot (0,5 \cdot (T_{si} + T_{bi}))^3}{\frac{1}{\varepsilon_{si}} + \frac{1}{\varepsilon_{bi}} - 1} \quad (3.3)$$

$$h_{r,e} = \frac{4 \cdot \sigma \cdot (0,5 \cdot (T_{se} + T_{be}))^3}{\frac{1}{\varepsilon_{se}} + \frac{1}{\varepsilon_{be}} - 1} \quad (3.4)$$

missä

$h_{r,i}$  ja  $h_{r,e}$  = Säteilyn lämmönsiirtokerroimet lämpimässä ja kylmässä kammiossa (m<sup>2</sup>K/W)

$T_{bi}$  ja  $T_{be}$  = Lämpimän ja kylmän kammion suojalevyjen pintalämpötila (°C, K)

$T_{si}$  ja  $T_{se}$  = Rakenteen pintalämpötila lämpimän ja kylmän kammion puolella (°C, K)

$\varepsilon_{si}$  ja  $\varepsilon_{se}$  = Rakenteen sisä- ja ulkopinnan emissiviteetti (-)

$\varepsilon_{bi}$  ja  $\varepsilon_{be}$  = Lämpimän ja kylmän kammion suojalevyjen pinnan emissiviteetti (-)

$\sigma$  = Stefan-Boltzmannin säteilyvakio (W/(m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>))

Kun konvektion lämmönsiirtokerroimen arvo ei ole tiedossa, standardi SFS-EN ISO 8990 (1996) määrittelee kaavat 3.5 ja 3.6 ympäristölämpötilojen laskennalle lämpimässä ja kylmässä kammiossa. Ympäristölämpötilan arvona voidaan käyttää ilman lämpötilaa, jos konvektion lämmönsiirtokerroin on paljon suurempi verrattuna säteilyn lämmönsiirtokerroimeen. Käytännössä tämä tarkoittaa koetilannetta, jossa ilmavirran nopeus rakenteen pinnalla on suurempi kuin 2 m/s. (Vinha 1998).

$$T_{n,i} = \frac{T_i \cdot \frac{\Phi_{rak}}{A_{rak}} + h_{r,i} \cdot (T_i - T_{bi}) \cdot T_{si}}{\frac{\Phi_{rak}}{A_{rak}} + h_{r,i} \cdot (T_i - T_{bi})} \quad (3.5)$$

$$T_{n,i} = \frac{T_e \cdot \frac{-\Phi_{rak}}{A_{rak}} + h_{r,e} \cdot (T_e - T_{be}) \cdot T_{se}}{\frac{-\Phi_{rak}}{A_{rak}} + h_{r,e} \cdot (T_e - T_{be})} \quad (3.6)$$

missä

$T_{n,i}$  ja  $T_{n,e}$  = Lämpimän ja kylmän kammion ympäristölämpötila (°C, K)

$T_i$  ja  $T_e$  = Lämpimän ja kylmän kammion ilman lämpötila (°C, K)

Koetilanteessa tutkittavan rakenteen sisä- ja ulkopinnan pintavastukset  $R_{si}$  ja  $R_{se}$  voidaan laskea ympäristölämpötilojen avulla kaavoilla 3.7 ja 3.8, kun tiedetään rakenteen läpi siirtyvä lämpövirta. Lämmönläpäisykokeissa pintavastusten arvot pyritään säätämään mahdollisimman lähelle standardissa SFS-EN ISO 6946 (2008) esitettyjä arvoja.

$$R_{si} = \frac{A_{rak} \cdot (T_{n,i} - T_{si})}{\Phi_{rak}} \quad (3.7)$$

$$R_{se} = \frac{A_{rak} \cdot (T_{se} - T_{n,e})}{\Phi_{rak}} \quad (3.8)$$

Calibrated hot box -menetelmällä mitattuihin U-arvoihin liittyy aina reunan kylmäsilta-vaikutuksesta aiheutuva virhe, jolla tarkoitetaan koerakenteen ja lämpimän kammion välisen rajapinnan läpi kulkevia lämpövirtoja. Reunan kylmäsilta-vaikutus lisää lämpövirtaa koerakenteen läpi, mutta sen tarkkaa suuruutta on vaikea arvioida. Reunojen kylmäsiltojen vaikutus korostuu paksuilla rakenteilla. (Vinha et al. 2013). Myös lämpötilaerolla rakenteen yli on vaikutusta kylmäsiltojen suuruuteen. Tutkimusaukon reunan hyvä lämmöneristys kuitenkin vähentää kylmäsilta-vaikutusta. (SFS-EN ISO 8990 1996)

## 3.2 Laitteiston kehitys ja rakentaminen

Yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisen tutkimuslaitteiston rakentaminen on aloitettu TTY:n rakennusfysiikan tutkimusryhmässä vuonna 2014. Laitteiston kehitystä ja rakentamista jatkettiin kesästä 2015 lähtien tutkijoiden ja rakennustekniikan laboratorion henkilökunnan kanssa. Uutta ohjausohjelmaa aloitettiin suunnittelemaan ja ohjelmoimaan vuonna 2016. Aluksi ohjelmaan luotiin lämpötilan mittaussominaisuudet sekä lämpimän kammion säätöominaisuus. Laitteisto valmistui ensimmäisiä kokeita varten marraskuussa 2016. Laitteiston ohjausohjelman kehitystä on jatkettu vuonna 2017. Tässä diplomityössä yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisesta tutkimuslaitteistosta käytetään myös lyhennettyä nimitystä laitteisto.

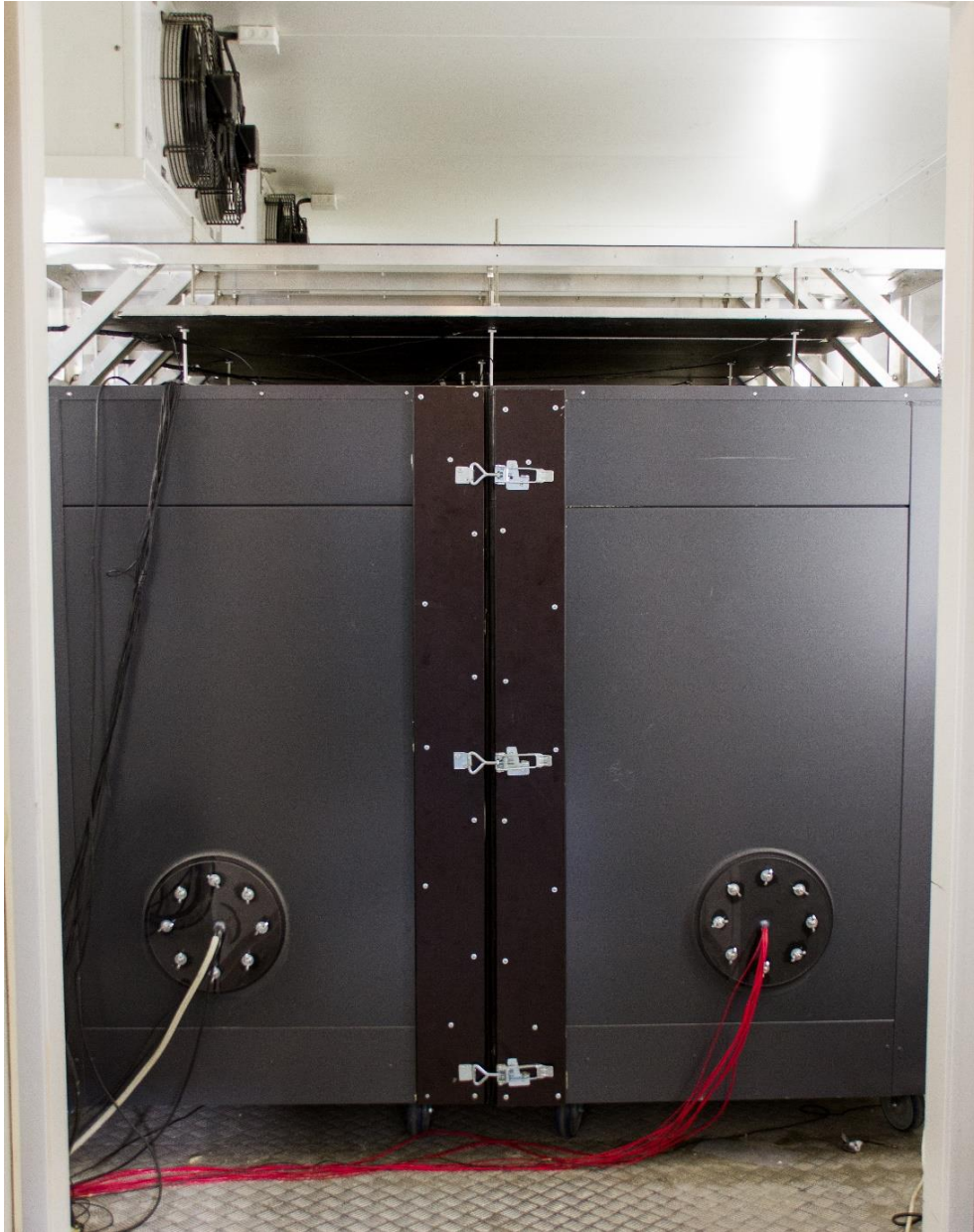
Lämmönläpäisylaitteisto on kehitetty ja rakennettu suurelta osin standardin SFS-EN ISO 8990 (1996) asettamien ohjeiden ja vaatimusten mukaan. Rakentamisessa on käytetty soveltuvilta osin ohjeita myös ikkunoiden ja ovien lämmönläpäisykokeita koskevasta standardista SFS-EN ISO 12567 (2010). TTY:llä on aiemmin rakennettu seinärakenteiden rakennusfysikaalinen tutkimuslaitteisto, jonka rakentamisesta opittuja asioita on sovellettu myös yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisen tutkimuslaitteiston rakentamisessa. Uudessa tutkimuslaitteistossa käytetään myös muun muassa seinärakenteiden rakennusfysikaaliselle laitteistolle kehitettyä lämmitystehon säätökaavaa.

Laitteiston suunnittelussa täytyi ottaa huomioon paljon käytännön asioita, jotka rajoittavat laitteiston ominaisuuksia. Yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalinen tutkimuslaitteisto suunniteltiin käytettäväksi TTY:n rakennushallin uudemmassa pakkasuoneessa, jonka mitat loivat rajoituksia laitteiston koolle. Laitteiston tutkimusaukon pinta-alasta halettiin rakentaa mahdollisimman suuri, jotta lämpötekniiset arvot ja kokeissa tapahtuvat ilmiöt voitaisiin määrittää mahdollisimman luotettavasti. Tämän takia laitteisto päädyttiin rakentamaan kahdesta osasta, jotta se mahtuisi pakkahuoneen ovista sisään. Tutkimusaukon korkeutta rajoittaa se, että tutkimusaukon reunojen päälle asetettavan suojakammion täytyy mahtua pakkahuoneen höyrystimien alle. Lisäksi kiipeäminen tutkimusaukon reunojen yli täytyy olla mahdollista A-tikkaiden avulla. Laitteiston suuren koon takia laitteiston sisällä täytyy pystyä työskentelemään, jotta kokeiden valmistelu olisi mahdollista. Laitteistoa rakennettaessa tämä on otettu huomioon ja kantavista rakenteista on tehty tarpeeksi kestäviä myös laitteiston sisällä työskentelevien ihmisten lisäpaino huomioiden.

### **3.3 Laitteiston osat**

Laitteistoon kuuluvat TTY:n rakennustekniikan rakennuslaboratoriossa sijaitseva uudempi pakkahuone, kahdesta osasta koostuva TTY:n rakennushallissa rakennettu yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalinen tutkimuslaitteisto ja siihen kuuluvat osat sekä mittausanturit, mittausdatan tiedonkeräykseen kuuluva elektroniikka ja säätölaitteet. Yläpohjarakenteiden tutkimuslaitteisto pakkahuoneen sisällä laitteiston osat kiinnitettynä toisiinsa näkyy kuvassa 3.3.

Laitteisto koostuu kylmästä ulkoilman olosuhteita jäljittelevästä kammionesta ja lämpimästä sisäilman olosuhteita mallintavasta kammionesta, joiden lämpötilat ovat säädettävissä. Kylmänä kammiona toimii pakkahuone, jonka sisälle asetetun siirrettävän kahdesta osasta koostuvan yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisen tutkimuslaitteiston alaosana toimii lämpimänä kammiona. Tutkimusaukko sijaitsee lämpimän kammion päällä.

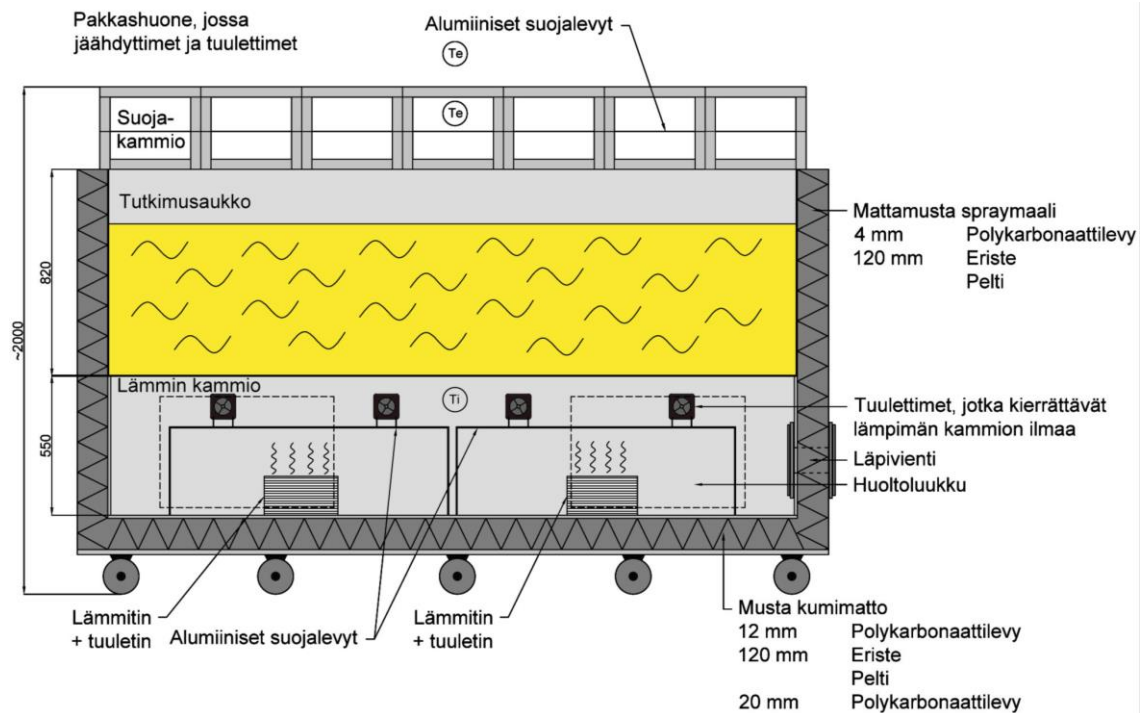


*Kuva 3.3. Yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalinen tutkimuslaitteisto pakkahuoneessa.*

Laitteistoa varten on rakennettu tietokoneella käytettävä ohjausohjelma, jonka avulla tehdään säätö- ja mittaustoimenpiteet. Pakkahuoneen lämpötilasäätö ei kuulunut ohjausohjelmaan vielä tämän diplomityön mittausten aikana. Myös suurin osa mittausdatalle tehdystä laskenta ja tarkastelutyöstä tehtiin kokeiden aikana vielä manuaalisesti Excel-tiedoston avulla. Mittaus- ja säätölaitteet sijaitsivat pääosin pakkahuoneen edessä olevassa huoneessa.

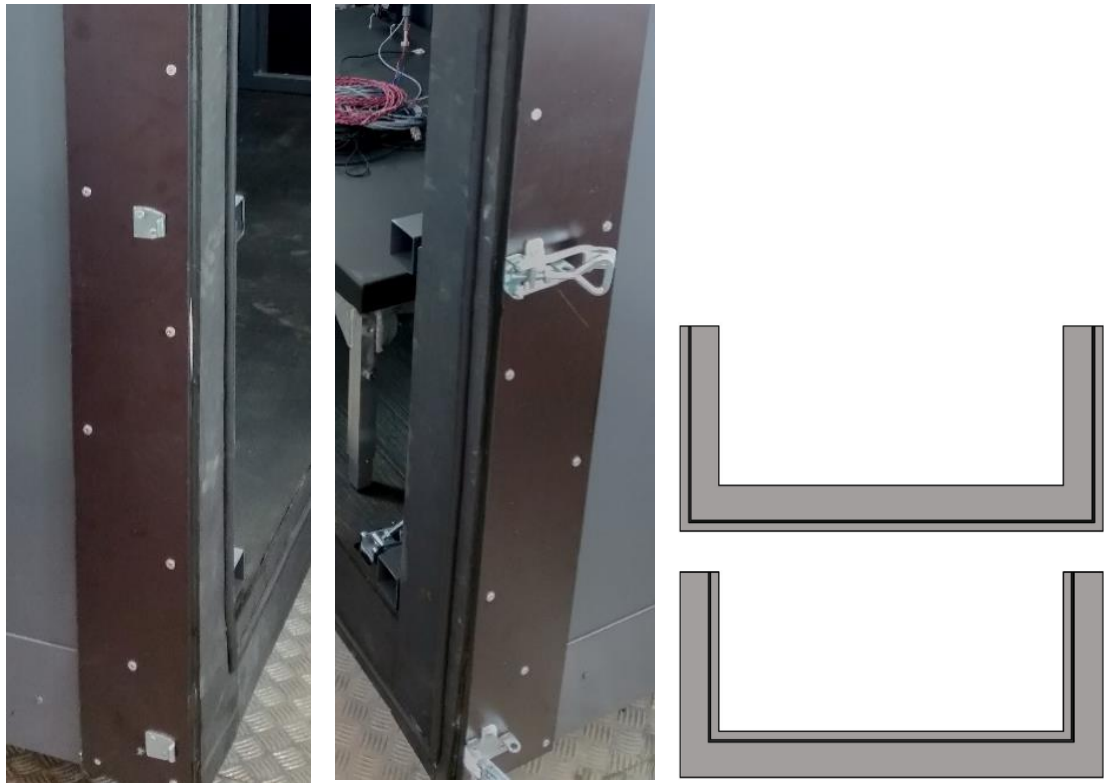
### 3.3.1 Lämmin kammio

Yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalinen tutkimuslaitteisto on rakennettu kahdesta osasta, koska tutkimusaukon pinta-ala haluttiin saada mahdollisimman suureksi lämpöteknisten arvojen ja kokeissa tapahtuvien ilmiöiden luotettavaa määrittystä varten. Yhdessä osassa laitteistoa ei olisi ollut mahdollista siirtää pois pakkahuoneesta ovien rajallisen koon takia. Molempien kammion osien alla on 10 kääntyvää ja lukittavaa pyörää. Periaatekuva laitteiston toisesta osasta on esitetty kuvassa 3.4.



**Kuva 3.4.** Yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisen tutkimuslaitteiston periaatekuva.

Mahdollisimman tiiviin liitännän mahdollistamiseksi laitteiston osien yhtymäkohdissa on käytetty 6 mm kumieristettä ja lisänä tiivistenauhaa. Osien liitäntäpinnat ja havainnollistavat kuvat tiivistenauhakaistojen sijoittumisesta on esitetty kuvassa 3.5. Laitteiston osat saadaan yhdistettyä toisiinsa kolmen sisäpuolisen ja kuuden ulkopuolisen säädettävän kiinnityssalvan avulla. Laitteiston osien ollessa kytkettynä toisiinsa, tutkimusaukon leveys on noin 1840 mm ja pituus noin 2730 mm, joten sen pinta-ala on noin 5,02 m<sup>2</sup>. Laitteiston ulkomitat ovat 2105 mm ja 3000 mm. Laitteistolla voidaan tutkia korkeintaan 800 mm paksuisia vaakarakenteita. Standardi SFS-EN ISO 12567 (2010) käsittelee ikkunoiden ja ovien mittaamista hot box -menetelmillä. Sen mukaisesti toteutetussa kokeessa koe-elementti ei saa olla mittaustuloksen luotettavuuden vuoksi pinta-alaltaan pienempi kuin 0,8 m<sup>2</sup>. Yleisen standardin SFS-EN ISO 8990 (1996) mukaan kalibroidun lämmönläpäisyylaitteiston tutkimusaukon koon tulee olla vähintään 1,5x1,5 m<sup>2</sup>, joten tämäkin arvo täyttyy yläpohjarakenteiden tutkimuslaitteistossa.



**Kuva 3.5.** Vasemmalla on esitetty valokuvat laitteiston molempien osien liityntäkohdissa käytetyistä kumieristeistä sekä tiivistenauhoista. Oikealla on esitetty tiivistenauhakaistojen sijoittuminen osien liityntäkohdissa. Toisessa osan tiivistenauhakaista kulkee kumieristeen ulkoreunassa ja toisessa osan sisäreunassa.

Laitteiston seinämät on eristetty 125 mm paksulla EPS-eristekerroksella. Eriste sisältää grafiittia ja sen eristyskyky on siten huomattavasti perinteistä EPS-eristettä parempi. RIL 255-1-2014:n (2014) mukaan eristeen lämmönjohtavuus on 0,030–0,031 W/(m·K). Laitteiston koko vaippa johtaa lämpöä pakkahuoneeseen, joten seinämien hyvä eristävyys on tärkeää. Sen avulla voidaan myös pienentää reunahäviöitä. Ulkokuorena toimii pelti, ja sisäpuoli on mattamustaksi maalattua polykarbonaattilevyä. Laitteiston seinien sisäpinnassa ei ole peltiä, jotta reunan kylmäsilta-vaikutus saataisiin pidettyä mahdollisimman pienenä. Kaikki laitteiston sisäpuoliset saumakohdat on tiivistetty mustalla silikonimasalla.

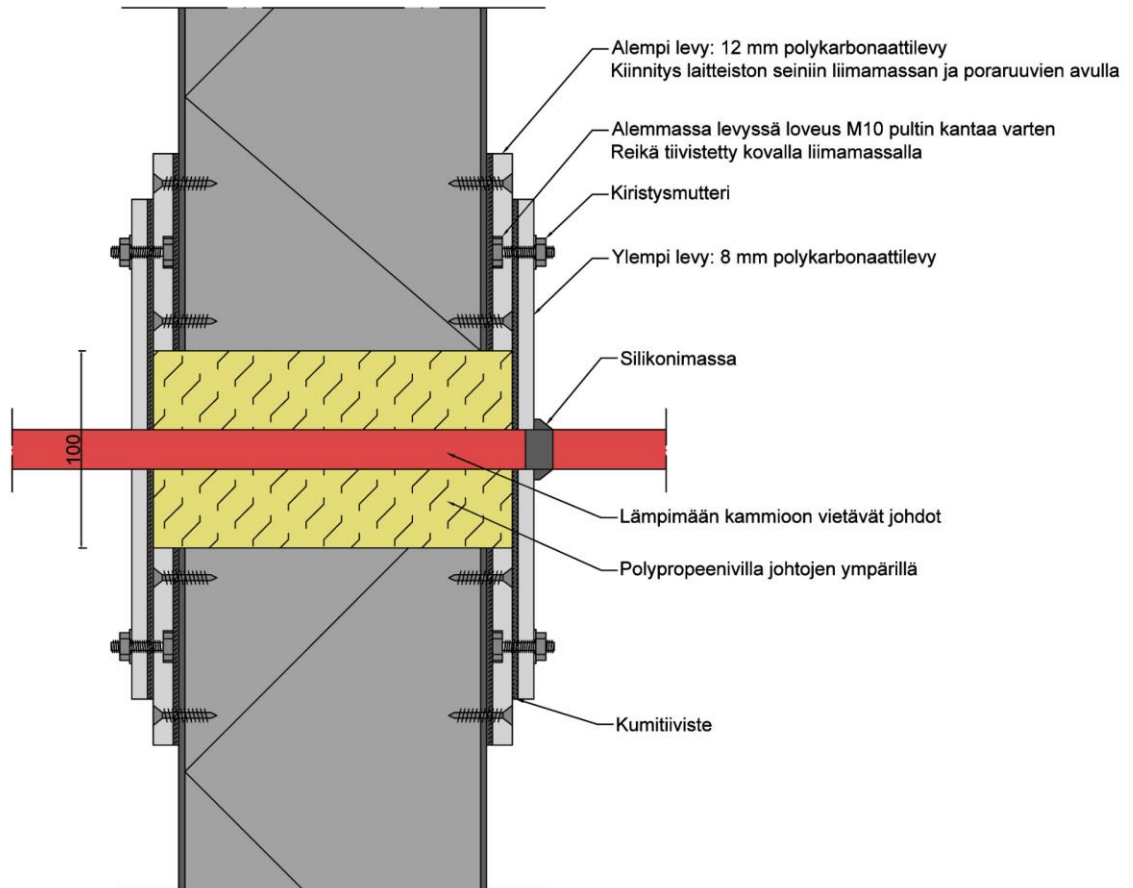
Laitteiston molemmilla puolilla on kaksi 440 mm x 690 mm kokoista huoltoaukkoa. Huoltoaukoista voidaan asentaa antureita, tehdä säätöjä ja tarkistaa, että anturit ovat paikoillaan lämpimän kammion sisällä purkamatta lämpimän kammion osia irti toisistaan. Mikäli kammion osat irrotetaan toisistaan kokeiden välissä, on laitteiston kalibrointi suoritettava aina uudestaan. Huoltoluukkujen kannet ovat alumiinilevyillä vahvistettua karbonaattilevyjä, joihin on kiinnitetty yhtä paksusti eristettä kuin seinissä. Huoltoluukut saadaan tiiviiksi niihin asennettujen tiivistenauhojen ja kiinnitysmuttereiden avulla. Luukkujen sisäpinnassa olevat akryylilevyt on maalattu mattamustiksi.

Laitteiston molemmissa osissa on antureille ja muille tarvittaville johdoille omat läpivientinsä lämpimään kammioon. Kuvassa 3.6 on esimerkki läpiviennistä laitteiston ulkopuolelta.



**Kuva 3.6.** Johtoläpivienti lämpimään kammioon.

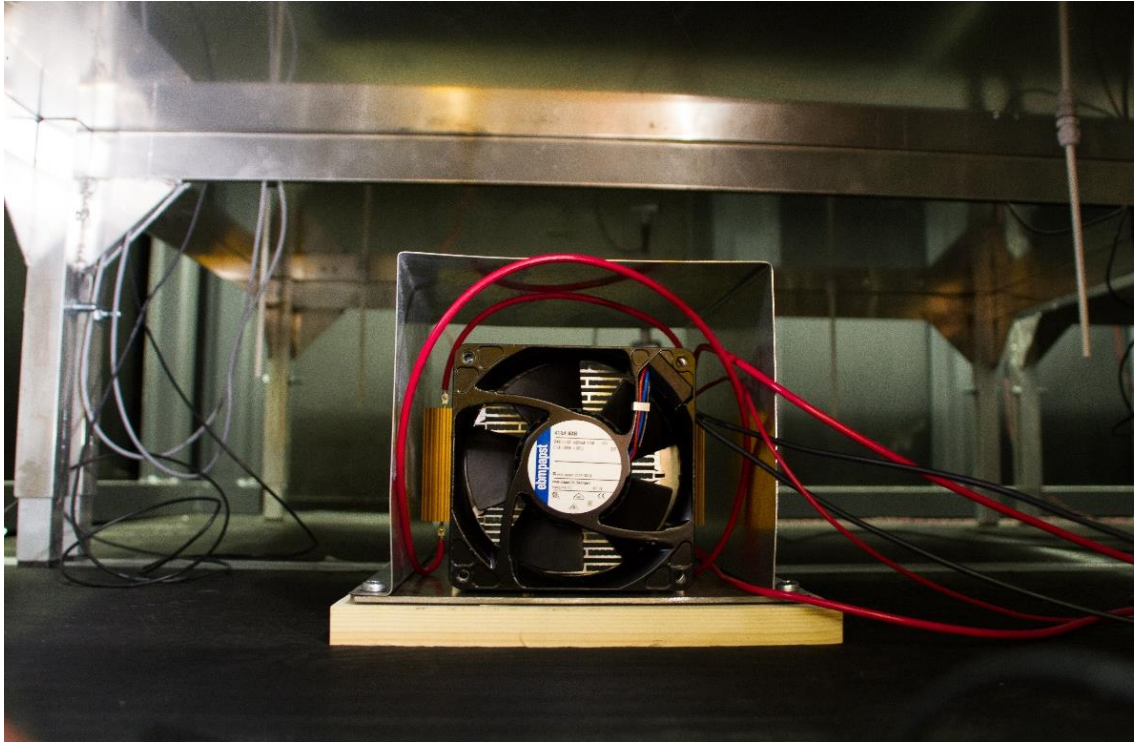
Läpivientien kohdalla laitteiston seinässä on halkaisijaltaan 100 mm reikä, joka on täytetty polypropeenivillalla ennen läpiviennin sulkemista. Läpivienti koostuu sekä ulko- että sisäpuolelta kahdesta eri paksuisesta polykarbonaattilevystä. Laitteistoa vasten kiinnitettiin 12 mm paksu polykarbonaattilevy, johon on lovettu kolot kahdeksan M10-pultin kantaa varten. Levyt kiinnitettiin laitteiston seinään liimamassan ja poraruuvien avulla. Läpivienti suljettiin 8 mm polykarbonaattilevyn avulla, joka ruuvattiin siipimuttereiden avulla kiinni pultteihin. Polykarbonaattilevyjen välissä on kumitiiviste. Johdoille tehty reikä tiivistettiin lopuksi silikonilla. Johtoläpiviennin periaate näkyy kuvassa 3.7.



**Kuva 3.7.** Lämpimän kammion seinässä olevien johtoläpivientien periaate.

Laitteiston puolikkaiden ollessa yhdistettynä lämmin kammio muodostuu laitteiston alaosaan ja rajoittuu teräskehikoiden päällä oleviin 20 mm paksuihin filmivanerilevyihin, joiden päälle tutkittava vaakarakenne asennetaan. Lämpimään kammioon saadaan luotua haluttu lämpötila sähkövastusten avulla. Sähkövastuksina käytetään neljää  $4,7 \Omega$  vastusta, jotka on jaettu kahteen lämmittimeen, joilla molemmilla on oma jäähdytys siili sekä tuuletin. Lämmitysvastuksia säädetään ohjelmoitavalla jännitelähteellä (Keithley 2260-80-13), jonka maksimiteho on 360 W. Lämmittimien ympärille on tehty metalliset päistä avoimet rasiat, jotta lämpö välittyisi tasaisemmin ympäröivään tilaan ja välttyttäisiin lämpöpöiikkien syntymiseltä lämmittimien kohdalla. Rasiat on myös eristetty laitteiston pohjasta. Toinen lämmitin lämpimässä kammiossa näkyy kuvassa 3.8. Lämpimässä kammiossa on lisäksi kahdeksan 1,6 W tuuletinta, jotka kierrättävät ilmaa kammiossa, jotta lämpö jakautuisi tasaisesti koko kammion alueelle. Tuulettimet on kiinnitetty lämpimän kammion suojalevyihin ja sijaitsevat suojalevyjen ja tutkittavan rakenteen välissä kuvan 3.9 mukaisesti.

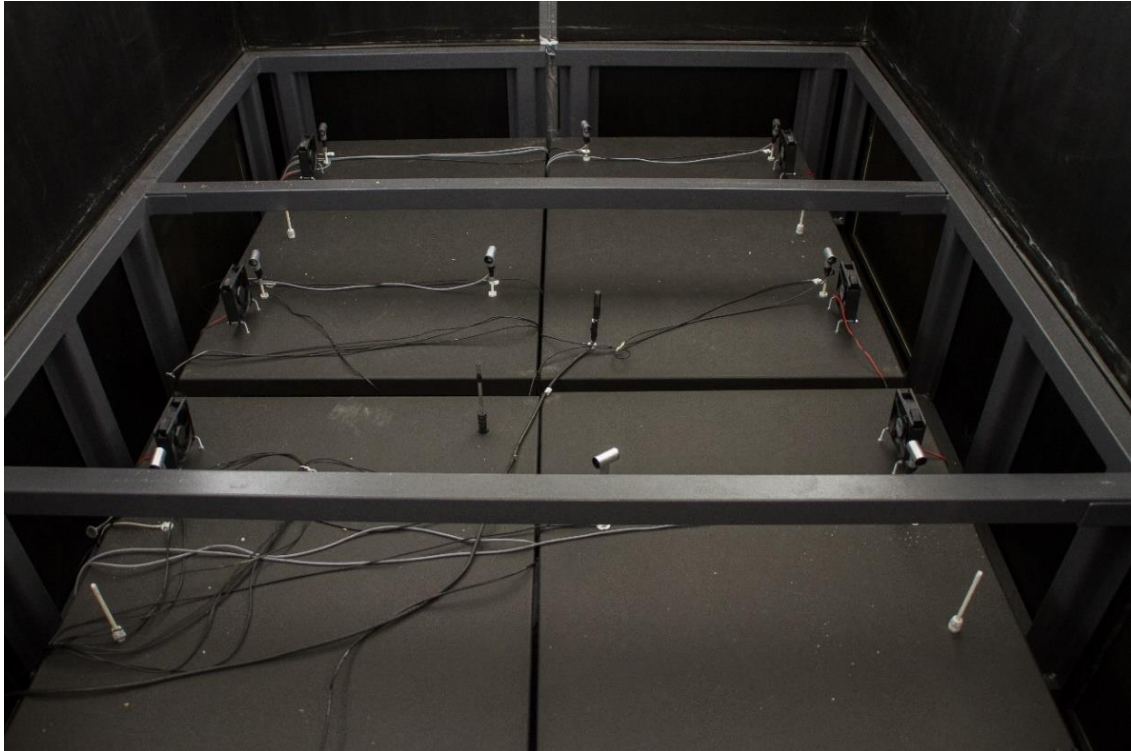




*Kuva 3.8. Lämmitin lämpimässä kammiossa suojalevyjen alla.*

Kammion sisällä on neljä 700 mm x 1100 mm kokoista alumiinista suojalevyä, joita on käytetty myös antureiden ja tuulettimien kiinnitysalustana. Suojalevyjen tehtävänä on siirtää lämpöä mahdollisimman tasaisesti koe-elementille ja estää yksittäisten lämpöpiikkien syntyminen. Materiaalina on käytetty alumiinia, jonka hyvän lämmönjohtavuuden ansiosta lämpötilaerot tasoittuvat levyissä nopeasti ja lämpö vapautuu tasaisesti koe-elementille. Lisäksi suojalevyt tasoittavat ilmanvirtausolosuhteita, jotta rakenteen pintojen lähellä virtaus olisi laminaarista. (Vinha 1998)

Suojalevyjen jalkoja on mahdollista säätää 50 mm välein, joten suojalevyjen etäisyyttä lämmintä kammiota rajaavien vanerien pintaan voidaan tarvittaessa muuttaa. Lämpimässä kammiossa olevien suojalevyjen täytyy olla vähintään 150 mm etäisyydellä vanerien pinnasta (SFS-EN ISO 12567 2010). Kammion pohjaa peittää musta kumimatto, joka kestää hyvin kulutusta ja pitää kammiossa olevat suojalevyt ja kannatinkehikot paikoillaan. Lämpimän kammion sisältö ylhäältä päin katsottuna näkyy kuvassa 3.9.



*Kuva 3.9. Lämpimän kammion sisältö ylhäältä päin katsottuna.*

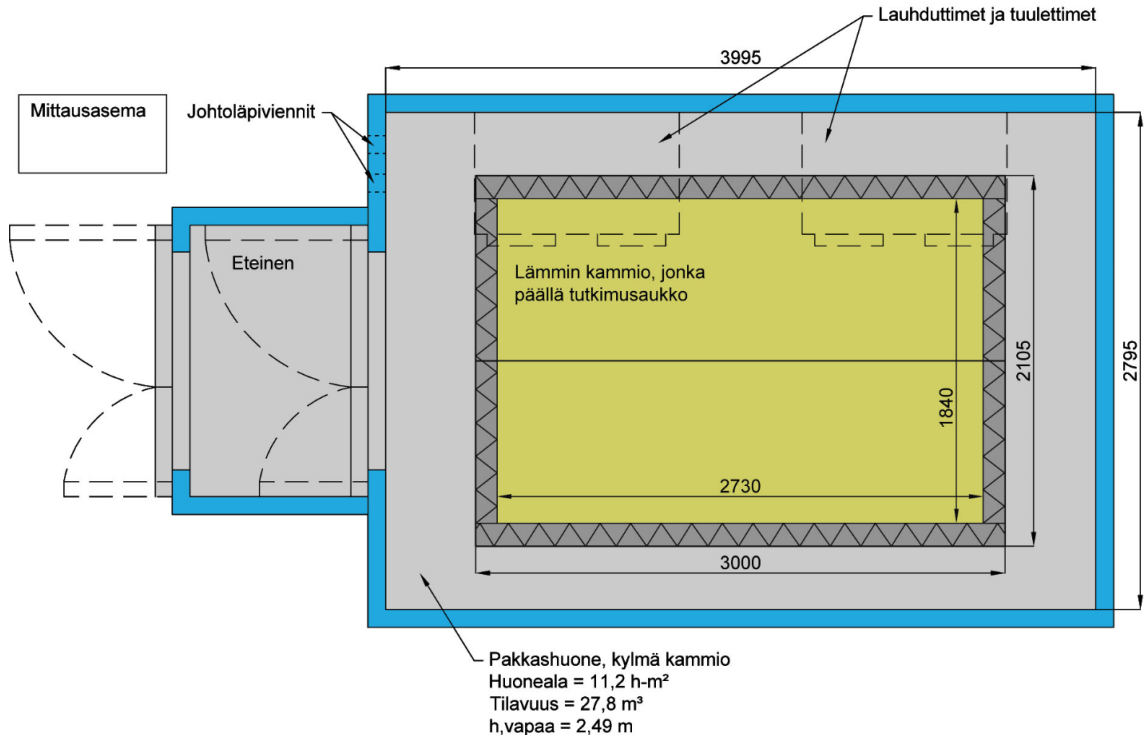
Lämpimän kammion sisäpinta, vanerilevyjen lämpimään kammioon päin olevat pinnat ja suojalevyjen yläpinnat on maalattu mattamustiksi, jotta pinnoista heijastuisi mahdollisimman vähän säteilylämpöä takaisin sisätilaan. Mattamustien pintojen avulla myös lämmön siirtyminen säteilyn avulla rakenteen pinnoilta saadaan tasaisemmaksi, ja sen mittaustarkkuus paranee. Standardi SFS-EN ISO 8990 (1996) esittää suojalevyjen pintojen emissiviteetin vähimmäisarvoksi 0,8. Mattamustan pinnan emissiviteetin ominaisarvona voidaan käyttää 0,97 (RIL 255-1-2014), joten se imee melkein kaiken siihen tulevan säteilyn ja heijastuminen on vähäistä. Suojalevyjen alapinnat jätettiin kuitenkin heijastaviksi alumiinipinnoiksi, jotta esimerkiksi lämmityslaitteista tuleva lämpösäteily ei kuumentaisi niitä tarpeettomasti.

### 3.3.2 Kylmä kammio

Kylmänä kammiona toimii Tampereen teknillisen yliopiston rakennuslaboratoriossa sijaitseva pakkahuone, jonka huoneala on noin 11,2 m<sup>2</sup> ja vapaa korkeus 2,49 m. Pakkahuoneen seinät, katto ja lattia on tehty teräsohutlevysandwich-elementeistä, joiden eristeenä on 100 mm polyuretaanieristekerros. Seinissä, katossa ja lattiassa pinnoitteena on polyesterimaali. Lattiapintana toimii 21 mm vaneri, jonka päällä on epoksipintainen muovi ja kuviovalsattu kyynellevy.

Pakkahuoneeseen johtaa kaksi pariovea, joiden väliin jää eteinen. Pariovien leveys on yhteensä 1400 mm ja korkeus 2200 mm. Myös ovien eristeenä on 100 mm polyuretaanivillakerros. Pakkahuoneeseen johtavassa ovelta on 300x200 mm<sup>2</sup> kokoinen ikkuna.

Pakkashuoneen seinien alareunassa eteisen molemmin puolin sijaitsevat johtoläpiviennit, jotka tiivistetään ennen kokeen alkua huolellisesti pehmeällä polypropeenieristeeriteellä. Kuvassa 3.10 on esitetty pakkashuoneen mitat ja lämpimän kammion sijoittuminen pakkashuoneeseen.



**Kuva 3.10.** Kylmänä kammiona toimivan pakkashuoneen pohjapiirustus ja lämpimän kammion sijoittuminen pakkashuoneeseen.

Pakkashuoneessa on kaksi tuulettimilla varustettua höyrystinyksikköä, joilla voidaan ylläpitää lämpötilaa alueella  $-20\text{ °C} \dots +20\text{ °C} \pm 0,25\text{ °C}$  tarkkuudella. Tuulettimet sekoittavat pakkashuoneen ilmaa saadakseen aikaan mahdollisimman tasaiset olosuhteet. Höyrystimien alapinnat ovat noin kahden metrin korkeudella lattiatasosta.

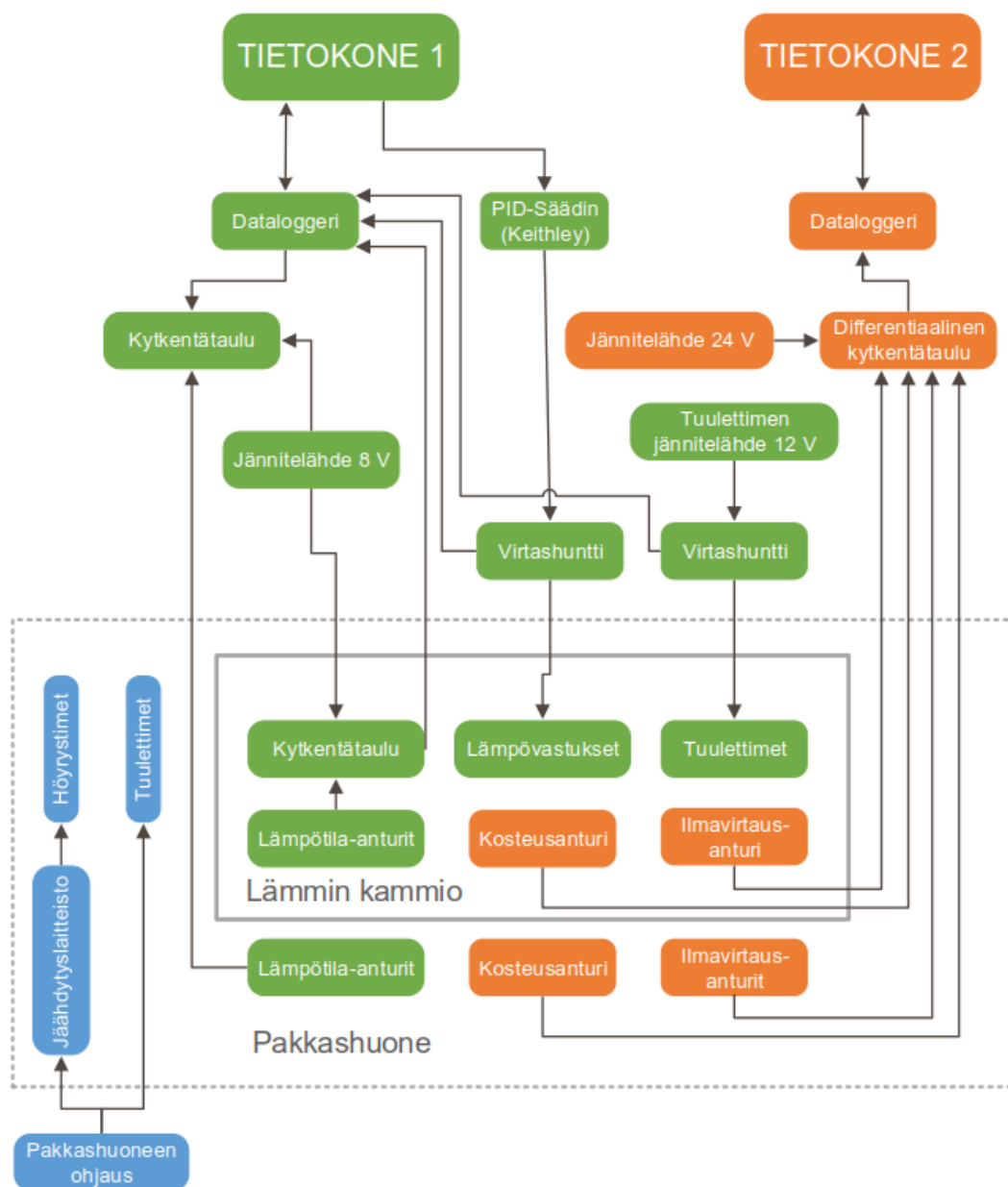
Pakkashuoneen tuulettimet luovat ilmavirtauksen pakkashuoneeseen kierrättäessään ilmaa. Mittauksen aikana laitteiston päälle asennetaan seitsemästä kappaleesta yhdistettävä alumiinirunkoinen suojakammio, joka on päällystetty läpinäkyvällä polykarbonaattilevyllä. Suojakammion päädyt voidaan pitää joko avonaisina tai sulkea. Suojakammion tehtävänä on estää pakkashuoneen tuulettimista aiheutuvan ilmavirran pääsyä suoraan tutkittavan rakenteen pinnalle ja tasoittaa mittausolosuhteita. Suojakammion sisään ja tutkittavan rakenteen pinnalle voidaan luoda kanavapuhaltimilla kokeen aikana haluttu ilmavirtaus. Lämpötilaolosuhteet suojakammion sisällä pysyvät lähes samoina kuin ympäröivässä pakkashuoneessa.

Laitteiston yläpuolella suojakammion sisällä on lämpimän kammion tavoin alumiiniset suojalevyt, jotka toimivat antureiden kiinnitysalustoina ja säteilynestosuojina sekä ilmavirtauksen tasoittajina. Suojalevyjen alapinnat eli pinnat, joka ovat tutkimusaukkoon

päin, on maalattu mattamustiksi ja yläpinnat on jätetty heijastaviksi alumiinipinnoiksi. Suojalevyjen vähimmäisetäisyys tutkimusaukon reunasta on 100 mm (SFS-EN ISO 12567 2010). Yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisessa tutkimuslaitteistossa kylmän kammion suojalevyt sijaitsevat noin 150 mm etäisyydellä tutkimusaukon reunasta.

### 3.3.3 Ohjausohjelma

Mittausjärjestelmän ohjausohjelman on toteuttanut Floun Oy vuoden 2016 aikana, ja ohjelman kehitystä on jatkettu vuonna 2017. Ohjausohjelma on ohjelmoitu National Instrumentsin LabVIEW-alustalle. Tämän diplomityön mittauksissa ohjelman avulla toteutettiin laitteiston lämpötilojen mittaustoiminnot sekä lämpöteknisten ominaisuuksien säätö. Ohjausohjelman käyttöliittymää alettiin kehittää toimivammaksi tämän työn mittauksen jälkeen. Myös kylmän kammion lämpötilojen säätömahdollisuus lisätään ohjausohjelmaan myöhemmin. Kuvassa 3.11 on esitetty yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisen tutkimuslaitteiston mittaus- ja säätölaitteiden toimintakaavio tässä diplomityössä suoritettujen mittauksen osalta.



**Kuva 3.11.** Yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisen tutkimuslaitteiston mittaus- ja säätölaitteiden toimintakaavio.

Ohjausohjelman tehtävänä on suorittaa laitteiston lämpötilojen mittaukset ja säätää lämpimään kammioon syötettävää lämmitystehoa siten, että sisäilman lämpötila tasoittuu tavoitearvoon. Ohjausohjelma suorittaa kaikkien siihen liitettyjen kanavien jännitteiden mittauksen kerran minuutissa. Lämmitystehoa säädetään mitattujen lämpötilatietojen avulla säätökaavalla 3.9.

$$P_{kok,uusi} = P_{kok,edel} + k_1(T_{tav} - T_{uusi}) + k_2(T_{edel} - T_{uusi}) \quad (3.9)$$

missä

$P_{kok,uusi}$  = uusi laskennallinen kokonaisteho (W)

$P_{kok,edel}$  = edellinen mitattu kokonaislämmitystehton keskiarvo (W)

$T_{tav}$  = tavoitelämpötila (°C)

$T_{uusi}$  = säätöantureilta mitattu uusi sisälämpötilan keskiarvo (°C)

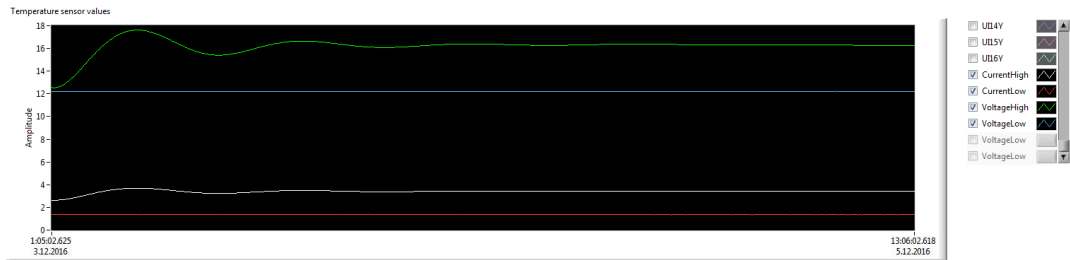
$T_{edel}$  = säätöantureilta edellisellä kerralla mitattujen lämpötilojen keskiarvo (°C)

$k_1$  ja  $k_2$  = kokeellisesti määritetyt säätökertoimet (-)

Jännitteen säätöväli oli kolme minuuttia, joten säätökaavan mukainen uusi teho syötetään lämmittimille säätövälin kolmannella minuutilla. Säätökaavaa varten tarvitaan tiedot säätövälin ensimmäisen minuutin aikana mitattujen lämpötilojen keskiarvosta ( $T_{edel}$ ) sekä uudesta mittauksen lämpötilojen keskiarvosta ( $T_{uusi}$ ). Lämpötilojen keskiarvona käytetään pelkästään säätöantureilta mitattujen lämpötilojen keskiarvoa. Laitteiston kehitysvaiheessa lämmittimistä ja johdoista mitattiin resistanssit, joiden avulla voitiin laskea oikea virtalähteen syöttöjännite. Johtojen resistanssien mittausta otettiin mukaan, jotta saataisiin säädettyä paremmin nimenomaan lämmittimen jännitettä.

Säätökaavan kertoimet  $k_1$  ja  $k_2$  ovat kokeellisesti määritettyjä arvoja, joiden avulla jännitteen säätö saadaan mahdollisimman tehokkaaksi. Kertoimella  $k_2$  pyritään ennakoimaan lämpötilan muutosta ja siten hidastamaan lämpötilojen heilahtelua. Kerroin  $k_1$  vaikuttaa tavoitelämpötilan saavuttamisen nopeuteen. Testikokeiden perustella yläpohjarakenteiden tutkimuslaitteiston mittauksissa päädyttiin käyttämään kertoimia  $k_1 = 2$  ja  $k_2 = 5$ .

Kuvassa 3.12 näkyy esimerkki ohjausohjelman kuvaajasta testikalibroinnin aikana. Kuvaajassa näkyy lämmittimille syötetty jännite vihreällä ja virta valkoisella sekä tuulettimien jännite sinisellä ja virta punaisella. Kuvaajaan voi halutessaan valita näkymään myös lämpötila-antureiden mittaustulosten kuvaajia valitsemalla halutut anturit oikealla olevasta listasta.



**Kuva 3.12.** Kuvakaappaus ohjausohjelman kuvaajasta, jossa näkyy lämmittimille ja tuulettimille syötetyt jännitteet ja virrat.

Ennen kokeen aloittamista ohjelmalle syötetään kalibroinnista saadut anturikohtaiset ker- toimet oman kalibroitiedoston avulla. Tiedostoon määritellään myös jokaiselle antu- rille tunnus, joka kuvaa anturin mittaamaa suuretta. Vaihtoehtoja ovat lämpimän ja kyl- män kammion suojalevyjen pintalämpötila-anturit, rakenteen sisä- ja ulkopinnan pinta- lämpötila-anturit, standardin mukaisilla paikoilla olevat lämpimän ja kylmän kammion ilmalämpötila-anturit sekä muut lämpimän ja kylmän kammion ilmalämpötila-anturit, joita on sijoitettu eri puolille kammioita mahdollisimman laajojen lämpötilakenttätietojen saamiseksi. Tämän lisäksi lämpimän kammion standardin SFS-EN ISO 8990 (1996) mu- kaisilla paikoilla olevista ilma-antureista valitaan anturit, joiden lämpötilatietoja käyte- tään lämpimän kammion lämmitystehon säätämiseen. Tämän diplomityön mittauksissa säätöantureina käytettiin kaikkia 12 ilmalämpötila-anturia.

Kokeen aikana mitattiin lämpötiloja tutkittavan rakenteen sisä- ja ulkopuolelta rakenteen pinnasta, ilmasta sekä suojalevyjen pinnoista. Muita ohjausohjelmalla mitattavia suureita olivat lämpimään kammioon syötetty lämmitysteho ja lämpimän kammion tuulettimien vaatima teho. Teho saatiin kertomalla mitattu jännite ja virta keskenään. Lämmitysvas- tusten ja tuulettimien virrat mitattiin virtashunteilla. Mittaukset tehtiin minuutin välein ja ohjelma tallensi mittaustulosten keskiarvot Excel-tiedostoihin tietokoneelle viiden mi- nuutin välein, joka mahdollisti tulosdatan siirtämisen mittaustietokoneelta kokeen ollessa käynnissä. Lisäksi ohjelman graafisesta käyttöliittymästä oli mahdollista seurata esimer- kiksi antureiden lämpötilaa tai lämmittimien jännitteen ja virran tasaantumista.

Lämpötilojen ja lämmitystehon lisäksi lämmönläpäisykokeissa mitattiin ilman suhteel- lista kosteutta kylmässä ja lämpimässä kammiossa ja ilmavirtauksen nopeutta rakenteen pinnoilla sekä koe-elementin tuuletusvälissä. Myös nämä mittaustulokset tallennettiin mi- nuutin välein, mutta niiden mittaamiseen ja tallentamiseen käytettiin Agilentin valmista Agilent Benchlink data logger 3 -ohjelmistoa, jota ajettiin toisella tietokoneella. Agilentin ohjelmistolla mitatut tulokset olivat tarkasteltavissa tarkemmin vasta kokeen lopettami- sen jälkeen.

Pakkashuoneen lämpötilan säätö ei tapahtunut ohjausohjelman kautta, vaan pakkashuo- neen lauhduttimille säädettiin käsin haluttu tavoitelämpötila molemmille lauhduttimille

erikseen Danfossin jäähdyttimen ohjausyksiköllä. Tällöin pakkashuoneen oma säätöjärjestelmä ja siihen kuuluvat säätöanturit pitivät tasapainotilan saavuttamisen jälkeen pakkashuoneen lämpötilan halutussa lämpötilassa  $\pm 0,25$  °C:n sisällä. Tämän takia pakkashuoneen lämpötilaa oli vaikeampi hallita.

### 3.3.4 Anturit ja säätölaitteet

Yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisessa tutkimuslaitteistossa lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja ilmavirran nopeuden mittausta tapahtui mittaustantureilla, joille annettiin vakiosyöttöjännite jännitelähteestä. Laitteistossa käytettiin puolijohdeantureita (lämpötila) sekä resistiivisiä (lämpötila) ja kapasitiivisiä antureita (suhteellinen kosteus), joiden tarkempaa toimintaa on kuvattu myöhemmin tässä luvussa. Kaikilla mittaustavoilla saadaan mitattua anturilta ulostulojännite  $U_i$ , joka muuttuu lineaarisesti mitattavan suureen funktiona. Ulostulojännite voidaan muuttaa mitattavaksi suureksi muunnoskaavan 3.10 avulla. Anturikohtaiset kertoimet  $k$  ja  $b$  saadaan joko TTY:llä tehtävän kalibroinnin (ks. luku 4.2.1) avulla tai suoraan valmistajalta. (Vinha 1998). Ennen mittauksia on tärkeää varmistaa, että kaikilla antureilla on kalibrointi voimassa.

$$u_i = kU_i + b \quad (3.10)$$

missä

$u_i$  = yksittäisen mitattavan suureen arvo

$k$  ja  $b$  = anturikohtaiset kertoimet, jotka määräytyvät anturin tai mittarin mittausalueen ja käytettävän ulostulojännitteen alueen avulla.

$U_i$  = anturilta tai mittareilta tuleva ulostulojännite (V)

Laitteistossa käytettävät lämpötila-anturit olivat National Semiconductorin LM335 puolijohdeantureita. Antureiden toiminta perustuu niissä oleviin Zener-diodeihin, joiden kynnysjännite muuttuu lineaarisesti ympäröivän lämpötilan mukaan. Kynnysjännite eli anturin ulostulojännite  $U_i$  muutetaan havaituksi lämpötilaksi muunnoskaavalla 3.10. Anturi koostui varsinaisesta puolijohdemittauspäästä, sitä ympäröivästä suojuksesta sekä liittimellä varustetusta mittausjohdosta. Lämpötila-antureiden johtojen pituudet vaihtelivat viidestä kymmeneen metriin ja niiden mittauspääät olivat erilaisia riippuen niiden käyttötarkoituksesta. Käytetyistä pinta- ja ilmalämpötila-antureista on esimerkit kuvassa 3.13. Laitteiston puolijohdeanturit toimivat 8 V tasavirtajännitteellä ja niiden mittaustarkkuus on  $\pm 0,4$  °C (ks. liite E) ja käyttöalue  $-40$  °C... $100$  °C (National Semiconductor 2008).

Pinta-antureiden alapintoihin oli kiinnitetty pyöreät hyvin lämpöä johtavat alumiinilevyt, jolloin pinnan lämpötila saatiin mitattua mahdollisimman tarkasti. Ilmalämpötila-anturit asennettiin lasikuitusauvojen päässä oleviin 3D-tulostamalla valmistettuihin lovettuihin muoviputkiin, joiden päälle asetettiin standardin SFS-EN ISO 8990 (1996) edellyttämät



säteilysuojat. Säteilysuojat suojaavat antureita suoralta lämpösäteilyltä. Säteilysuojaputken sisäpinta on maalattu mattamustaksi, jotta pinnan emissiviteetti olisi mahdollisimman suuri.



**Kuva 3.13.** Esimerkit laitteistossa käytetyistä antureista. Vasemmalta oikealle lueteltuna: Ilmalämpötila-anturi säteilysuojuksen kanssa, kiinnitystikussa oleva ilmalämpötila-anturi, jonka päältä säteilysuojus on nostettu pois, pintalämpötila-anturi, kosteusanturi kiinnitystikussa ja ilmavirtausanturi (kuumalanka-anemometri).

Laitteiston kosteusantureina käytetään Vaisalan Humicap-antureita ja HMP230-sarjan lähettimiä, joilla kosteutta mitataan kapasitiivisesti. Anturikärki koostuu hygroskooppisesta kondensaattorista, jonka kapasitanssi muuttuu suhteellisen kosteuden funktiona. Väliaineena antureissa on käytetty ohutta polymeerikalvoa, johon imeytyvät vesimolekyylit aiheuttavat kapasitanssin muutoksen. Humicap-anturi sisältää myös resistiivisesti toimivan PT100 -tyypin lämpötila-anturin. Vaisalan lähetinyksikkö sisältää oman mikropiirin, joka antaa ulos jänniteviestin, joka mitataan dataloggerilla ja muutetaan halutuksi suureeksi kaavan 3.10 avulla. PT100-antureiden mittausalue on  $-40 \dots +60$  °C tarkkuudella  $\pm 0,1$  °C. Kosteusantureiden mittaustarkkuus on suhteellisen kosteuden alueella 0–90 % RH  $\pm 2$  % RH ja 90–100 % RH alueella  $\pm 3$  % RH. Vaisalan kosteusanturit toimivat 24 V jännitteellä. (Vaisala 1998)

Kokeen aikana ilmavirran nopeutta koe-elementin tuuletusvälissä mitattiin kuumalanka-anemometrillä, jolloin saatiin varmuus siitä, että haluttu ilmavirran nopeus on synnytetty tuuletustilaan. Tutkittavan elementin pintojen lähellä ilmavirran nopeutta mitattiin myös kuumalanka-anemometreillä. Mittauksessa käytettiin TSI:n ilmavirtausantureiden mallia 8475, jolla voidaan mitata ilmavirran nopeuksia välillä 0,05–2,54 m/s. Myös TSI:n lähetinyksikön mikropiiri antaa Vaisaloiden tapaan lineaarisen jänniteviestin, joka voidaan mitata dataloggerilla ja muuttaa mitatuksi ilmavirran nopeudeksi. Ilmavirtausantureita

käytettiin 24 V jännitteellä. Kuumalanka-anemometrin mittausta perustuu lämmön siirtymisen muutoksiin sähkövirralla lämmitetyssä anturissa. Käytetyt TSI 8475 -anemometrit ovat suuntariippumattomia, eli mittaustulos kuvaa suurimman ilmavirran arvoa virtauksen tulosuunnasta riippumatta. (TSI Incorporated 2013). Kuvassa 3.13 on esitetty esimerkit myös kuumalanka-anemometrillä sekä kosteusanturilla.

Laitteistossa käytettävät lämpötila- ja kosteusanturit kalibroitiin TTY:llä. LM355-tyypin puolijohdeantureilta mitattava kynnyksjännite on verrannollinen lämpötilaan kaavan 3.11 mukaan eli 0,01 V suuruinen kynnyksjännitteen muutos tarkoittaa yhden kelvin-asteen muutosta lämpötilassa. Lämpötila-antureiden kalibrointi perustui kalibrointimittauksiin kolmessa eri lämpötilassa, joissa kalibroimattomia mittaustuloksia verrattiin referenssianturin PT100 mittaamiin lukemiin. Kaavan 3.11 kulmakertoimelle  $k$  ja vakiotermille  $b$  etsitään kalibroidut arvot sovittamalla kaavan mukainen suora lineaarisen regression avulla vastaamaan mahdollisimman hyvin referenssianturista mitattuja lukemia. Myös Vaisalan anturit on kalibroitu puolijohdeantureiden tapaan, mutta kaavan 3.11 kulmakertoimen ja vakiotermin perusarvot olivat erilaiset. Lämpötila- ja kosteusantureiden kalibroinnin toteutusta on kuvattu tarkemmin luvussa 4.2.1.

$$T_{kal} = 100 \cdot U_i - 273,15 \quad (3.11)$$

missä

$T_{kal}$  = vertailuanturilta saatava lämpötila (°C)

$U_i$  = yksittäiseltä kalibroimattomalta anturilta mitattu kynnyksjännite (V)

Kokeiden mittaukset suoritettiin kahdella tietokoneella, joihin anturit oli kytketty dataloggereiden kautta. Loggereina käytettiin nykyisen Keysightin (entinen Agilent) mallia 34972A. Dataloggereiden avulla kerättiin antureilta tulevat ulostulojännitetiedot. Kytkeä tapahtui erilaisien kytkentätaulukojen avulla. Lämpötila-anturit oli kytketty single-ended -kytkennällä varustettuihin dataloggerin multiplekserikortteihin ja Vaisalan kosteusanturit sekä TSI:n ilmavirtausanturit differentiaalisella kytkentäperiaatteella toimivaan multiplekseriin. Ohjausohjelmaan kytkettynä ollut dataloggeri keräsi myös jännite- ja virtatiedot lämmittimiltä ja tuulettimilta.

Suurin osa yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisen tutkimuslaitteiston mittaus- ja säätölaitteista sijaitsi pakkahuoneen edessä olevassa huoneessa mittausasemassa, joista vain anturit ja anturijohdot vietiin läpivientien kautta pakkahuoneeseen ja osa edelleen lämpimään kammioon. Poikkeuksena lämpimän kammion anturit, jotka kytkettiin lämpimässä kammiossa ja niiden jänniteviestitiedot tuotiin johtoläpiviennin kautta dataloggerille. Laitteiston mittausasema on esitetty kuvassa 3.14.



**Kuva 3.14.** Laitteiston mittausasema pakkashuoneen ulkopuolella.

Laitteistossa käytettiin 8 V jännitelähdettä lämpötila-antureille, 24 V jännitelähdettä kosteusantureille ja ilmapvirtausantureille sekä 12 V jännitelähdettä lämpimän kammion tuulettimille. Lämpimän kammion lämmittimille käytettiin omaa Keithleyn 2260-80-13 ohjelmoitavaa jännitelähdettä, joka toimi 0–80 V ja 0–13,5 A alueella ja sen maksimiteho oli 360 W (Tektronix 2015). Keithley jännitelähteen avulla saatiin aikaan lämpimän kammion lämmitys. Keithley oli ohjelmoitu toimimaan yhdessä ohjausohjelman kanssa niin, että se muutti lämmittimille syötettävää jännitettä ohjausohjelmalta saamiensa käskyjen mukaisesti. Lämpimän kammion lämmittimiltä ja tuulettimilta mitattiin erikseen virrat virtashunttien avulla ja mittaustulokset ohjattiin dataloggerin kautta ohjausohjelmaan. Tuuletusväliin ilmapvirran aikaansaava kanavapuhallin oli kiinnitetty omaan säädettävään jännitelähteeseen, jolla jännitettä voitiin muuttaa 0–230 V:n välillä. Säädin sijaitsi pakkashuoneen ulkopuolella mittausaseman vieressä, joten jännitettä voitiin tarvittaessa säätää myös kokeen aikana. Säätimen avulla saatiin luotua haluttu ilmapvirran nopeus koelementin tuuletusväliin.

### 3.4 Lämpimän kammion kalibrointi

Lämpimän kammion kalibrointi suoritetaan samalla periaatteella kuin varsinainen lämmönläpäisykoe. Kalibroinnissa tutkimusaukkoon asennetaan mahdollisimman homogeeninen yhdestä umpisoluisesta lämmöneristeestä koostuva kalibrointielementti tutkittavan rakenteen sijaan. Kalibrointielementin materiaalilla tulee olla tarkasti tunnettu lämmönjohtavuus, joka mitataan kyseisestä materiaalista lämpövirtalevyllä. Myös lämpimän kammion päällä olevien vanereiden lämmönjohtavuus tulee määrittää.

Kun materiaalien lämmönjohtavuudet tunnetaan, lasketaan niiden avulla kalibrointielementille lämmönvastus, jonka avulla saadaan selville, kuinka suuri osa lämpimään kammiin syötetystä lämpövirrasta siirtyy kylmään kammiin kalibrointielementin läpi ja kuinka suuri osa lämpimän kammion vaipan alueelta. Tutkimusaukon kohdalla olevat filmivanerit tulee myös ottaa mukaan kalibrointielementin lämmönvastukseen, koska ne eivät kuulu tutkittavaan rakenteeseen. Niiden lämmönvastus on kuitenkin koko rakenteen lämmönvastukseen verrattuna hyvin pieni.

Yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisen tutkimuslaitteiston kalibrointi täytyy suorittaa useista paloista koostuvalla kalibrointielementillä, koska tutkimusaukko on niin suuri, että yhtä tutkimusaukon kokoista kalibrointielementtiä ei kyetä nostamaan laitteistoon pakkashuoneen pienestä oviaukosta johtuen. Kalibrointieristeinä voidaan käyttää esimerkiksi EPS- tai XPS-eristettä, sillä niitä on helppo käsitellä tarpeeksi suuren jäykkyyden takia, ja eristeestä leikatusta kappaleesta saadaan tarkasti määritettyä lämmönjohtavuus. Kyseiset eristeet ovat myös tarpeeksi homogeenisia ja umpisoluisia. Lopullisen paloista koostuvan kalibrointielementin tulisi olla mahdollisimman tiivis. Näin ollen yläpohjalaitteiston kalibroinnissa käytetään puolipontattuja eristelevyjä ja kerrokset asetetaan limitäin siten, että eristekappaleiden saumat eivät osu samoille kohdille päällekkäisissä kerroksissa. Saumakohtien teippaus parantaa tiiviyttä. Kalibrointielementin ja tutkimusaukon väleihin jäävä asennusvara täytetään lämpöä eristävällä polypropeenivillalla ja tiivistetään teipillä.

Kalibrointi tulee suorittaa mahdollisimman tarkasti tutkittavan rakenteen kokoisella kalibrointielementillä. Mikäli tutkittavan rakenteen paksuus tai leveys muuttuu, täytyy kalibrointi suorittaa uudelleen, sillä tutkittavan rakenteen koko vaikuttaa oleellisesti lämpimän kammion häviölämpövirran arvoon (Vinha 2013). Jos kammion osat irrotetaan toisistaan kokeiden välissä, on laitteiston kalibrointi suoritettava aina uudestaan. Mikäli tutkittava koe-elementti ei ole yhtä leveä tai pitkä kuin tutkimusaukko, täytyy sen ympärille rakentaa eristereunus, joka on mukana myös kalibroinnin aikana. Tämän tutkimuksen kalibroinnin suoritus on kuvattu tarkemmin luvussa 4.2.2.

Kalibrointielementin läpi siirtyvä lämpövirta saadaan laskettua kaavalla 3.12. Laskennassa käytetään lämpövirtalevyllä kyseisestä kalibrointieristeestä mitattua lämmönjohtavuuden arvoa. (Vinha 1998; Vinha et al. 2013)

$$\Phi_{kal} = \Delta T \cdot A_{kal} \cdot \frac{\lambda_{kal}}{d_{kal}} \quad (3.12)$$

missä

$\Phi_{kal}$  = kalibroinnissa käytetyn rakenteen läpäisemä lämpövirta (W)

$\Delta T$  = lämpötilaero kalibrointielementin pintojen välillä (K)

$A_{kal}$  = Kalibrointielementin pinta-ala (m<sup>2</sup>)

$\lambda_{kal}$  = mitattu kalibrointielementin lämmönjohtavuus (W/(m·K))

$d_{kal}$  = kalibrointielementin paksuus (m)

Laitteiston häviölämpövirralla tarkoitetaan sitä osaa lämmitykseen käytetystä tehosta, joka kuluu, kun lämpöenergia siirtyy lämpimän kammion kaikkien muiden osien paitsi koerakenteen tai kalibrointielementin läpi. Häviölämpövirtaan sisältyy myös reunahäviö, joka tarkoittaa tutkimusaukon reuna-alueiden tehollisen lämmöneristyspaksuuden muuttumista elementin paksuuden muuttuessa. Kun kalibrointielementin paksuus pienenee, kammion läpi siirtyvä lämpövirta kasvaa tutkimusaukon reunan kautta siirtyvän lämpövirran lisääntyessä. Häviölämpövirta voidaan laskea kaavalla 3.13 vähentämällä kalibrointikokeen kokonaislämmitystehosta laskennallisesti määritetty kalibrointielementin läpi kulkeva lämpövirta.

$$\Phi_h = P_{kok, kal} - \Phi_{kal} \quad (3.13)$$

missä

$\Phi_h$  = lämpimän kammion häviölämpövirta (W)

$P_{kok, kal}$  = lämpimään kammioon kalibroinnin aikana syötetty kokonaislämmitysteho (W)

$\Phi_{kal}$  = kalibroinnissa käytetyn rakenteen läpäisemä lämpövirta (W)

Lämpimään kammioon lämmittimille syötetty teho saadaan sähkövastuspiiristä mitatun jännitteen ja sähkövirran tulona. Samoin mitataan myös lämpimässä kammiossa käytettävien tuulettimien vaatima teho. Lämpimään kammioon syötetty kokonaisteho saadaan näiden kahden summana. Todellisuudessa myös lämpimässä kammiossa olevat mittausanturit tuottavat tilaan hieman lämmitystehoa. Tämä lisäteho on kuitenkin häviävän pieni. Samat anturit ovat käytössä sekä kalibrointikokeessa että varsinaisessa kokeessa, joten mittausantureiden tuomaa tehollisää ei oteta laskennassa huomioon. (Vinha 2013)

## 4. KOKEIDEN SUORITTAMINEN

Ennen varsinaisten mittausten aloittamista kokeet suunniteltiin huolellisesti ja selvitettiin tarvittavat lähtötiedot kokeiden suorittamiseen. Myös tutkimuslaitteisto valmistettiin toimintakuntoon. Suunnittelun jälkeen elementtivalmistajalle toimitettiin tarkat tiedot testattavan koe-elementin toteutusperiaatteista, sallituista mitoista ja vaatimuksista, joiden perusteella tilaaja laati koe-elementin elementtikuvat ja valmisti elementin. Matalampi koe-elementti toimitettiin TTY:n rakennushalliin 9.9.2016. Elementin toimituksen yhteydessä toimitettiin myös koe-elementin korottamiseen tarvittavat rivat sekä paksumpaan koe-elementtiin vaihdettava mineraalivillakerros. Lisäksi ylimääräisestä mineraalivillasta leikattiin kappaleet lämmönjohtavuusmittauksia varten. Varsinaisten kokeiden alkaessa rakennushallin henkilökunta auttoi nostamaan koe-elementin laitteistoon.

Syksyn 2016 aikana yläpohjarakenteiden rakennusfysikaaliseen tutkimuslaitteistoon tehtiin viimeisiä muokkauksia, ja laitteistoon rakennettiin lisäosa, jolla saatiin haluttu ilmavirtaus toteutettua tasaisesti tutkittavan koe-elementin tuuletusväliin. Myös kalibrointielementin osat leikattiin ja valmisteltiin koetta varten.

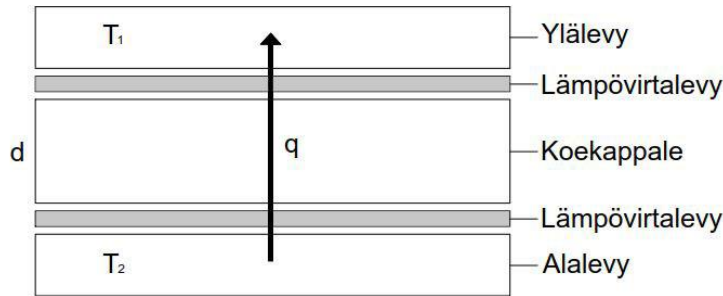
Ensimmäiset testikokeet laitteistolla aloitettiin marraskuussa 2016. Mittauksen suorittamiseen kuluva aika riippuu suurelta osin systeemin kyvystä saavuttaa tasapainotila valitsevilla lämpötila- ja kosteusolosuhteissa. Tehtyjen kokeiden perusteella yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisen tutkimuslaitteiston säätöjärjestelmä kykeni saavuttamaan tasapainotilan noin kolmen vuorokauden kuluessa sekä kalibroinnissa että varsinaisissa kokeissa. Tasapainotilan saavuttamista on käsitelty tarkemmin luvussa 5.2. Liitteessä B on esitetty kuvia laitteistosta ja kokeiden valmistelusta.

### 4.1 Materiaalikokeet

Tutkimuksessa käytetyistä materiaaleista mitattiin lämmönjohtavuudet TTY:n rakennushallissa lämpövirtalevylaitteella, jotta saataisiin selville mahdollisimman hyvin todellisuutta vastaavat lämmönjohtavuudet tarkkaa laskennallista U-arvon määrittystä varten. Lämmönjohtavuuden määrittäminen tapahtui LaserComp FOX304 lämpövirtalevylaitteella standardien ISO 8301 (1991) ja ASTM C518-04 (2004) mukaisesti.

#### 4.1.1 Lämmönjohtavuuden mittaaminen ja mittauslaitteisto

LaserComp FOX304 lämpövirtalevylaitteen lisäksi lämpövirran mittaussysteemiin kuuluu jäädytinskykky sekä tietokone, jolla ohjataan mittausprosessia. Laitteessa on ylä- ja alalevyn lisäksi kaksi lämpövirtalevyä, joiden väliin tutkittava kappale asetetaan kuvan 4.1 mukaisesti.



**Kuva 4.1.** Lämpövirtalevylaitteen rakenneperiaate.

Lämmönjohtavuuskokeessa ylä- ja alalevylle asetetaan halutut lämpötilat, jotta saadaan aikaan lämpövirta levyjen välille tutkittavan kappaleen läpi. Alalevyn maksimilämpötila on  $+75\text{ °C}$  ja ylälevyn minimilämpötila  $-20\text{ °C}$ . Laitteen mitta-alue asettuu välille  $0,005\text{--}0,2\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Laitevalmistajan ilmoittama mittaustarkkuus on  $\pm 1\%$ , jolloin myös kalibrointiepävarmuus otettuna huomioon laitteen absoluuttinen tarkkuus on  $\pm 3\%$ . Kokeen toistettavuustarkkuudeksi on ilmoitettu  $0,2\%$  ja kokeen uusimistarkkuudeksi  $0,5\%$ . Kokeessa koekappaleen maksimisivumitat ovat  $305\text{ mm}$  molempiin suuntiin ja korkein sallittu paksuus on  $102\text{ mm}$ . (LaserComp 1999–2009)

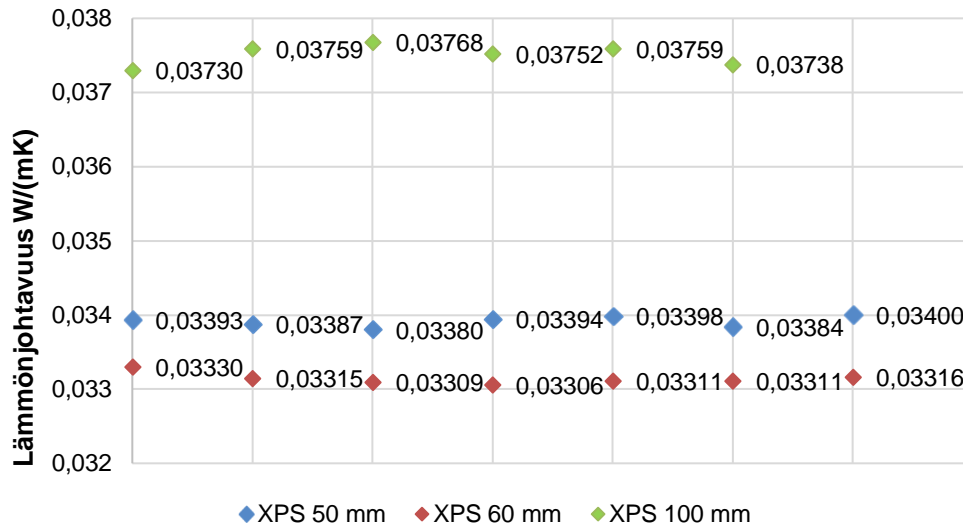
Lämpövirtalevylaitteella mitatussa lämmönjohtavuudessa on mukana kaikki lämmön siirtymismuodot materiaalissa. Mittauksessa asetetaan koekappaleen pintojen välille lämpötilaero, jolloin voidaan mitata siitä aiheutuva lämpövirran tiheys koekappaleen läpi (RIL 255-1-2014), jonka avulla saadaan selville luvussa 2.1 esitetyillä kaavoilla materiaalin lämmönjohtavuus. Materiaalin tiheyden ollessa pienempi lämmönjohtavuudessa korostuu säteilyn ja konvektion vaikutus, kun taas tiheimmissä materiaaleissa johtumisen osuus tulee merkittävämmäksi.

#### 4.1.2 Materiaalien lämmönjohtavuudet

Lämpövirtalevylaitteella säädettiin tutkittavan materiaalin keskimääräinen lämpötila mittauksen ajaksi vastaamaan samaa keskimääräistä lämpötilaa kuin U-arvokokeissa. Ylemmän levyn lämpötilaksi asetettiin  $0\text{ °C}$  ja alemman levyn lämpötilaksi  $20\text{ °C}$ , jolloin keskimääräisenä lämpötilana kokeissa oli  $10\pm 0,02\text{ °C}$ . Kalibrointitiedostona kokeissa käytettiin eurooppalaisen standardin ISO 8301 (1991) mukaista IRMM-PTS -kalibrointitiedostoa (Institute for Reference Materials and Measurements), jossa kalibrointi on suoritettu  $-10\text{...}+50\text{ °C}$  lämpötila-alueelle.

Lämmönjohtavuuden määrittämiseen tarvitaan vähintään kolmen koekappaleen keskiarvo. Tutkimuksen materiaaleille tehdyissä kokeissa lämmönjohtavuus määritettiin seitsemän kappaleen keskiarvona  $50\text{ mm}$  XPS-eristeelle ja  $60\text{ mm}$  XPS-eristeelle, kuuden kappaleen keskiarvona  $100\text{ mm}$  XPS-eristeelle sekä neljän kappaleen keskiarvona  $20\text{ mm}$

vesivanerille ja kattoelementissä käytetylle mineraalivillalle, jonka paksuus oli mitattaessa 100 mm. Kaikkien koekappaleiden koot olivat  $300 \times 300 \text{ mm}^2 \pm 1 \text{ mm}$ . Kalibrointielementissä käytettyjen eri paksuisten XPS-eristeiden lämmönjohtavuusmittausten yksittäiset toisistaan riippumattomat tulokset on esitetty kuvassa 4.2. XPS-eristeiden tiheydeksi saatiin  $32\text{--}33 \text{ kg/m}^3$ .



*Kuva 4.2. XPS-eristeiden yksittäiset lämmönjohtavuusmittaustulokset.*

Laskennassa käytetyt lämmönjohtavuusmittausten keskiarvot on esitetty taulukossa 4.1. Manelius ja Pirinen (2011) ovat määrittäneet kattoelementin rakenteissa käytetyn kerto-puun (LVL) lämmönjohtavuuden jo aiemmin Tampereen teknillisellä yliopistolla, joten sitä ei mitattu uudelleen. Tutkimusraportin mukaan Kerto-Q:n arvoksi saatiin 50 % RH:ssa  $0,148 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$  ja Kerto-S:n arvoksi syrjällä  $0,111 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ . XPS-eristeille ja vanerille määritettyjä lämmönjohtavuuksia käytettiin laskettaessa kalibrointielementin lämmönvastusta. Muita mitattuja arvoja käytettiin liitteen D laskelmissa laskettaessa koeelementin sekä oikean kattoelementin U-arvo Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C4 (2012) mukaisilla laskentamenetelmillä.

*Taulukko 4.1. Lämmönjohtavuusmittausten tulokset tutkittujen kappaleiden tulosten keskiarvona.*

Materiaali	Tutkittujen kappaleiden määrä (kpl)	Tiheys ( $\text{kg/m}^3$ )	Paksuus (mm)	Lämmönjohtavuus $\lambda_{10}$ ( $\text{W/(m} \cdot \text{K)}$ )
XPS 50 mm	7	32	50	0,034
XPS 60 mm	7	33	60	0,033
XPS 100 mm	6	33	100	0,038
Filmivaneri	4	682	20	0,13
Mineraalivilla	4	14	100	0,037



Mikäli materiaalin kosteuspitoisuus on suuri, sillä voi olla vaikutusta materiaalin lämmönjohtavuuteen (RIL 255-1-2014). Koekappaleiden säilytyksessä sekä kokeessa materiaalien kosteuspitoisuus pysyi kuitenkin alhaisena, joten sen vaikutusta materiaalien lämmönjohtavuuteen ei ole tarkasteltu tämän tutkimuksen yhteydessä.

XPS-eristeiden tarkka lämmönjohtavuuden määrittäminen on tärkeää, jotta kalibrointielementille laskettava lämmönvastus olisi mahdollisimman tarkka. XPS-eristeen solurakenne on täysin umpinainen ja valmistuksessa sen pinnalle syntyy yhtenäinen polystyreenikerros, joka hylkii vettä (Finnfoam 2017). Esimerkiksi RIL:in (RIL 255-1-2014) esittämästä XPS-eristeen tasapainokosteuskäyrästä nähdään, että sen kosteuspitoisuus pysyy alle  $0,20 \text{ kg/m}^3$  80 % RH suhteellisen kosteuden saavuttamiseen asti. Tämän jälkeen se alkaa nousta jyrkemmin saavuttaen suurimman kosteuspitoisuuden arvonsa  $0,92 \text{ kg/m}^3$  suhteellisen kosteuden ollessa 98 % RH, mikä vastaa hygroskooppista kyllästyskosteutta. Esimerkiksi havuvanerin kosteuspitoisuus 97 % RH suhteellisessa kosteudessa on  $126 \text{ kg/m}^3$  (RIL 255-1-2014). Tästä voidaan päätellä, että kosteudella ei ole merkittävää vaikutusta XPS-eristeiden lämmönjohtavuustuloksiin.

## 4.2 Lämmönläpäisykokeiden valmistelu

Ennen kokeiden aloittamista yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalinen tutkimuslaitteisto ja siinä käytettävät anturit täytyy kalibroida. Tätä tutkimusta varten täytyi kalibrointielementtien lisäksi valmistaa elementin ympärille eristereunus, jota käytettiin sekä kalibroinnissa että varsinaisissa U-arvomittauksissa. Lisäksi rakennettiin tasaisen halutun ilmavirtauksen toteuttamiseksi lisäosa, jonka toimivuus tarkistettiin ennen kokeiden alkua. Ennen koe-elementin laitteistoon asettamista sen mitat tarkistettiin ja suunniteltiin koe-elementin laitteistoon nostaminen. Nostaminen täytyi hoitaa laboratoriohenkilökunnan toimesta, koska rakennushallin nosturi ei ylety pakkahuoneeseen.

### 4.2.1 Lämpötila- ja kosteusantureiden kalibrointi

Ennen suoritettavia lämmönläpäisykokeita täytyi varmistaa, että kaikissa kokeissa käytettävissä antureissa ja mittalaitteissa oli kalibrointi voimassa. Kokeissa käytetyt lämpötila- ja kosteusanturit kalibroitiin TTY:n rakennushallissa. Ilmavirtausantureiden tehdaskalibrointi oli voimassa, koska anturit olivat uusia.

Kokeessa käytetyt lämpötila-anturit olivat puolijohdeantureita. Anturit on kalibroitu TTY:n rakennushallin kalibrointihuoneessa Karl Weiss:n kalibrointikaapissa. Kalibrointimittauksen tulokset tallennettiin Agilent Benchlink data logger 3 -ohjelmiston avulla. Kalibrointiastia antureineen asennettiin kaappiin ja kalibrointi suoritettiin kolmessa eri lämpötilassa ( $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  ja  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) käyttäen vertailulämpötilana PT100-anturin lämpötilaa, jonka resistanssiarvo on  $100 \text{ } \Omega$   $0 \text{ }^\circ\text{C}$ :ssa (RIL 2014). Astian sisällä antureiden mitatapää eroteltiin toisistaan ja antureiden johdoista kiinnityspalojen avulla. Kuvassa 4.3 näkyy kalibrointiastia kalibrointikaapissa.

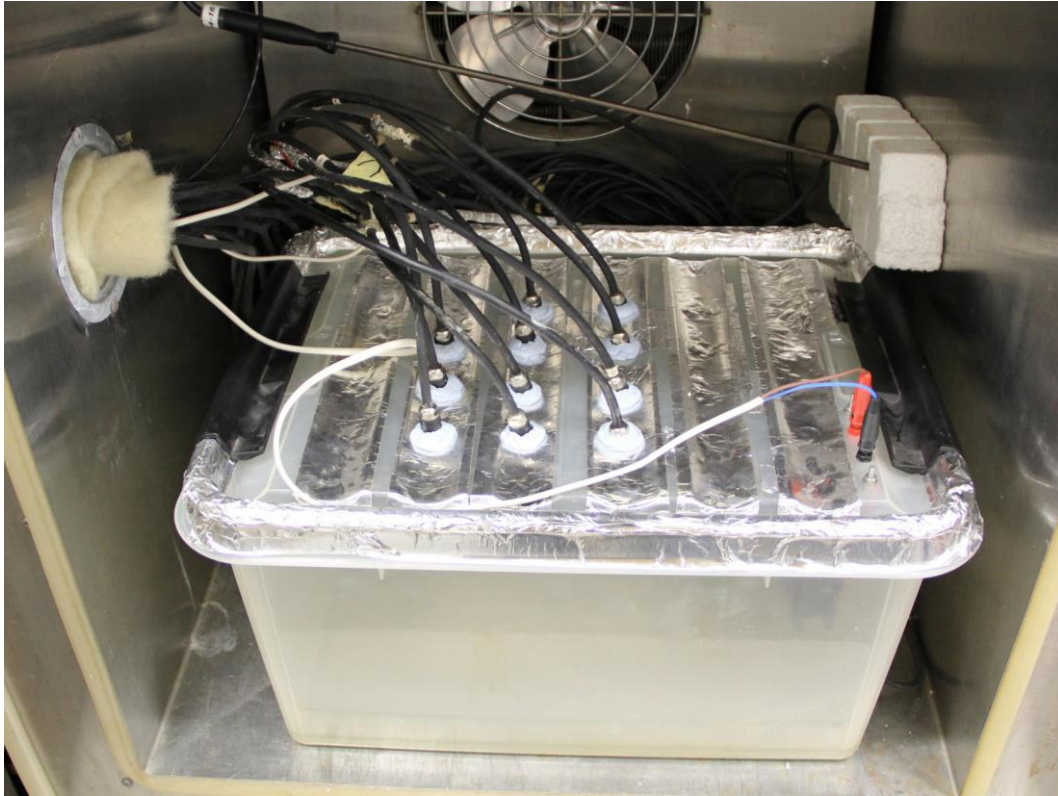


*Kuva 4.3. Lämpötila-antureiden kalibrointiastia kalibrointikaapissa.*

Lämpötila-antureiden kalibroinnissa olosuhteiden annettiin tasaantua haluttuun lämpötilaan noin 3–5 tuntia lämpötilasta riippuen, jonka jälkeen mitatut arvot tallennettiin stationääritilassa olevasta mittaussysteemistä 10 minuutin ajalta. Excel-laskentataulukon avulla mittaustuloksista määritettiin lämpötilan ja ulostulojännitteen väliselle lineaariselle funktiolle anturikohtaiset kerroin- ja vakiotermit, joista on kerrottu tarkemmin luvussa 3.3.4. Kalibroimattomilla puolijohdeantureilla muunnoskertoimien peruskertoimia käytetään  $k = 100$  ja  $b = -273,15$ . Näitä kertoimia käytettäessä arvot saattavat poiketa kuitenkin jopa  $\pm 4$  °C. Kalibroinnilla virhemarginaaliksi saadaan  $\pm 0,4$  °C. Kertoimet syötettiin antureille ohjausohjelmaan tiedoston avulla. Liitteessä A on esitetty kokeessa käytettyjen antureiden kertoimet.

Kalibrointiastian sisälle pyrittiin kalibroinnissa saamaan aikaan mahdollisimman tasaiset olosuhteet, minkä takia sekä lämpötila- että kosteusantureiden kalibrointiastioissa oli sisällä tuulettimet, jotka kierrättivät ilmaa ja siten tasoittivat olosuhteita astian sisällä. Kalibroinnissa oli otettava huomioon, että on tärkeä pujottaa tarpeeksi antureiden johtoja kalibrointikaapin sisään, jotta johtojen kautta kulkeva lämpö ei vaikuttaisi antureiden lämpötilaan. Yleensä noin kaksi metriä on riittävä johdon pituus kalibrointikaapin sisällä.

Kosteusanturit kalibrointiin kolmen eri suhteellisen kosteuden muodostavan kylläisen suolaliuoksen avulla kalibrointilaatikossa, johon antureille oli porattu reiät. Antureiden asentamisen jälkeen reiät tiivistettiin sinitarran avulla ja laatikon kansi alumiiniteipillä. Myös kosteusantureiden kalibrointi tapahtui Karl Weiss:n kalibrointikaapissa kuvan 4.4 mukaisesti.



**Kuva 4.4.** Kosteusantureiden kalibrointiastia kalibrointikaapissa.

Kylläiset suolaliuokset muodostavat niille tyypillisen suhteellisen kosteuden ympäröivään ilmatilaan tietyssä lämpötilassa. Suolaliuoksina käytettiin 20 °C:ssa 33,1 % RH magnesiumkloridiliuosta ( $\text{MgCl}_2, 6\text{H}_2\text{O}$ ), 58,2 % RH Natriumbromidiliuosta ( $\text{NaBr}$ ) ja 85,1 % RH kaliumkloridiliuosta ( $\text{KCl}$ ). Lisäksi Vaisalan kosteusantureissa olevat PT100-lämpötila-anturit kalibroitiin puolijohdelämpötila-antureiden tapaan lämpötiloissa  $-20$  °C,  $0$  °C ja  $20$  °C, jolloin muunnoskertoimien perusarvoina käytettiin  $k = 12$  ja  $b = -40$ .

Lämpötila- ja kosteusantureiden kalibroinnin jälkeen suoritetaan aina tarkistusmittaus, jossa antureille syötetään kalibroinnilla saadut kertoimet mittausohjelmaan ja suoritetaan uudelleen lämpötilojen ja suhteellisten kosteuksien mittaus. Järjestelyllä varmistetaan kalibroinnin onnistuminen. Mitattujen lämpötilojen sallittu poikkeama vertailulämpötilasta on  $\pm 0,1$  °C. Kosteusantureiden mittaustarkkuus tulisi olla  $\pm 2$  % RH sisällä.

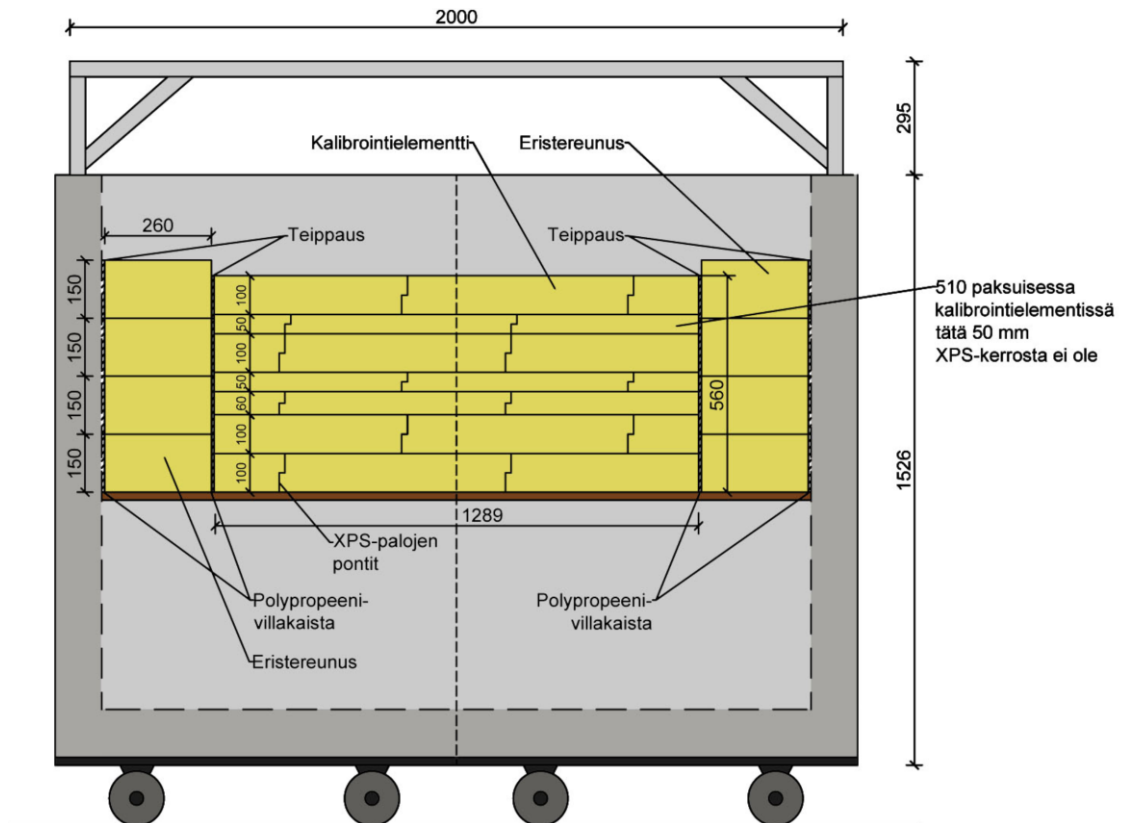
## 4.2.2 Laitteiston kalibrointi

Calibrated hot box -menetelmässä laitteisto tulee olla kalibroitu homogeenisellä rakennekerroksella, jonka lämmönjohtavuus tiedetään. Yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisen tutkimuslaitteiston lämpimän kammion kalibrointia varten täytyi leikata ja valmistella kalibrointielementin osat eri paksuisista XPS-eristeistä. Kalibrointimateriaalina käytettiin 50 mm, 60 mm ja 100 mm paksuja suulakepuristettuja Finnfoamin XPS-eristelevyjä, joilla on yhtenäinen ja suljettu solurakenne, joka ei ime vettä (Finnfoam 2017). Käytettä-

vien XPS-eristeiden lämmönjohtavuus mitattiin lämpövirtalevylaitteella TTY:n rakennushallissa. Mittauksista on kerrottu luvussa 4.1. Kalibrointi suoritettiin erikseen sekä matalammalle että korkeammalle koe-elementille.

Koska tässä tutkimuksessa tarkasteltavat koe-elementit olivat pinta-alaltaan pienempiä kuin yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisen tutkimuslaitteiston tutkimusaukko, täytyi niiden reunoille tehdä niin sanottu eristereunus, jota käytettiin sekä kalibrointien että kokeiden aikana. Eristereunus valmistettiin kalibrointielementin tapaan XPS-eristeestä. Eristereunuksesta tehtiin reunoilla 600 mm korkea, joten se oli hieman korkeampi kuin korkeampi tutkittava koe-elementti. Pituussuuntaisilla reunoilla eristereunus koottiin 150 mm korkeista ja 2715 mm pitkistä paikkanumeroiduista paloista, joihin oli kiinnitetty valmiiksi polypropeenivillakaistat, jotta eristereunukset saatiin asennettua paikoilleen reunavilloineen mahdollisimman identtisesti sekä kalibrointikokeessa että varsinaisissa mittauksissa. Eristereunukseen kuuluivat myös päihin asennettavat eristepalat, jotka olivat koe-elementin levyisiä ja 100 mm paksuja. Myös päätypalojen reunoihin oli kiinnitetty valmiiksi polypropeenivillat. Eristereunuksen ja kammion seinien väliset samat sekä eristereunuksen ja tutkittavan koe-elementin väliset saumat tiivistettiin teipillä.

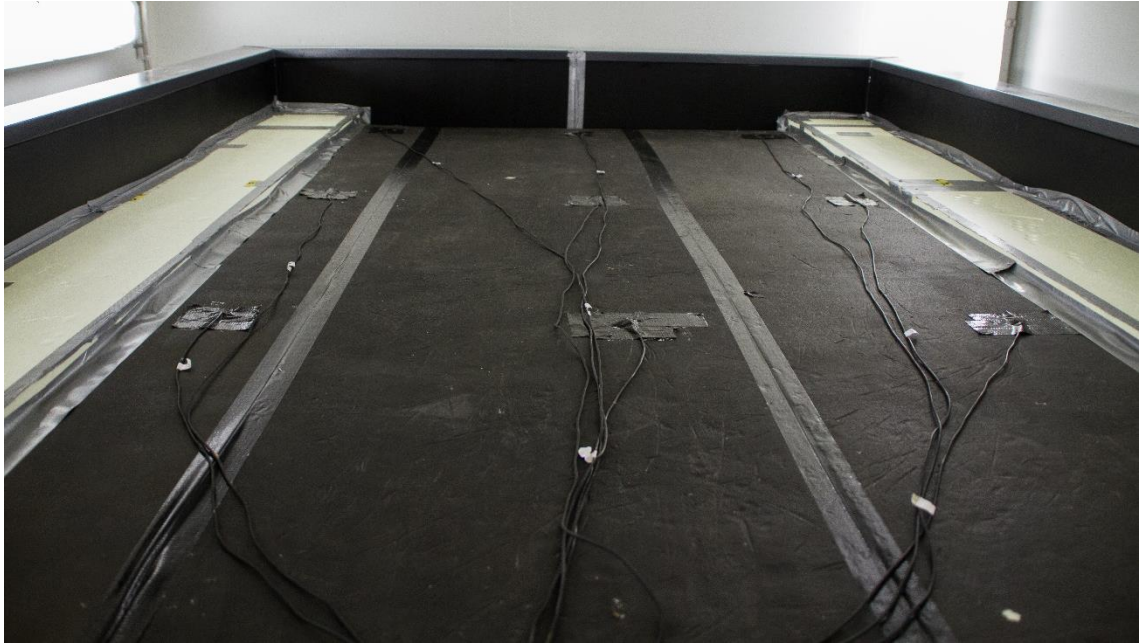
Kalibroinnissa eristereunuksen keskelle jäävä koe-elementin kokoinen alue täytettiin XPS-eristeellä. Kerrosten pontit asetettiin limittäin eri kerrosten välillä, jotta saatiin aikaan mahdollisimman tiivis kalibrointielementti lämpövuotojen minimoimiseksi. Kalibrointielementti muodostui kerroksista kuvan 4.5 mukaisesti. Liitteessä B on esitetty kuva kalibrointieristeiden asentamisesta. Koko kalibrointielementille laskettiin eri paksuisista XPS-eristeistä oleville kerroksille lämmönvastukset, joista yhdistämällä saatiin koko kalibrointielementin lämmönvastus. Laskenta on esitetty luvussa 5.3.



**Kuva 4.5.** Kalibroitijärjestely korkeammalle koe-elementille. Kuvassa on esitetty kalibrointielementtien kerrosten paksuudet sekä puoliponttien sijoittuminen. Matalamman koe-elementin kalibrointielementissä ei käytetty toiseksi ylintä 50 mm kerrosta.

Matalamman koe-elementin kalibrointi suoritettiin 510 mm paksulla XPS-kalibrointielementillä, joka koostui neljästä 100 mm kerroksesta, yhdestä 60 mm kerroksesta sekä yhdestä 50 mm kerroksesta. Lisäksi suoritettiin kalibrointi 560 mm paksuisella kalibrointielementillä lisäämällä yksi 50 mm XPS-eristekerros edellisten lisäksi päällimmäisen kerroksen alle. Kalibrointielementtien päällimmäinen kerros maalattiin mattamustaksi, ja XPS-palojen saumat teipattiin mustalla teipillä. Ulkopinnan pintalämpötila-anturit kiinnitettiin kalibrointielementin pintaan teipillä samoihin kohtiin kuin varsinaisessa elementissä. Muut anturit olivat samoilla paikoilla kuin U-arvokokeissa. Kuvassa 4.6 näkyy korkeamman koe-elementin kalibrointielementti koottuna tutkimusaukkoon ja anturit kiinnitettynä sen pintaan.

Sekä matalamman että korkeamman koe-elementin kalibrointielementit olivat 1 mm paksampia kuin tutkittavien koe-elementtien teoreettiset paksuudet XPS-eristeiden paksuuksien ollessa 10 mm kerrannaisia. Todellisuudessa koe-elementin mittojen tarkistusmitauksessa selvisi, että elementin todellinen korkeus oli keskimäärin matalammalla koe-elementillä 510 mm ja korkeammalla koe-elementillä 560 mm, joten kalibrointielementin tilavuus vastasi hyvin tutkittavan koe-elementin tilavuutta.



***Kuva 4.6.** Korkeamman koe-elementin kalibrointielementti koottuna tutkimusaukkoon. Kalibrointielementin pinta on maalattu mattamustaksi ja anturit on kiinnitetty teipillä elementin pintaan.*

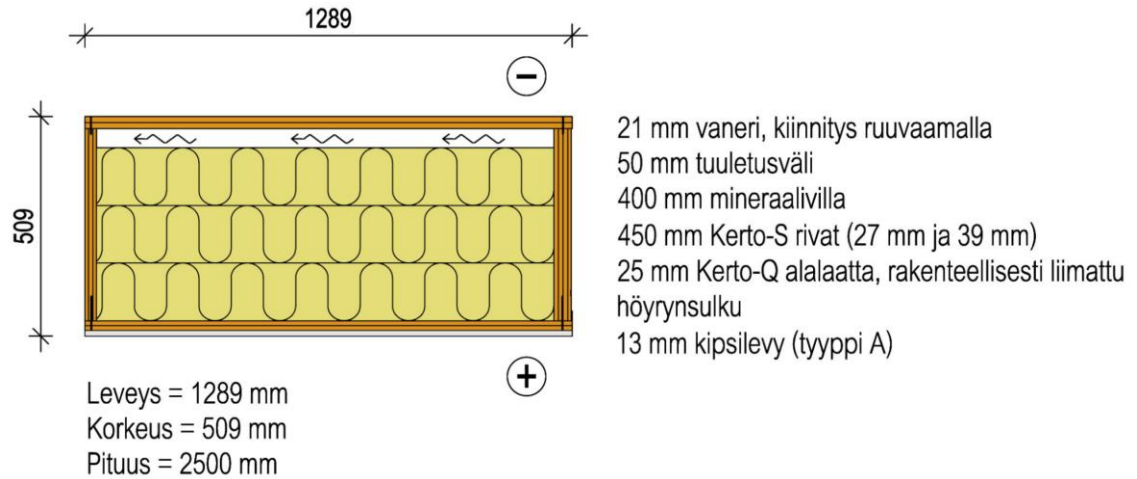
### 4.2.3 Koe-elementti

Metsä Woodin Kerto-Ripa -kattoelementti on todellisuudessa 15–24 metriä pitkä kertopuusta valmistettu elementti, jonka lämmöneristeenä on 450 mm mineraalivillaa ja elementtiä kannattelee kolme kertopuupalkkia, joista käytetään nimitystä tukiripa. Jotta kattoelementtiä voitiin tutkia yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisella tutkimuslaitteistolla, täytyi koe-elementtiin tehdä muutoksia.

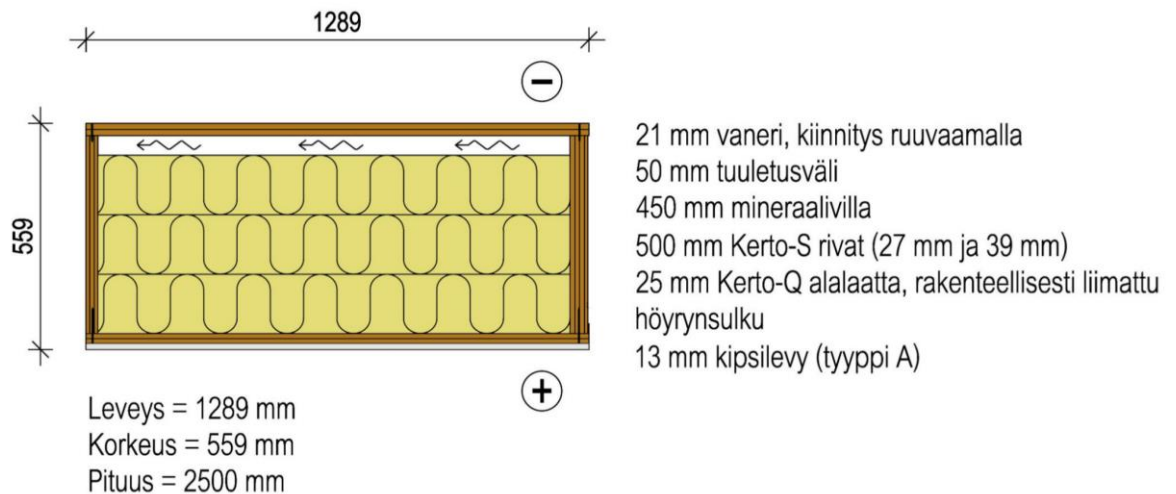
Tämän diplomityön kokeissa tutkittiin sekä matalampaa että korkeampaa koe-elementtiä, joissa molemmissa oli sama runko. Matalampi koe-elementti oli 509 mm korkea elementti, jossa oli 50 mm normaalia vähemmän eristettä. Lisäksi tutkittiin korkeampaa 559 mm korkuista koe-elementtiä, joka saatiin korottamalla matalampaa koe-elementtiä 50 mm ja lisäämällä 50 mm lisäeristys, jolloin eristepaksuus oli normaalisti käytetty 450 mm.

Tutkittavan koe-elementin rungon puuosat olivat suurimmaksi osaksi kertopuuta. Elementin ylälaatta oli kokeissa kuitenkin normaalista poiketen vaneria. Ylälaattana toiminut vaneri oli myös 10 mm ohuempi kuin normaalisti käytetty 31 mm Kerto-Q -laatta. Normaalissa Kerto-Ripa -kattoelementissä kertopuinen ylälaatta on rakenteellisesti liimattu elementin tukiripoihin. Koe-elementin ylälaatta oli kuitenkin kiinnitetty mekaanisesti ruuveilla elementin korottamisen mahdollistamiseksi. Lämmöneristeenä koe-elementissä oli käytetty mineraalivillaa, jonka lämmönjohtavuudeksi saatiin TTY:llä suoritetuissa mittauksissa  $0,037 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ . Myös eristevalmistaja oli ilmoittanut saman lämmönjohta-

vuusarvon eristeelle. Koe-elementin alapinnassa oli 25 mm Kerto-Q -alalaatta, höyrynsulku sekä 13 mm kipsilevy. Kuvissa 4.7 ja 4.8 on esitetty tarkemmin tutkittujen elementtien mitat ja materiaalit sekä matalammalle että korkeammalle koe-elementille. Matalampi koe-elementti painoi noin 140 kg.

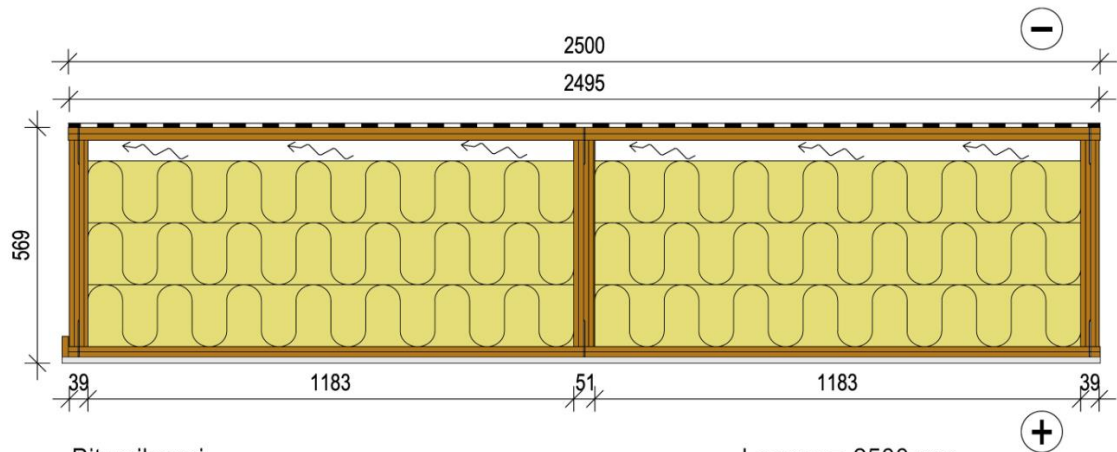


**Kuva 4.7.** Tutkittavan kattoelementin mitat ja materiaalit matalammalle koe-elementille.



**Kuva 4.8.** Tutkittavan kattoelementin mitat ja materiaalit korkeammalle koe-elementille.

Normaalissa rakenteessa kattoelementissä on kolme tukiripaa, jolloin niiden väliin muodostuu kaksi eristetilaa. Kattoelementti olisi kuitenkin ollut tällöin liian leveä tutkittavaksi käytössä olevalla laitteistolla, joten U-arvokokeissa on tutkittu vain toista elementin puolikasta. Kerto-Ripa -kattoelementin reunimmaisat rivat ovat yleensä 39 mm paksuja Kerto-S -palkkeja ja keskimmäisenä ripana on yleisimmin käytetty 51 mm paksua Kerto-S -palkkia. Kuvassa 4.9 on esitetty normaalin Kerto-Ripa -kattoelementin mitat ja materiaalit.



Bitumikermi  
 31 mm Kerto-Q laatta, rakenteellisesti liimattu  
 50 mm tuuletusväli  
 450 mm mineraalivilla  
 500 mm Kerto-S rivat (39 mm x 2 ja 51 mm)  
 25 mm Kerto-Q alalaatta, rakenteellisesti liimattu  
 höyrynsulku  
 13 mm kipsilevy (tyyppi A)

Leveys = 2500 mm  
 Korkeus = 569 mm  
 Pituus > 15000 mm

**Kuva 4.9.** Normaalien Kero-Ripa -kattoelementtien mitat ja materiaalit.

Jotta tutkittavassa koe-elementissä olisi suhteessa yhtä suuri osa kylmäsiltoina toimivia puuosia kuin täydessä elementissä, olisi kolmeripaisen elementin keskimääräinen tukiripa katkaistava tasan keskeltä, jolloin molemmat elementin puolet olisivat samanlaisia. Tämä ei ollut kuitenkaan koe-elementin valmistuksen kannalta mahdollista, joten toisella puolella käytettiin normaalia 39 mm paksua ripaa ja toisella puolella 27 mm ripaa, joka oli siten 1,5 mm normaalisti käytettävän keskirivan puolikkaasta paksumpi. Tämä aiheutti suhteessa hieman suuremman kylmäsiltojen elementin puolikkaaseen kuin kokonaiseen elementtiin, jolloin mittauksesta saatava U-arvo oli hieman varmalla puolella. Koe-elementissä oleva 1223 mm leveä eristetila oli kuitenkin hieman leveämpi kuin normaalissa Kero-Ripa -kattoelementissä käytetty 1183 mm eristetila. 40 mm leveämmän eristetilan vaikutusta tuloksiin on tarkasteltu laskennallisesti luvussa 5.5.3. Tutkittava koe-elementti 400 mm eristepaksuudella näkyy kuvassa 4.10.





**Kuva 4.10.** Valokuva tutkittavasta elementtitehtaalla valmistetusta matalammasta koe-elementistä. Elementin eristepaksuus on 400 mm.

15–24 metriä pitkän Kerto-Ripa -kattoelementin päissä käytetään 15 mm havuvaneria. Päätyvanerin paksuutta ohennettiin tutkittavan koe-elementin osalta 9 mm havuvaneriin. Myös päätyjen havuvaneri oli 2,5 metrisessä koe-elementissä suhteessa paksumpi kuin normaalissa kattoelementissä. Taulukossa 4.2 on listattu Kerto-Ripa -kattoelementin ja koe-elementtien keskeisimmät eroavaisuudet.

**Taulukko 4.2.** Kerto-Ripa -kattoelementin ja koe-elementtien keskeisimmät erot.

	<b>Kerto-Ripa</b>	<b>Koe-elementit</b>
Leveys	2495 mm (kaksi eristetilaa)	1289 mm (yksi eristetila)
Pituus	15–25 m	2,5 m
Lämmöneristeen paksuus	450 mm	400 mm ja 450 mm
Eristetilan leveys	1183 mm	1223 mm
Tukirivat	reunoilla 39 mm Kerto-S ja keskellä 51 mm Kerto-S	39 mm ja 27 mm Kerto-S
Ylälaatan	31 mm Kerto-Q	21 mm vaneri
Ylälaatan kiinnitys	rakenteellinen liimaus	mekaaniset kiinnikkeet
Päätylevy	15 mm vaneri	9 mm vaneri

#### 4.2.4 Antureiden sijoittelu

Standardin SFS-EN ISO 8990 (1996) mukaisessa mittauksessa sekä ilma- että pintalämpötila-antureiden lukumäärä tulee olla ainakin kaksi anturia neliömetrille ja vähintään 9 anturia yhteensä. Koska tutkimusaukon pinta-ala on  $5,02 \text{ m}^2$ , standardin mukaisesti ilma- ja pintalämpötila-antureita täytyy olla vähintään 11 molemmissa kammioissa. Koe-elementin pinnoilla olevat anturit pyrittiin sijoittamaan symmetrisesti lämpimässä ja kylmässä kammiossa.

Tutkimuksessa käytettiin 12 pintalämpötila-anturia sekä lämpimän että kylmän kammion suojalevyissä, 12 pintalämpötila-anturia sekä koe-elementin sisä- että ulkopinnassa ja 12 ilmalämpötila-anturia lämpimässä ja kylmässä kammiossa. Lisäksi sekä lämpimässä että kylmässä kammiossa käytettiin molemmissa neljää ylimääräistä ilmalämpötila-anturia, jotka mittasivat ilman lämpötilaa lämpimässä kammiossa suojalevyjen alapuolella ja kylmässä kammiossa eri puolilla laitteistoa. Ylimääräisten ilma-antureiden avulla saatiin selville laajemmin kammioissa vallitseva lämpötilakenttä. Yhteensä laitteistossa käytettiin siis 48 pintalämpötila-anturia ja 32 ilmalämpötila-anturia.

Lämpimään kammioon standardin SFS-EN ISO 8990 (1996) mukaisesti sijoitettuja ilmalämpötila-antureita käytettiin myös säätöantureina, joiden perusteella lämmittimiin syötetty jännite pyrittiin säätämään sellaiseksi, että tavoitelämpötila saavutettiin. Kylmässä kammiossa pakkahuoneen säätöjärjestelmällä oli omat säätöanturit. Kylmään kammioon standardin SFS-EN ISO 8990 (1996) mukaisesti asennettuja antureita ei siis käytetty kylmän kammion lämpötilan säätöön, mutta niiden avulla laskettiin U-arvon määrittämistä varten tarvittavat lämpötilakeskiarvot kylmän kammion ilman osalta.

Tutkittavan rakenteen molemmin puolin mitattiin myös ilmavirran nopeutta rakenteen pintojen lähellä kuumalanka-anemometreillä. Kuumalanka-anemometrillä saatiin arvioida myös tuuletusvälissä virtaavan ilmavirran nopeutta. Suhteellista kosteutta mitattiin lämpimästä ja kylmästä kammioista molemmista yhdellä anturilla. Ylimääräisillä ilmalämpötila-antureilla selvitettiin ilman lämpötilaolosuhteita lämpimässä kammiossa suojalevyjen alapuolella. Kylmän kammion ylimääräiset ilmalämpötila-anturit oli sijoitettu ilmavirtauskammion kylkeen, ylhäältä katsottuna noin laitteiston keskikohtaan laitteiston alle ja suojakammion päälle sekä takaseinää vasten noin puolen metrin korkeudelle lattia-asta. Antureiden sijoituspaikat lämpimän ja kylmän kammion suojalevyissä sekä koe-elementin pinnoissa on esitetty liitteessä A. Liitteestä näkyy myös ylimääräisten ilmalämpötila-antureiden paikat.

Lämpötila-anturit kiinnitettiin kylmän ja lämpimän kammion suojalevyihin siten, että kaikki anturit olivat vähintään 100 mm suojalevyjen reunojen sisäpuolella standardin SFS-EN ISO 12567 (2010) mukaisesti. Pintalämpötila-anturit kiinnitettiin suojalevyihin pienten pulttien ja muttereiden avulla. Lämpimän kammion puolella vanerien pinnassa olevat pintalämpötila-anturit ja kalibroinnissa kalibroitielementin pinnassa olevat anturit

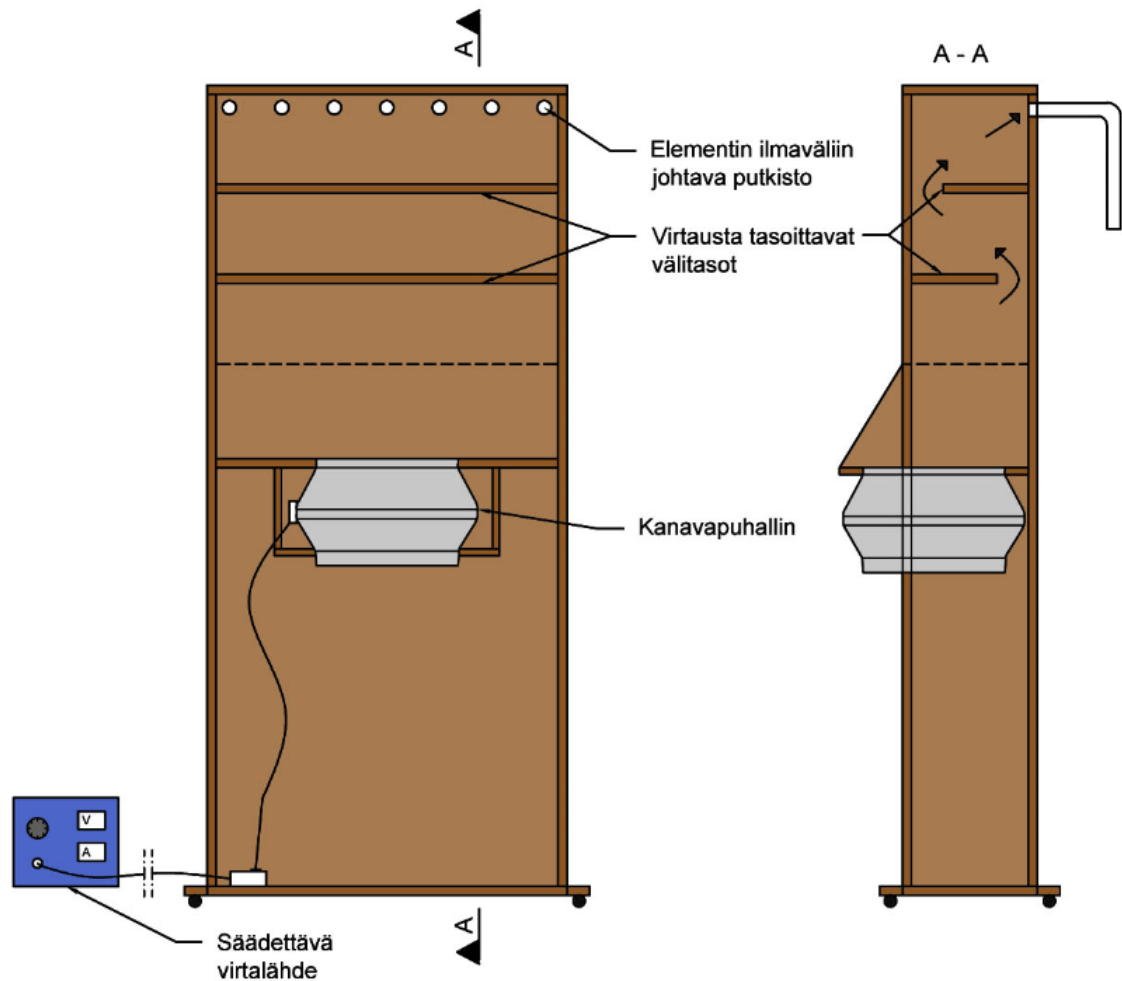
kiinnitettiin mustalla teipillä, jolloin teipin emissiviteetti oli lähellä tutkittavan rakenteen pintojen emissiviteettiä. Tutkittavan koe-elementin yläpintaan anturit kiinnitettiin pienillä ruuveilla. Pintalämpötila-anturit sijoitettiin samoille kohdille rakenteen sisä- ja ulkopinnalle. Lämpimän ja kylmän kammion suojalevyihin sijoitetut anturit eivät olleet täysin identtisillä paikoilla suojalevyjen erilaisesta muodosta ja koosta johtuen.

Ilmalämpötila-anturit asennettiin lasikuitusauvojen päässä oleviin 3D-tulostamalla valmistettuihin lovetuihin muoviputkiin. Lasikuitusauvat oli kiinnitetty kiinnitysmuhveilla suojalevyyn siten, että antureiden asemaa voitiin muuttaa pystysuunnassa lasikuitusauvan pituuden salliman määrän. Saman kammion suojalevyjen ilmalämpötila-anturit asennettiin keskenään samalle korkeudelle suojalevyjen pinnoista. Lämpimän kammion ilmalämpötila-anturit asennettiin 100 mm etäisyydelle suojalevyjen ja koe-elementin pinnasta. Lämpimän kammion ylimääräiset ilmalämpötila-anturit asennettiin suojalevyjen alapuolelle 100 etäisyydelle suojalevyn alapinnasta. Kylmän kammion lämpötila-anturit asetettiin noin 200 mm etäisyydelle suojalevyjen pinnasta, jolloin ne olivat noin 200–250 mm etäisyydellä koe-elementin ulkopinnasta koetilanteesta riippuen. Standardin SFS-EN ISO 8990 (1996) vaatimat ilmalämpötila-anturit asennettiin samalle korkeudelle, jotta lämpötilakenttä saatiin mitattua yhdestä tasosta. Ilma-antureiden päälle asennettiin myös säteilysuojat.

#### **4.2.5 Kattoelementin tuuletus**

Koe-elementin tuuletustilaan johdettava ilmavirta synnytettiin kanavapuhaltimella, josta ilma virtasi ilmatiiviiseen kammioon tasattavaksi. Kammio rakennettiin TTY:n rakennushallissa vesivanerista, ja siitä tehtiin ilmatiivis saumaamalla laitteiston sisäsaumat silikonimassalla ja tarvittaessa saumojen päälle vedettiin lopullinen tiivistys tuulensuojalevyjen teippaamiseen tarkoitetulla teipillä kammion ulkopuolelta. Kammion sisään asennettiin tasoja, jotka tasoittivat kammioon tulevaa ilmavirtaa, kunnes se oli saavuttanut kammion yläosassa olevat halkaisijaltaan 32 mm muoviputket, joiden avulla ilma johdettiin koe-elementin tuuletusväliin. Putkia oli 7 kappaletta. Ilmavirran luomiseksi käytettiin pyöreää CK-kanavapuhallinta, jonka nimellisteho oli 224 W. Ilmavirtauskammion periaate on esitetty kuvassa 4.11.

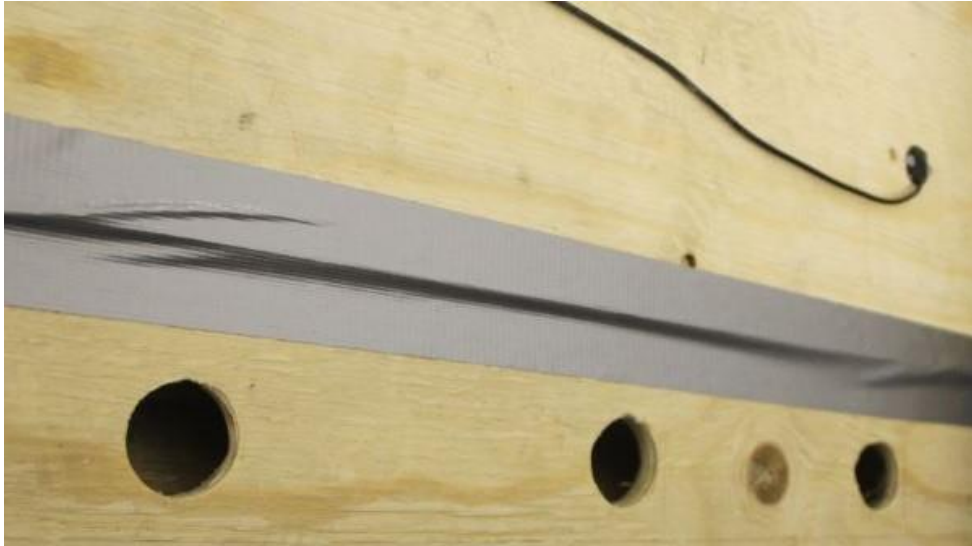
Ennen varsinaisia kokeita tutkittiin, että putkista saadaan tarpeeksi tasaisesti ilmavirtaa puhaltimen ollessa päällä asettamalla laminaariputki vuorotellen jokaisen putken päähän ja tarkkailemalla sen läpi virtaavan ilmavirran suuruutta. Laminaariputkesta mitattiin paine-ero ja putken läpi virtaava ilmamäärä saatiin selville laminaariputken valmistajan ilmoittamiin maksimiarvoihin vertaamalla. Samalla haluttiin myös tarkistaa, että puhallinsysteemin teho riittää luomaan tuuletusväliin kokeita varten tarvittavat ilmavirrat. Puhaltimen avulla ilmaväliin saatava suurin ilmavirran nopeus saatiin arvioitua jakamalla putkista yhteensä saatu ilmamäärä ilmavälin pinta-alalla.



**Kuva 4.11.** Ilmavirtauskammio, jonka avulla tasainen haluttu ilmavirtaus johdetaan tutkittavan koe-elementin tuuletusväliin.

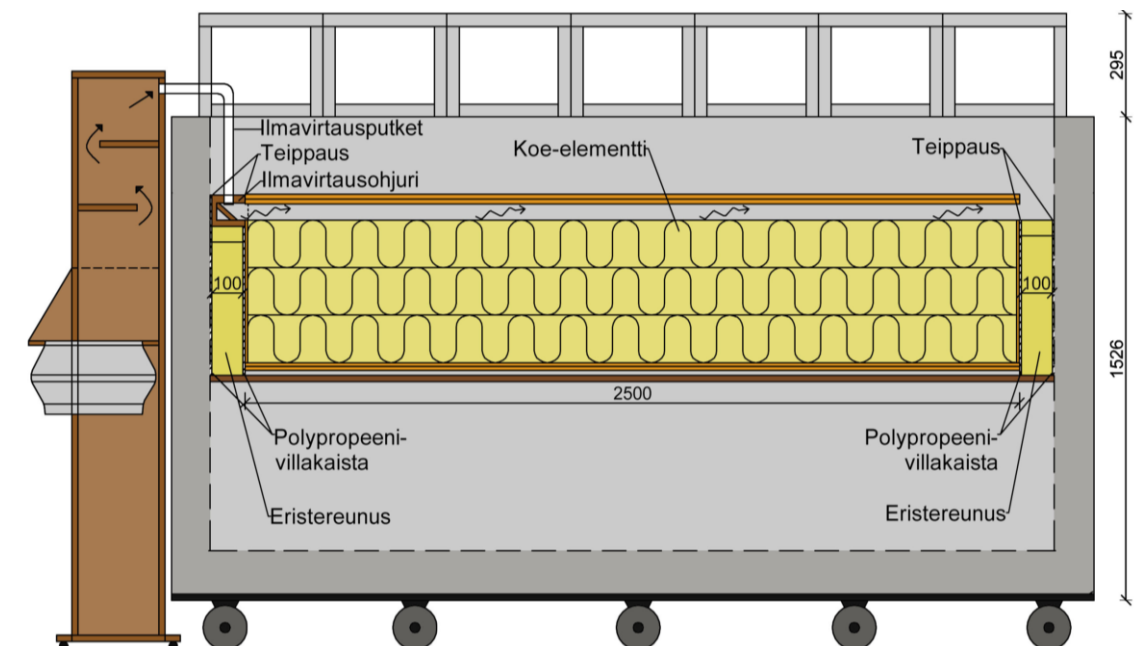
Kokeiden aikana ilmapäliissä kulkevan ilmavirran nopeuden suuruutta arvioitiin ilmapälin keskelle sijoitetun ilmavirtausanturin avulla. Kanavapuhallin kytkettiin säädettävään jännitelähteeseen, jolloin sen tehoa voitiin muuttaa sellaiseksi, että haluttu ilmavirtaus saavutettiin eri tilanteissa. Jännitelähde asetettiin pakkashuoneen ulkopuolelle, jolloin ilmavirran nopeutta pystyttiin säätämään tarvittaessa myös kokeen aikana.

Ilmavirtauskammio sijoitettiin pakkashuoneen ovien puoleisen päätyyn niin, että ilmavirtausputket kulkivat laitteiston reunan yli tutkimusaukon puolelle. Kuva ilmavirtausputkien johtamisesta koe-elementin tuuletusväliin on esitetty liitteessä B. Virtausputkistojen päähän asennettiin puinen ilmavirtausohjuri, jonka avulla ilmavirtaus johdettiin putkista koe-elementin ilmapäliin. Kuvassa 4.12 näkyy osa ilmavirtausohjurista ennen ilmavirtausputkien paikalleen asentamista.



**Kuva 4.12.** Ilmavirtausohjurin osa kiinnitettynä laitteistoon ennen ilmavirtausputkien asennusta ohjurin reikiin. Ohjurin ja koe-elementin välinen sauma sekä ohjurin ja laitteiston seinän väliset saumat teipattiin.

Kuva 4.13 havainnollistaa ilmavirtauskammion ja -ohjurin sijoittumista laitteistoon. Ilmavirtausohjurin ja koe-elementin sekä ohjurin ja laitteiston seinän väliset saumat teipattiin.



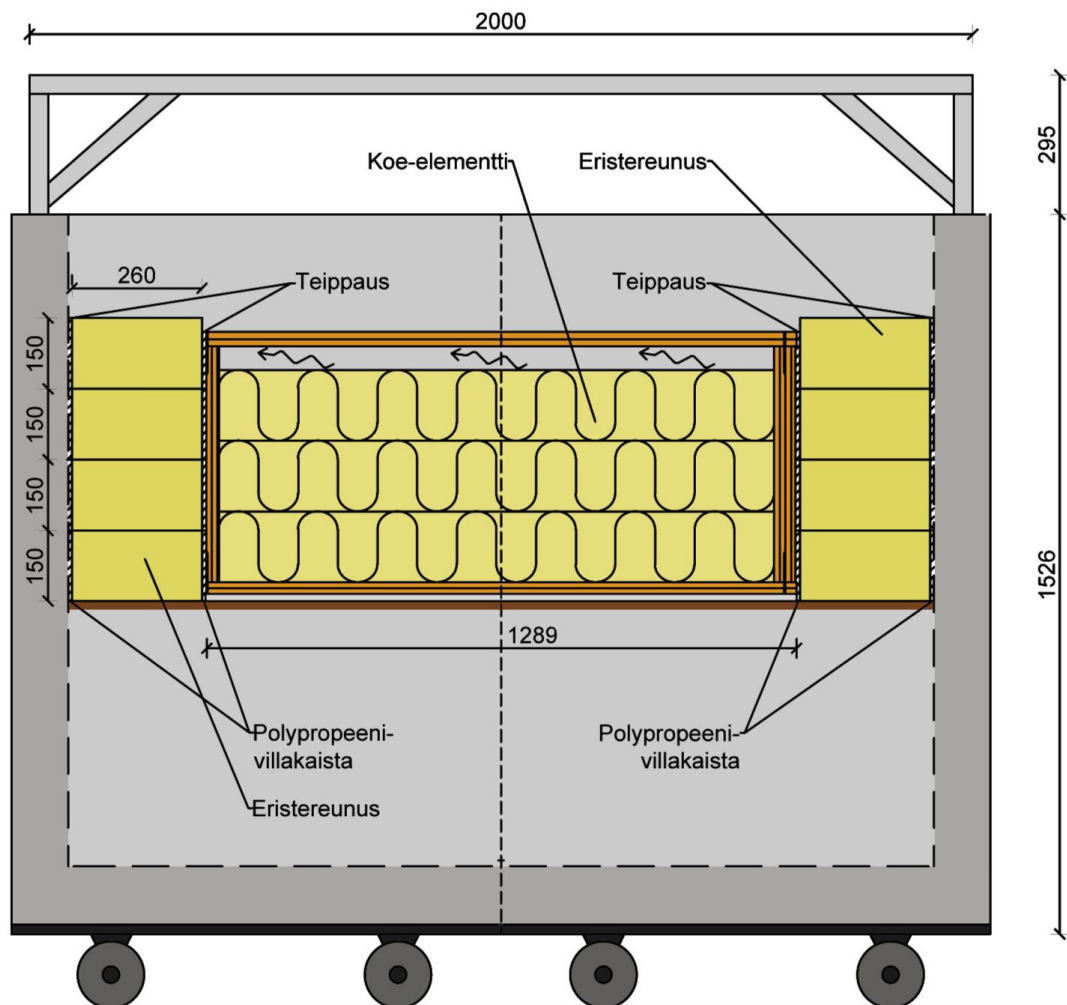
**Kuva 4.13.** Ilmavirtauskammion ja -ohjurin sijoittuminen laitteistoon korkeamman koe-elementin kokeissa.

#### 4.2.6 Koe-elementin asentaminen tutkimusaukkoon

Standardin SFS-EN ISO 8990 (1996) mukaan elementtiä asennettaessa asennusrako elementin ja tutkimusaukon välissä saa olla enintään 2 % tutkimusaukon leveydestä tai enin-

tään 20 mm. Koska tarkasteltavat koe-elementit olivat pinta-alaltaan pienempiä kuin yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisen tutkimuslaitteiston tutkimusaukko, rakennettiin niiden reunoille niin sanottu eristereunus, jota käytettiin sekä kalibrointien että kokeiden aikana.

Eristereunuksen päätypalojen sijoittuminen tutkimusaukkoon on esitetty kuvassa 4.13 ja pituussuuntaisen eristereunuksen sijoittamisen periaate kuvassa 4.14, kun tutkittavana oli 559 mm korkea koe-elementti. Eristereunuksen päätypalat ylettyivät koe-elementin tuuletusvälin alareunaan eli tuuletusvälin päädyt jäivät avoimiksi. Lähempänä pakkashuoneen ovea olevan laitteiston päädyn päätypalan päälle asetettiin puinen ilmapirtausohjuri, jonka avulla ilmapirtaus johdettiin putkista kattoelementin tuuletusväliin. Toisessa päässä tuuletusilmavirta pääsi virtaamaan vapaasti ulos tuuletusvälistä. Korkeamman koe-elementin kokeissa sekä kalibroinnissa päätypalojen päälle asennettiin 50 mm korkeat lisäpalat, jolloin ne ylettyivät edelleen tuuletusvälin alareunaan. Lisäpalojen vaatimat polypropeenivillakaistat laitettiin paikoilleen palojen asentamisen yhteydessä. Eristereunuksen ja kammion seinien väliin jäävä tila sekä eristereunuksen ja tutkittavan koe-elementin välinen tila täytettiin polypropeenieristevillalla ja saumat tiivistettiin teipillä.



**Kuva 4.14.** Eristereunuksen ja koe-elementin sijoittuminen laitteistoon korkeamman koe-elementin kokeissa.

Ennen koe-elementin laitteistoon asettamista sen mitat tarkistettiin ja suunniteltiin koe-elementin laitteistoon nostaminen. Nostaminen täytyi hoitaa laboratoriohenkilökunnan toimesta, koska rakennushallin nosturi ei ylety pakkashuoneeseen. Elementtipiirustuksissa rakenteen teoreettiseksi korkeudeksi oli määritetty 509 mm, mutta mitattuna varsinaisen koe-elementin keskimääräinen korkeus oli 510 mm, joten kalibrointielementin tilavuus vastasi hyvin koe-elementin tilavuutta.

### 4.3 Kokeiden suorittaminen

Lämmönläpäisykokeet suoritettiin kahdelle eri paksuiselle koe-elementille. Matalamman koe-elementin mittaukset suoritettiin, jotta saatiin selville täyttäisikö sama elementti Suomen rakentamismääräyskokoelman (RakMk D3 2012) U-arvon vertailuarvon  $0,09 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  50 mm matalammalla mineraalivillakerroksella. Koska matalampi koe-elementti ei täyttänyt vaatimuksia, korotettiin koe-elementtiä 50 mm elementtitehtaalta saatujen korotusripojen avulla. Rivat kiinnitettiin matalamman koe-elementin ripoihin ruuveilla. Lisäksi koe-elementissä ollut päällimmäinen 100 mm mineraalivillakerros vaihdettiin 150 mm paksuun mineraalivillakerrokseen, jolloin eristepaksuus lisääntyi 50 mm.

Kun korkeamman koe-elementin U-arvo oli selvillä normaaleissa olosuhteissa, tutkittiin U-arvon muutosta, mikäli tuuletusväli ei toimi oikein ja tuuletusvälissä ei kulje ilma ollenkaan (ilmavirran nopeus  $0 \text{ m/s}$ ) tai jos tuuletustilassa on normaalista poikkeavasti suurempi ilmavirtaus (ilmavirran nopeus  $0,35 \text{ m/s}$ ), jolloin tuuletusvälin eristävä ominaisuus häviää. Näiden lisäksi mitattiin U-arvo noin puolet normaalia suuremmalla ilmavirtauksella (ilmavirran nopeus noin  $0,13 \text{ m/s}$ ). Varsinaisia mittauksia suoritettiin siis 7 kpl, joiden nimeäminen on esitetty taulukossa 4.3.

**Taulukko 4.3.** Koetilanteiden nimeäminen ja selitykset.

Koe nro	Koetilanne	Selitys
1	Kalibrointi 510	Kalibrointi matalammalle koe-elementille
2	Kalibrointi 560	Kalibrointi korkeammalle koe-elementille
3	U-arvokoe 510 IV0,07	U-arvokoe ilmavirran nopeudella $0,065 \text{ m/s}$ matalammalle koe-elementille (normaalitilanne)
4	U-arvokoe 560 IV0,06	U-arvokoe ilmavirran nopeudella $0,064 \text{ m/s}$ korkeammalle koe-elementille (normaalitilanne)
5	U-arvokoe 560 IV0,0	U-arvokoe ilmavirran nopeudella $0 \text{ m/s}$ korkeammalle koe-elementille
6	U-arvokoe 560 IV0,13	U-arvokoe ilmavirran nopeudella $0,13 \text{ m/s}$ korkeammalle koe-elementille
7	U-arvokoe 560 IV0,35	U-arvokoe ilmavirran nopeudella $0,35 \text{ m/s}$ korkeammalle koe-elementille

### 4.3.1 Tavoiteltavat koe-olosuhteet

Koe-elementtiä säilytettiin ennen mittauksia TTY:n rakennushallissa, missä lämpötila vaihteli noin +18 °C ja +25 °C välillä ja suhteellinen kosteus 20 % RH ja 40 % RH välillä. Suhteellista kosteutta ei säädetty kokeen aikana, mutta sitä mitattiin kokeen aikana sekä kylmästä että lämpimästä kammioista molemmista yhdellä kosteusanturilla.

Tavoitelämpötiloina U-arvon mittauksissa käytettiin lämpimälle kammiolle 20 °C ja kylmälle kammiolle 0 °C standardin SFS-EN ISO 8990 (1996) suosituksen mukaisesti. Tavoiteltu lämpötilaero  $\Delta T$  oli siis  $20 \pm 2$  °C. Standardi SFS-EN ISO 12567 (2010) määrää, että kylmän kammion tuulettimien asetukset tulee asettaa varsinaisessa U-arvokokeessa samalla tavalla kuin kalibrointimittauksessa. Yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisen tutkimuslaitteistossa kylmän kammion tuulettimet asennettiin joka kokeessa käsin mahdollisimman identtisesti kalibrointiin nähden. Tuulettimien suuntauksessa esiintyi pieniä eroavaisuuksia käsin asennuksesta johtuen. Tuulettimet kuitenkin puhalsivat samalla nopeudella kaikissa kokeissa.

Kalibrointi ja U-arvomittauksissa rakenteen pinnalle kylmän kammion puolella pyrittiin luomaan vähintään 2 m/s oleva rakenteen suuntainen ilmavirtaus, jolloin ulkopinnan pintavastukseksi tulee yleensä 0,04–0,08 m<sup>2</sup>K/W (SFS-EN ISO 6946 2008). Lämpimän kammion sisätuulettimien teho oli valittu niin, että ilmavirran nopeus pinnalla ei nouse liian suureksi. Standardin SFS EN-ISO 8990 (1996) mukaan ilmavirtauksen pinnalla tulisi olla 0–0,3 m/s, joka vastaa luonnollista konvektiota. Tällöin sisäpinnan pintavastus asettuu yleensä välille 0,10–0,15 m<sup>2</sup>K/W. Tutkittavan rakenteen sisäpinnalla vaikuttava ilmavirtaus oli kuitenkin hieman suurempi, jotta lämpimän kammion ilma saatiin kunnon kiertämään ja näin saatiin tasoitettua lämmittimiltä tuleva lämpö ympäri kammiota. Sisä- ja ulkopinnan tuulettimien synnyttämä ilmavirtaus säädettiin kokeiden alussa halutulle tasolle ja tuulettimien säätöjä ei muutettu mittausten aikana.

Kokeiden aikana koe-elementin tuuletustilaan haluttiin luoda erilaisia ilmavirtauksia koetilanteesta riippuen. Yleensä rakennuksen kattoelementin tuuletustilan tuuletus johtuu ulkoilman olosuhteista eli tuulesta ja painesuhteista. Tässä tutkimuksessa haluttu ilmavirta luotiin tuuletusväliin kanavapuhaltimen avulla. Aluksi mitattiin täyttääkö koe-elementti vaaditun U-arvon, jolloin tuuletusvälin ilmavirran nopeutena käytettiin hieman suurempaa ilmavirran nopeutta kuin todellisten Kerto-Ripa -kattoelementtien tuuletusväleissä mitatut ilmavirran nopeudet. Leivo et al. (2013) mittasivat todellisessa rakennuksessa kattoelementtien tuuletusvälien kokoojaputkista eli poistoputkista virtausnopeudet kuuma-lanka-anemometreillä. Yhdestä putkesta mitattu virtausnopeus kerrottiin kyseessä olevan putken poikkileikkauspinta-alalla. Näin saatu tilavuusvirta oletettiin jakautuvan tasaisesti kaikille niille elementeille, joista kokoojaputki keräsi ilmaa. Mitatut ilmavirran nopeudet Kerto-Ripa -kattoelementin tuuletusvälissä vaihtelivat 0,011–0,045 m/s välillä. Korkeammalla koe-elementillä U-arvokokeet tehtiin normaalin ilmavirtauksen lisäksi täysin ilman tuuletusilmavirtaa, noin puolet normaalia suuremmalla tuuletusilmavirtauksella sekä



selvästi tavanomaista suuremmalla tuuletusilmavirralla. Koe-elementin tuuletusvälissä käytetyt tuuletusilmavirran nopeudet eri koetilanteissa esitettiin taulukossa 4.3.

### 4.3.2 U-arvokokeet

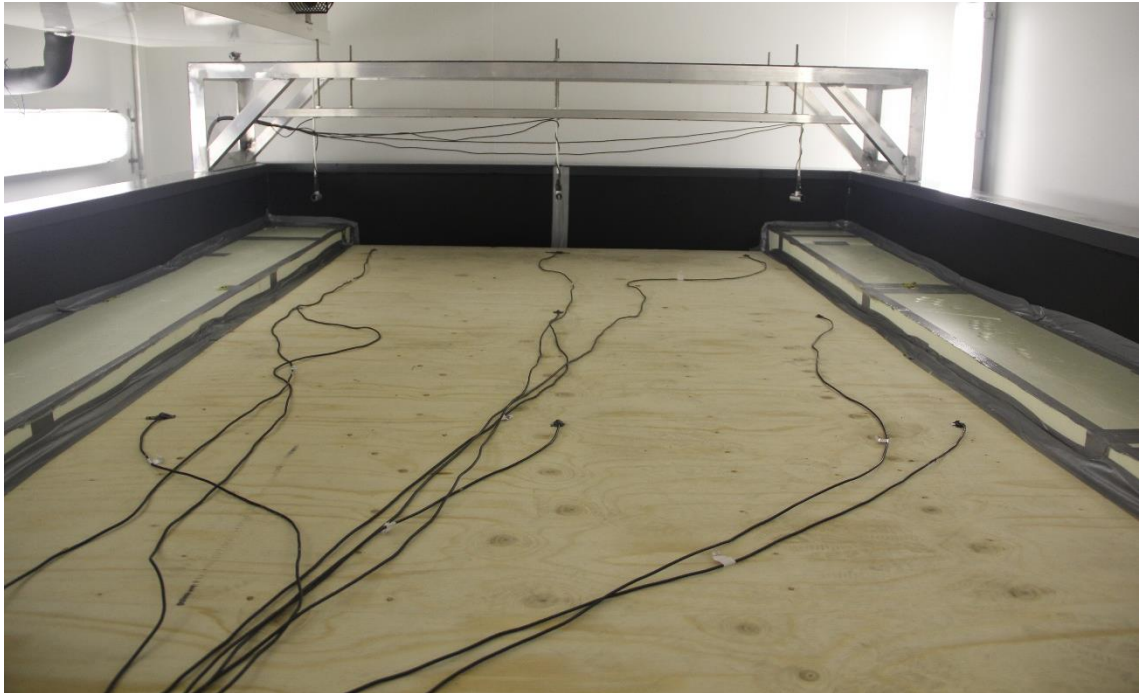
Elementtitehtaalta saapunut matalampi koe-elementti painoi noin 140 kg, ja se nostettiin laitteistoon viiden miehen voimin. Ennen koetta ohjausohjelmaan syötettiin tiedosto, jossa oli määritelty antureiden nimet, kalibrointikertoimet sekä tyypit. Tiedosto oli sama kuin kalibrointikokeessa. Kokeen edistymistä ja stationääritilan saavuttamista seurattiin ohjausohjelman graafisesta käyttöliittymästä sekä 5 minuutin välein tallentuvista tulostiedoista.

Kokeiden aikana lämmin kammio sijoitettiin pakkashuoneessa mahdollisimman keskelle niin, että myös ilmavirtauskammio mahtui pakkashuoneen ovien puoleiseen pätyyn. Tutkimusaukon päälle asetettiin suojakammio seitsemästä osasta. Koko tutkimuslaitteisto näkyy kuvassa 4.15. Kanavapuhaltimet asetettiin suojakammion pätyyn ilmavirtauskammion molemmiin puolin puhaltamaan koe-elementin ulkopinnalle. Tutkimuslaitteisto aseteltiin varsinaisissa U-arvokokeissa mahdollisimman samalla lailla kuin kalibroinnissa. Ilmavirtauskammio, kanavapuhaltimet sekä suojakammion osat olivat ainoita elementtejä, joita liikuteltiin kokeiden välissä. Lisäksi kokeiden välissä tarkastettiin yhdestä huoltoluukusta, että anturit olivat pysyneet paikallaan lämpimässä kammiossa. Yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalinen tutkimuslaitteisto pidettiin koko tutkimuksen ajan liikumattomana samalla paikalla eikä laitteiston osia irrotettu toisistaan kokeiden välissä.



**Kuva 4.15.** Kuva pakkashuoneen sisältä koetilanteessa.

Tuuletusväliin valittiin Leivo et al. (2013) tekemän tutkimuksen mukaan varmalla puolella oleva, mutta ei liian suuri ilmavirran nopeuden arvo. Tutkimuksen mukaan normaalin kattoelementin tuuletusvälissä ilman virtausnopeus oli yleensä suurimmillaan 0,045 m/s. Koe-elementtien U-arvoa mitattaessa tuuletustilaan syötettiin ilmavirta, jonka nopeus oli matalammalla koe-elementillä keskimäärin 0,07 m/s ja korkeammalla koe-elementillä 0,06 m/s. Kuvassa 4.16 näkyy tutkimusaukko korkeamman koe-elementin mitaustilanteessa. Pintalämpötila-anturit on kiinnitetty koe-elementin pintaan ruuvien avulla.



**Kuva 4.16.** Korkeampi koe-elementti asennettuna tutkimusaukkoon.

Ylimääräisiä ilmalämpötila-antureita ei käytetty säätöantureina, mutta niiden avulla selvitettiin ilman lämpötilaolosuhteita lämpimässä kammiossa suojalevyjen alapuolella ja kylmässä kammiossa laitteiston ulkopuolella eri puolella pakkahuonetta. Anturit oli sijoitettu ilmavirtauskammion kylkeen, noin laitteiston keskikohtaan laitteiston alle ja suojakammion päälle sekä takaseinää vasten noin puolen metrin korkeudelle lattiasta. Laitteiston kaikkien antureiden sijoittaminen on esitetty liitteessä A.

Yksi koe kesti valmisteluineen noin 3–5 vuorokautta. Koska pienemmällä eristepaksuudella oleva koe-elementti ei täyttänyt eristävyysvaatimuksia, asennettiin koe-elementin ripoihin 50 mm korokerivat ja 50 mm lisää mineraalivillaa, jonka jälkeen korkeammasta koe-elementistä mitattiin uudelleen lämmönläpäisykerroin. Korkeammalle koe-elementille suoritettiin myös kokeita, joissa tutkittiin tuuletusilmavirran vaikutusta koe-elementin U-arvoon.

### 4.3.3 U-arvokokeet erilaisilla tuuletusilmavirroilla

U-arvon mittaaminen erisuuruksilla ilmavirran nopeuksilla tuuletusvälissä tapahtui korkeammalle koe-elementille. Ensin tutkittiin täysin tuulettumattoman ilmavälin vaikutusta koe-elementin U-arvoon. Kokeen aikana kanavapuhallinta ei laitettu päälle. Ilmavälin avoin pää suljettiin muovin ja teipin avulla, ja samoin tehtiin kanavapuhaltimen ilmanottoaukolle. Tällöin ilmaväli oli kokonaan eristävänä osana rakennetta. Standardissa SFS-EN ISO 6946 (2008) esitetään ohjeita U-arvon laskennallista määrittämistä varten. Standardin mukaan 50 mm tuuletusvälin tuulettumattoman ilmakerroksen lämmönvastus lämpövirran suunnan ollessa ylöspäin on  $0,16 \text{ m}^2\text{K/W}$ .

Toinen ilmavirtauskoe tehtiin normaalia selvästi suuremmalla ilmavirtauksella, jolloin ilmavälin eristävä vaikutus häviää. Tuuletusilmavirran nopeutena käytettiin noin  $0,35 \text{ m/s}$ , mikä oli noin 5,5-kertainen normaalina ilmavirtauksena käytettyyn arvoon. Suurella ilmavirtauksella eristeeseen aiheutuu todennäköisesti sisäistä konvektiota, mikä myös heikentää rakenteen U-arvoa.

Vertailuksi suoritettiin myös tutkimussuunnitelmasta poikkeava koe normaalia noin puolet suuremmalla ilmavirran nopeudella, joka oli  $0,13 \text{ m/s}$ . Koetulokset on esitetty seuraavassa luvussa.

## 5. KOETULOKSET

Tässä diplomityössä varsinaisia mittauksia tehtiin seitsemän kappaletta kalibrointikokeet mukaan lukien. Kokeiden tulokset saatiin käsittelemällä ohjausohjelmalta saatuja lämpötila- ja lämmitystehotietoja. Ohjausohjelma loi tulostiedostoja viiden minuutin välein kokeen ollessa käynnissä. Mittauksen tulostiedostot yhdistettiin yhdeksi Excel-tiedostoksi tulosten käsittelyä varten. Myös suhteellisen kosteuden ja ilmavirtausnopeuksien mittaus-tulokset voitiin muuttaa Excel-muotoon. Tulosten vertailukohdaksi laskettiin Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C4 (2012) mukaiset U-arvot tutkituille koe-elementeille sekä todelliselle Kerto-Ripa -kattoelementille.

### 5.1 Koeolosuhteet

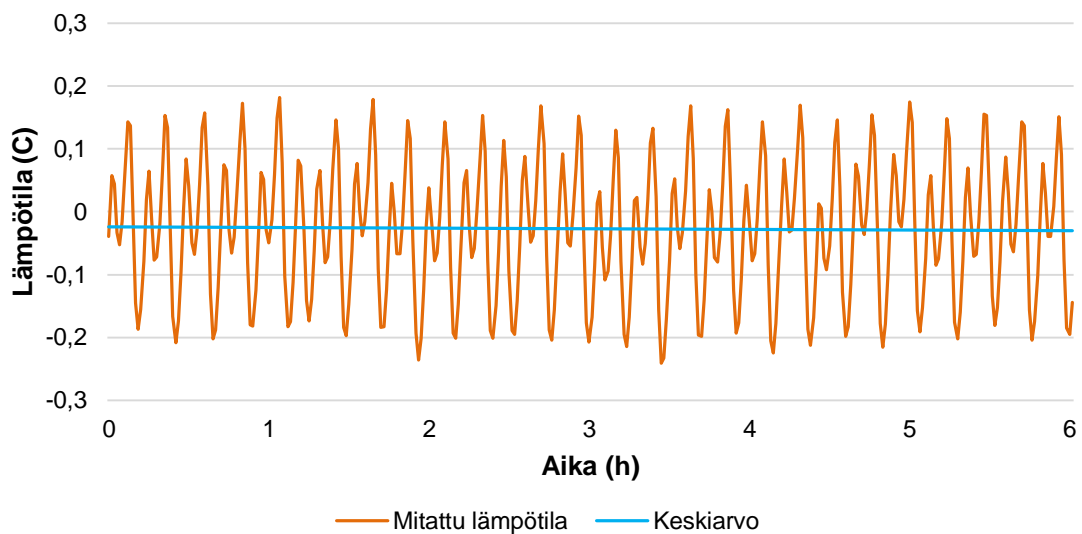
Standardin SFS-EN ISO 8990 (1996) mukaisesti ulko- ja sisätilan lämpötilaero saa poiketa tavoitellusta 20 °C:sta  $\pm 2$  °C, mikä toteutui kaikissa kokeissa lämpötilan poiketessa enimmillään 0,15 °C korkeamman koe-elementin U-arvokokeessa, jossa tuuletusilmavirran nopeutena oli 0,35 m/s. Taulukossa 5.1 on esitetty eri koetilanteissa stationääritilassa vallinneet lämpötilat sekä niistä laskettu lämpötilaero. Taulukosta huomataan, että lämpimän kammion lämpötila tasoittui joka kokeessa samaan tavoitelämpötilaan 20,0 °C säätöjärjestelmän ja hyvän tuuletuksen ansiosta. Pienet eroavaisuudet lämpötilaerossa eri kokeiden välillä johtuvat kylmän kammion lämpötiloista, jotka eroavat hieman toisistaan eri koetilanteissa.

**Taulukko 5.1.** Stationääritilanteissa vallinneet lämpötilat kylmässä ja lämpimässä kammiossa. Tulokset ovat 12 lämpötila-anturin kuuden tunnin mittaustulosten keskiarvoja.

Koetilanne	$T_i$ (°C)	$T_e$ (°C)	$\Delta T$ (°C)
Kalibrointi 510	20,00	-0,03	20,03
Kalibrointi 560	20,00	-0,06	20,06
U-arvokoe 510 IV 0,07	20,00	0,02	19,98
U-arvokoe 560 IV 0,06	20,00	0,02	19,98
U-arvokoe 560 IV 0,0	20,00	-0,04	20,04
U-arvokoe 560 IV 0,13	20,00	0,08	19,92
U-arvokoe 560 IV 0,35	20,00	0,15	19,85

Pakkahuoneen säätöjärjestelmälle annettu tarkkuus oli ulkolämpötilan osalta  $\pm 0,25$  °C sisällä. Ulkolämpötilan säätö oli jaksottaista ja sen vaihtelu stationääritilanteessa noudatti suunnilleen samanlaista kiertokulkua kuvan 5.1 mukaisesti. Kuvassa 5.1 on esimerkki stationääritilan saavuttaneen kokeen ulkolämpötilojen keskiarvosta matalamman koe-elementin kalibrointikokeessa kuuden tunnin ajalta.

Kuvasta 5.1. huomataan, että ulkoilman lämpötilat suojakammion sisällä vaihtelivat ulkolämpötilan keskiarvosta noin  $\pm 0,2$  °C välillä, mikä on standardin SFS-EN ISO 8990 (1996) mukaan sallituissa rajoissa. Suurin poikkeama sisä- ja ulkopuolen lämpötilaeroissa kalibrointikokeen ja varsinaisen kokeen välillä oli 0,05 °C. Korkeamman koe-elementin tapauksessa ero oli normaalissa U-arvokokeessa 0,08 °C ja nollailmavirtauksella 0,02 °C, kun taas suurempien ilmavirtauksien kokeissa erot olivat 1,3 m/s tuuletusilmavirran kokeessa 0,14 °C ja 0,35 m/s tuuletusilmavirran kokeessa 0,21 °C. Mitä suurempi ero kalibroinnin ja kokeen välisessä lämpötilaerossa on, sitä epätarkempi kokeen mittaustulos saadaan, sillä tulosta joudutaan korjaamaan laskennallisesti.



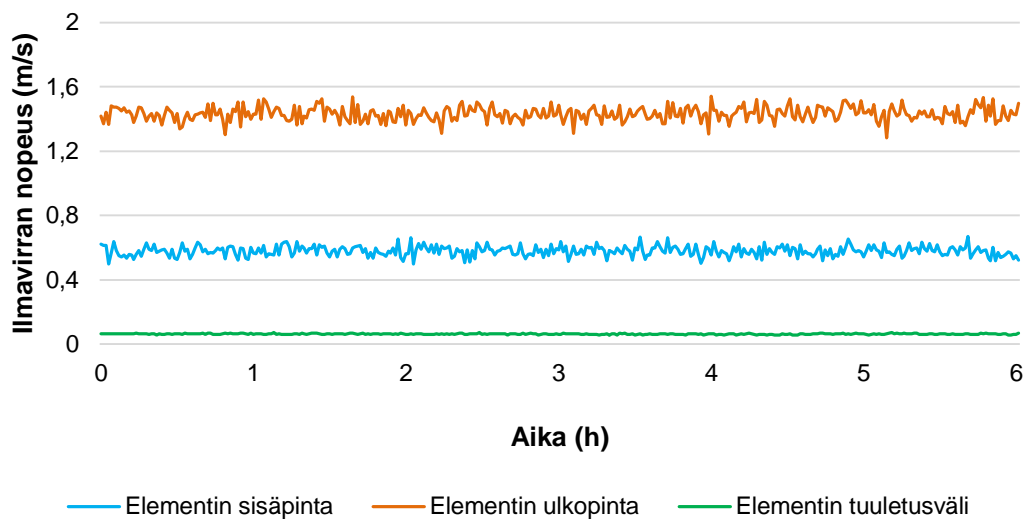
**Kuva 5.1.** Matalamman koe-elementin kalibrointikokeen ulkolämpötila. Tulokset ovat 12 lämpötila-anturin kuuden tunnin mittaustulosten keskiarvoja.

Stationääritilan saavuttamisen jälkeen suhteellisen kosteuden keskiarvo pysyi kaikissa kokeissa lämpimässä kammiossa 19–20 % RH:n välillä ja kylmässä kammiossa 73–79 % RH:n välillä. Tarkemmat koekohtaiset tulokset ovat nähtävissä liitteessä C.

Lämpimään kammioon sijoitettujen ylimääräisten ilmalämpötila-antureiden tuloksista nähtiin, että suojalevyjen alla lämpötila oli keskimäärin 0,12 °C korkeampi kuin säätölämpötilojen arvo. Tuuletuksen avulla sekoitettiin ilmaa ja tavoiteltiin siten mahdollisimman tasaista lämpötilakenttää suojalevyjen ylä- ja alapuolella. Kylmässä kammiossa ylimääräisillä ilma-antureilla mitattujen lämpötilojen ero suojakammion sisällä oleviin ilmalämpötila-antureiden lämpötiloihin oli suurempi. Ylimääräisten lämpötila-antureiden mittaamien lämpötilojen keskiarvo oli kokeissa keskimäärin 0,5–0,7 °C kylmempi kuin suojakammion sisällä olevien ilma-antureiden keskiarvo. Pakkashuoneen oven lähellä ilmavirtauskammion kyljessä ollut ylimääräinen lämpötila-anturi mittasi noin 0,3–0,4 °C lämpimämpiä arvoja kuin laitteiston alla, päällä ja takana olleet anturit. Stationääritilanteessa suojakammion sisällä vallitsi kokeissa  $-0,60 \dots +0,15$  °C lämpötila. Suurin yksittäisellä ylimääräisellä ilmalämpötila-anturilla mitattujen lämpötilojen keskiarvo oli  $-0,72$  °C. Tästä voidaan siis päätellä, että kylmässä kammiossa lämpötilakenttä oli kylmempi

laitteiston ympärillä ja suojakammion päällä kuin suojakammion sisällä. Lämpötilat olivat kuitenkin suhteessa suunnilleen samanlaiset eri kokeissa, joten tämä saatiin otettua huomioon kalibroinnilla.

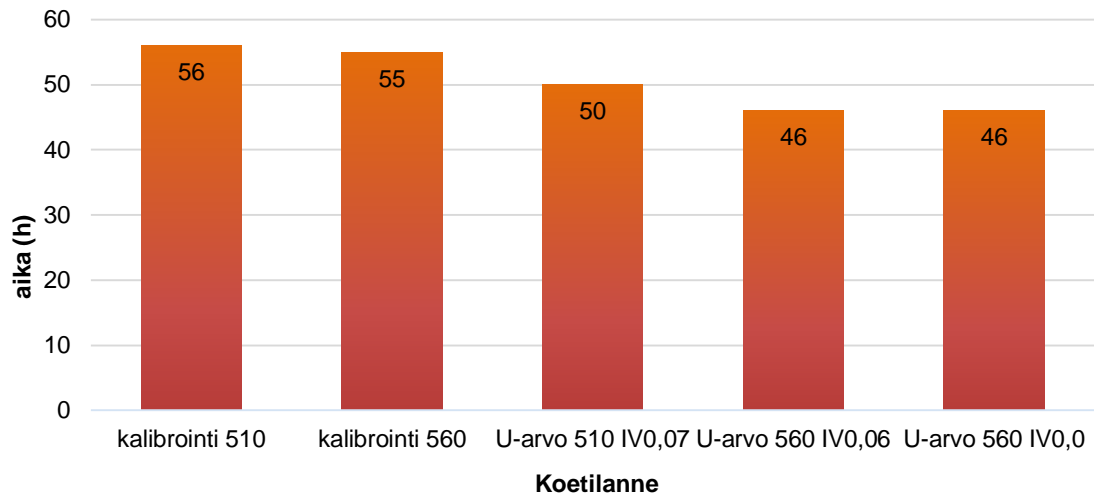
Kokeissa luotiin ilmavirtaus koe-elementin sisä- ja ulkopinnoille sekä tuuletusväliin. Kuvassa 5.2 on esitetty kuumalanka-anemometreillä mitatut ilmavirran nopeudet stationääritilanteessa olevasta mittaussysteemistä korkeamman koe-elementin normaalitilanteen U-arvokokeessa kuuden tunnin ajalta. Lämpimässä kammiossa kuumalanka-anemometri oli 100 mm päässä koe-elementin sisäpinnasta ja kylmässä kammiossa 200 mm päässä koe-elementin ulkopinnasta. Koe-elementin tuuletusvälissä kuumalanka-anemometri mittasi ilmavirtausta tuuletusvälin keskikohdassa. Ilmavirtauksia on analysoitu tarkemmin luvussa 5.5.2.



**Kuva 5.2.** Mitatut ilmavirran nopeudet korkeamman koe-elementin U-arvokokeessa 0,06 m/s tuuletusilmavirralla. Arvot on mitattu kuumalanka-anemometreillä.

## 5.2 Stationääritilan saavuttaminen

Stationääritilan saavuttamiseen kulunut aika eri kokeissa on esitetty kuvassa 5.3. Standardi SFS-EN ISO 8990 (1996) esittää, että stationääritila on saavutettu, kun mitatun lämmitystehon sekä lämpötilojen vaihtelu pysyy alle 1 %:ssa kahden vähintään kolmen tunnin mittausjakson ajan. Kuvassa esitetty stationääritilan saavuttamiseen kulunut aika on laskettu kuitenkin kuuden tunnin keskiarvolla, sillä suuressa laitteistossa ja käytetyllä säätöjärjestelmällä tulos ei olisi muuten luotettava.

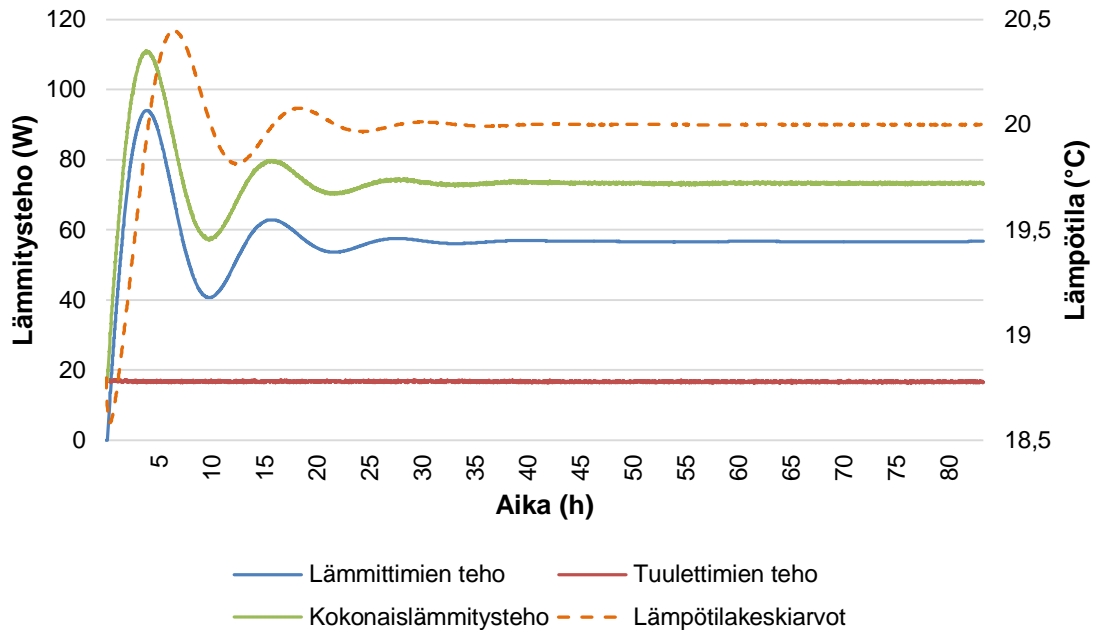


**Kuva 5.3.** Stationääritilan saavuttamiseen kulunut aika tunteina kokeissa, joissa mittaus aloitettiin alusta.

Vaikka standardin vaatima stationääritila saavutettiin kokeissa noin 46–56 tunnin aikana, varsinaisissa mittauksissa käytetyt arvot mitattiin vasta, kun stationääritilan saavuttamisesta oli kulunut 20 tuntia tai enemmän, jotta saatiin mahdollisimman luotettavat mitaustulokset. Korkeamman koe-elementin kokeet ilmapirran nopeuksilla 0,13 m/s ja 0,35 m/s tehtiin jatkettuna mittauksena suoraan edellisen mittauksen jälkeen, joten niistä ei ole tietoa alusta asti stationääritilan saavuttamiseen kuluneesta ajasta. Näissä kokeissa mitaussysteemi oli jo valmiiksi hyvin lähellä tavoiteltuja lämpötiloja, jolloin koetilanteen vaihtamisen jälkeen uuden stationääritilan saavuttamiseen kului aikaa noin vuorokausi.

Kuvasta 5.3 nähdään, että kalibroinnissa stationääritilan saavuttamiseen on kulunut noin 6–10 tuntia kauemmin kuin varsinaisissa kokeissa. Matalamman koe-elementin kalibrointia aloitettaessa lämpimän kammion lähtölämpötila oli jäänyt hieman tavoitelämpötilan 20 °C yläpuolelle, jolloin kokeen aloittamisesta kesti muutama tunti, ennen kuin lämmin kammio oli jäähtynyt tavoitelämpötilan alapuolelle niin, että säätöjärjestelmä alkoi säätämään kammion lämmitystehoa.

Matalamman koe-elementin U-arvokokeiden lähtötilanteessa laitteisto ja koe-elementti olivat täysin normaalitilassa, ja niitä oli säilytetty normaaleissa rakennushallin olosuhteissa. Korkeamman koe-elementin mittauksia aloitettaessa koe-elementti ja laitteisto olivat jo valmiiksi viileitä siirryttäessä korkeamman koe-elementin mittauksiin ja mittauksista toiseen. Korkeamman koe-elementin mittaukset pystyttiin suorittamaan melko pienillä muutoksilla, jolloin laitteisto ei ehtinyt lämmitä kauan kokeiden suorittamisen välissä. Tämän ansiosta stationääritilan saavuttamiseen kulunut aika pieneni noin neljällä tunnilla matalamman koe-elementin kokeeseen verrattuna.



**Kuva 5.4.** Lämpimään kammioon syötetyt lämmitystehot sekä kammion ilman lämpötilat korkeamman koe-elementin U-arvokokeessa 0,06 m/s tuuletusilmavirralla. Lämpötilat ovat 12 säätöanturin keskiarvoja.

Kuvassa 5.4 on esitetty korkeamman koe-elementin normaalitilanteen U-arvokokeen lämmitystehojen ja lämpimän kammion säätöantureiden lämpötilakeskiarvon tasaantuminen. Tuulettimet tuottivat kokeen alusta asti noin 16 W pohjatehon lämpimään kammioon, joka pysyi melko tasaisena koko kokeen ajan. Lämmitystehon tasaantuminen riippui siis ainoastaan lämmittimien tehon tasaantumisesta. Lämpötilojen tasaantuminen seurasi hieman viiveellä lämmitystehon tasaantumista. Lämpötilakeskiarvon vaihtelu oli kuitenkin hyvin pientä jo reilun vuorokauden jälkeen kokeen aloittamisesta.

### 5.3 Kalibrointikokeet

Lämpimän kammion kalibrointikokeet suoritettiin, jotta saatiin selville laitteiston häviölämpövirta  $\Phi_h$ . Kalibrointielementin lähtötiedot laskentaa varten on esitetty taulukossa 5.2. Eri paksuisille XPS-eristeistä koostuville kalibrointielementin osille mitattiin lämmönjohtavuudet, jonka jälkeen kalibrointikoetta varten eri paksuisista XPS-eristeistä muodostetuille kerroksille laskettiin jokaiselle kerroksen lämmönvastus. Koko kalibrointielementin lämmönvastus saatiin yhdistämällä 50 mm, 60 mm ja 100 mm paksuisista XPS-eristeistä muodostettujen kerrosten lämmönvastukset.



**Taulukko 5.2.** Kalibrointieristeiden lämmönvastukset.

Suure		510 mm paksu kalibrointi-eriste	560 mm paksu kalibrointi-eriste
Kalibrointielementin pinta-ala	$A_{kal}$ (m <sup>2</sup> )	3,223	3,223
Kalibrointielementin kokonaiskorkeus	$d_{kal}$ (m)	0,51	0,56
<b>Kalibrointielementin kerrokset</b>			
<b>XPS 100 mm</b>			
Kerroskorkeus	$d_{XPS100}$ (m)	$4 \cdot 0,1 = 0,4$	$4 \cdot 0,1 = 0,4$
Lämmönjohtavuus	$\lambda_{XPS100}$ (W/m·K)	0,0375	0,0375
Lämmönvastus	$R_{XPS100}$ (W/m <sup>2</sup> K)	10,6638	10,6638
<b>XPS 60 mm</b>			
Kerroskorkeus	$d_{XPS60}$ (m)	$1 \cdot 0,06 = 0,06$	$1 \cdot 0,06 = 0,06$
Lämmönjohtavuus	$\lambda_{XPS60}$ (W/m·K)	0,0340	0,0340
Lämmönvastus	$R_{XPS60}$ (W/m <sup>2</sup> K)	1,8105	1,8105
<b>XPS 50 mm</b>			
Kerroskorkeus	$d_{XPS50}$ (m)	$1 \cdot 0,05 = 0,05$	$2 \cdot 0,05 = 0,1$
Lämmönjohtavuus	$\lambda_{XPS50}$ (W/m·K)	0,0331	0,0331
Lämmönvastus	$R_{XPS50}$ (W/m <sup>2</sup> K)	1,4746	2,9491
<b>Lämmönvastus yhteensä</b>	$R_{kal}$ (W/m <sup>2</sup> K)	<b>13,95</b>	<b>15,42</b>

Suoritetuissa mittauksissa kalibrointikokeiden ja niitä vastaavien U-arvokokeiden lämpötilaerot eivät olleet täysin samoja, joten kalibrointitilanteesta laskettiin häviölämpövirran arvot lämpötilamuutosta kohti ( $\Phi_h/\Delta T$ ), joiden avulla korjattiin tutkittavan rakenteen U-arvokokeen tuloksia. Tällöin kalibrointi ja sitä vastaava U-arvokoe saatiin paremmin vertailukelpoiseksi. Kalibrointikokeiden tuloksia ja häviölämpövirran arvot lämpötilamuutosta kohti on esitetty taulukossa 5.3. Tarkemmat mittaustulokset ovat nähtävissä liitteessä C.

**Taulukko 5.3.** Kalibrointikokeiden tuloksia.

	$\Delta T$ (°C)	$\Phi_{kok}$ (W)	$\Phi_h$ (W)	$\Phi_h/\Delta T$ (W/°C)	$q_{kal}$ (W/m <sup>2</sup> )
Kalibrointi 510	20,03	72,17	67,7	3,378	1,40
Kalibrointi 560	20,06	71,96	67,9	3,382	1,27

Kuten taulukon 5.3 tuloksista nähdään, 50 mm kalibrointieristeen lisääminen on lisännyt häviölämpövirran arvoa lämpötilamuutosta kohti vähän, vaikka muutoksen tulisi olla päinvastainen. Korkeammalle kalibrointielementille tehdyssä kalibroinnissa lämpötilaero oli hieman suurempi matalamman kalibrointielementin kalibrointiin verrattuna, mutta tämäkään ei selitä suurempaa häviölämpövirtaa, koska häviölämpövirran arvo oli silti lämpötilamuutosta kohti suurempi. Kalibrointitulokset osoittavat, että reunahäviön muutos on näin paksuilla rakenteilla jo niin pieni, että sitä ei saada enää luotettavasti määritettyä. Tästä voidaan päätellä, että kokeiden suorittamisessa tulee olla todella tarkkana ja koeti-

lanteet tulisi saada tehtyä mahdollisimman samanlaisilla olosuhteilla kuin kalibrointiko-  
keessa, jotta häviölämpövirran arvo pysyisi mahdollisimman lähellä kalibrointiko-  
keessa mitattua arvoa.

## 5.4 U-arvokokeiden tulokset

Koetuloksista laskettiin pinnasta pintaan U-arvo, johon lisättiin standardin SFS-EN ISO 6946 (2008) mukaiset pintavastukset  $0,04 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  ja  $0,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , jotta koetulokset olisivat paremmin vertailtavissa. Koetilanteille laskettiin myös ympäristölämpötilat, joilla otetaan huomioon suojalevyjen vaikutus sisä- ja ulkopinnan lämmönsiirtokertoimiin sekä koko rakenteen lämmönläpäisykertoimeen. Ympäristölämpötilojen avulla laskettiin U-arvot, jotka sisältävät kokeissa vallinneet pintavastukset.

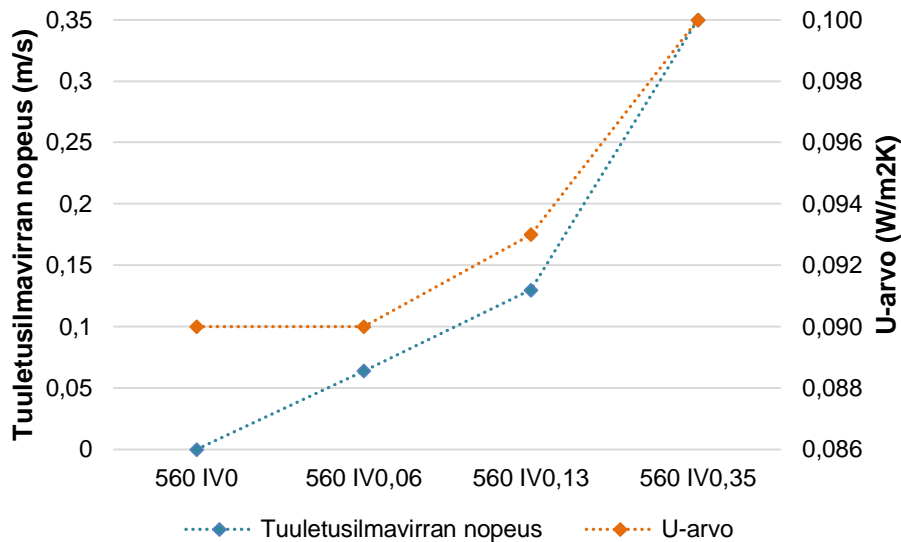
Ensin tutkittiin täyttävätkö koe-elementtien U-arvot Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D3 (2012) mukaisen U-arvon vertailuarvon  $0,09 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ . Tulosten perusteella päätettiin, tehdäänkö ilmavirtaustestit matalammalle vai korkeammalle koe-elementille. Käytännössä mitattu arvo saa olla korkeintaan  $0,090 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , koska standardin SFS-EN ISO 6964 (2008) mukaan lopputuloksena esitettävässä lämmönläpäisykertoimen arvossa täytyy olla kaksi merkitsevää numeroa. Standardin mukaan laskelmia tehtäessä mitään arvoa ei saa pyöristää vähempään kuin kolmeen merkitsevään numeroon ja laskennallisesti määritetyn U-arvon esittämisen yhteydessä tulee toimittaa laskennassa käytetyt lähtötiedot.

Taulukossa 5.4 on esitetty kokeissa mitatut U-arvot sekä matalammalle että korkeammalle koe-elementille normaalitilanteessa ja korkeammalle koe-elementille erilaisilla tuuletusilmavirran nopeuksilla. Tarkemmat kokeissa mitatut arvot ja tulosten laskenta on esitetty liitteessä C. Tuloksista nähdään, että laskennallisilla ympäristölämpötiloilla lasketut lämpötilaerot kylmän ja lämpimän kammion välillä olivat hyvin lähellä kylmästä ja lämpimästä kammioista mitattujen lämpötilojen erotusta. Näin myös kahden merkitsevän numeron mukaan ilmoitetut U-arvot  $U_{koe}$  ja  $U_{0,14}$  olivat samoja.

**Taulukko 5.4.** U-arvokokeiden tulokset, jotka on saatu kuuden tunnin ajalta stationääritilanteesta olleesta mittaussysteemistä. Lämpötilojen keskiarvot on laskettu 12 anturin tulosten keskiarvona.

Koetilanne	$\Delta T$ (°C)	$\Delta T_y$ (°C)	$\phi_{rak}$ (W)	$q_{rak}$ (W/m <sup>2</sup> )	$U_{koe}$ (W/(m <sup>2</sup> K))	$U_{0,14}$ (W/(m <sup>2</sup> K))
U-arvo 510 IV0,07	19,98	19,95	6,501	2,02	<b>0,103</b>	<b>0,103</b>
U-arvo 560 IV0,06	19,98	19,94	5,728	1,78	<b>0,090</b>	<b>0,090</b>
U-arvo 560 IV0,0	20,04	19,99	5,743	1,78	<b>0,090</b>	<b>0,090</b>
U-arvo 560 IV0,13	19,92	19,96	5,866	1,82	<b>0,093</b>	<b>0,093</b>
U-arvo 560 IV0,35	19,85	19,92	6,366	1,98	<b>0,101</b>	<b>0,102</b>

Mittaustulosten mukaan 50 mm normaalia matalampi kattoelementti ei täyttänyt vaadittua kattorakenteiden U-arvon vertailuarvoa. Korkeampi koe-elementti täytti vertailuarvon normaalilla ja normaalia pienemmällä tuuletusilmavirtauksella. Ilmavirtauksen suurentuessa voidaan selvästi nähdä, että koe-elementin U-arvo heikkenee ja suurilla ilmavirran nopeuksilla U-arvo ei täytä enää vertailuarvoa. Kuvassa 5.5 on havainnollistettu tuuletusilmavirran vaikutusta U-arvoon korkeamman koe-elementin mittauksissa. Mittauksia tehtiin neljällä erilaisella tuuletusilmavirran nopeudella.



**Kuva 5.5.** Tuuletusilmavirran nopeuden vaikutus U-arvoon korkeamman koe-elementin mittauksissa.

Ympäristölämpötilojen avulla laskettiin myös kalibrointikokeissa sekä U-arvokokeissa vallinneet pintavastukset, jotka on esitetty taulukossa 5.5. Ulkopinnan pintavastus on laskettu ylälaatan yläpinnalle. Tuloksissa ei ole otettu huomioon, että varsinkin 0,35 m/s tuuletusilmavirran tilanteessa tuuletus on niin suurta, että ilmavälin eristävä vaikutus häviää, jolloin laskennassa ulkopintana voitaisiin käyttää eristeen yläpintaa. Tällaisissa tapauksissa eristeen yläpinnan pintavastuksena saataisiin käyttää myös sisäpinnan pintavastusta 0,10 m²K/W (RakMk C4 2012).

**Taulukko 5.5.** Standardin SFS-EN ISO 6946 (2008) sekä koetilanteiden mukaiset sisä- ja ulkopinnan pintavastukset sekä pintojen lähellä mitatut ilmavirran nopeudet.

	$v_{a,i}$ (m/s)	$R_{si}$ (m²K/W)	$v_{a,e}$ (m/s)	$R_{se}$ (m²K/W)	$R_{s,tot}$ (m²K/W)
SFS-EN ISO 6946	<0,3	<b>0,10</b>	$\geq 2,0$	<b>0,04</b>	<b>0,14</b>
Kalibrointi 510	0,57	0,07	0,86	0,24	0,31
Kalibrointi 560	0,58	0,07	1,23	0,36	0,43
U-arvo 510 IV0,07	0,57	0,08	0,70	0,04	0,12
U-arvo 560 IV0,06	0,58	0,08	1,43	0,04	0,12
U-arvo 560 IV0,0	0,57	0,08	1,09	0,03	0,11
U-arvo 560 IV0,13	0,57	0,08	1,13	0,12	0,20
U-arvo 560 IV0,35	0,57	0,08	0,83	0,17	0,24

Standardin SFS-EN ISO 6946 (2008) vaatimusten mukainen yhdistetty pintavastus tulisi olla vaakarakenteilla  $0,14 \pm 0,01 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Ilmavirtaus rakenteen sisäpinnalla pidettiin noin puolet suurempana kuin standardin suosittama enimmäisarvo, minkä takia sisäpinnan pintavastusten arvot jäivät hieman tavoiteltua matalammiksi. Suurempaa ilmavirtausta käytettiin, jotta ilma saatiin kiertämään hyvin suojalevyjen ympäri tasoittaen lämpimän kammion lämpötilaa. Sisäpinnan pintavastukset korreloivat kuitenkin melko hyvin pinnalta mitattuihin ilmavirran nopeuksiin. Ulkopinnalla standardissa käytettyyn pintavastusarvoon ja lähelle sitä päästiin matalamman ja korkeamman koe-elementin normaalitilanteen U-arvomittauksissa sekä korkeamman koe-elementin mittauksessa, joissa elementin tuuletusväliin ei johdettu ilmavirtausta. Koe-elementin ulkopinnalla vallinneet pintavastukset eivät muissa kokeissa vastanneet ilmavirran nopeuteen oletetulla tavalla, ja pintavastukset nousivat hyvin suuriksi.

## 5.5 Koetulosten luotettavuuden tarkastelu

Vaikka laitteisto on toteutettu mahdollisuuksien mukaan standardien antamin ohjein, on sillä tehtävissä mittauksissa silti suuri joukko epävarmuustekijöitä. Standardeissa ei myöskään ole esitetty sovellusohjeita kaikkia erilaisissa mittaustilanteissa syntyviä käytännön ongelmia ja tilanteita varten.

Jokaiseen mitattavaan suureeseen liittyy mittausepävarmuus, joka kuvaa mittaustuloksen oletettua vaihtelua. Mittausepävarmuus määritetään, jotta tuloksia voitaisiin arvioida luotettavasti, vertailla sekä osoittaa niiden vaatimustenmukaisuus. (JCGM 2008). Suoriteuissa kokeissa suurin vaikutus lämpötekniikan arvojen laskennassa oli lämpötilojen mittausepävarmuudella ja tutkittavan rakenteen läpi siirtyvän lämpövirran mittausepävarmuudella (Vinha 1998).

### 5.5.1 Kokeiden mittausepävarmuus

Jotta kokeiden tulokset olisivat mahdollisimman tarkkoja, on tärkeää varmistua siitä, että laitteiden ja antureiden kalibroinnit ovat voimassa. Taulukossa 5.6 on ilmoitettu laitteistossa käytettyjen antureiden mittaustoleranssit. Kalibroittujen puolijohdeantureiden lämpötilan mittausepävarmuus on määritetty itse ja siihen on otettu huomioon vertailulämpötilan mittausepävarmuus ja lukemataarkkuus, antureiden aiheuttama lukemavirhe, lineaarisuusvirhe ja lukema-arvojen muutokset ajan mukana, lämpötilan epätasainen jakaantuminen kalibrointiastiasissa, jännitemittarin mittausepävarmuus sekä antureiden asennuksesta johtuva mittausepävarmuus (Vinha 1998). Laskennassa käytetyt arvot on esitetty liitteessä E. Muiden antureiden mittaustoleranssit on saatu laitevalmistajilta.

**Taulukko 5.6.** Antureiden mittaustoleranssit, kun niiden kalibroinnit ovat voimassa.

Suure ja anturi	Toleranssit	Ehdot
Lämpötila (puolijohdeanturit)	$\pm 0,4$ °C	-20 °C ... +20 °C
Lämpötila (Vaisala T/RH)	$\pm 0,1$ °C 0,005 °C/°C	20 °C
Suhteellinen kosteus (Vaisala T/RH)	$\pm 2$ % RH	0–90 % RH
	$\pm 3$ % RH	90–100 % RH
Ilmavirtaus (kuumalanka-anemometri)	$\pm 3$ % lukemasta	0,05–2,50 m/s
	$\pm 1$ % valitusta alueesta	

Lämpötila-antureiden mittaustarkkuudella on suuri merkitys laitteiston mittaustarkkuuteen, sillä pienikin lämpötilan muutos vaikuttaa laitteiston läpi siirtyvään lämpövirtaan. Lämpimän kammion lämpötila saatiin pysymään kokeissa tasan 20,00 °C:ssa. Koska kylmän kammion säätöä ei oltu vielä kytketty ohjausohjelmaan, sen lämpötilaa oli vaikeampi hallita. Tästä johtuen mitatut lämpötilaerot eivät pysyneet tasan 20,00 °C:ssa vaan matalammalla koe-elementillä kalibroinnin ja normaalitilanteen U-arvomittauksen lämpötilaerojen välinen ero oli 0,04 °C ja korkeammalla koe-elementillä 0,08 °C. Korkeamman koe-elementin ilmavirtauskokeissa kalibroinnin ja U-arvokokeiden lämpötilaerojen erotus asettui välille 0,02–0,21 °C. Erotus kasvoi sitä mukaa, mitä suurempi ilmavirtaus tuuletusväliin asetettiin. Tästä johtuen arvojen laskennassa käytettiin kalibroinnista saatavaa  $\Phi_h/\Delta T$  -arvoa, jolla pientä lämpötilaerojen vaihtelua eri kokeiden välillä pyrittiin tasamaan. Erilainen lämpötilaero kalibroinnin ja varsinaisten mittausten välillä kuitenkin lisää mittaustulosten epävarmuutta, sillä lämpötilaeron muuttuessa laitteiston läpi siirtyvä lämpövirta saattaa muuttua paljon ja ilman lisäkokeita on hankala varmistua siitä, kuvaako  $\Phi_h/\Delta T$  -suhde muutosta oikein.

Liitteessä E on esitetty laitteiston mittausepävarmuuteen mukaan otettujen suureiden epävarmuudet eri kokeille. Varmuuskertoimena suoritetuille laskelmille on käytetty arvoa  $k = 2$ , mikä tarkoittaa, että noin 95 % tuloksista on lasketun epävarmuuden sisällä (JCGM 2008). Standardissa SFS-EN ISO 12567 (2010) on annettu esimerkkejä ikkunoiden ja ovien lämmönläpäisykertoimen määrittämissä kokeiden virhearvion tekemiseen, joita on hyödynnetty soveltuvilta osin tämän diplomityön mittausten virhearvion laadinnassa. Luotettavamman virhearvion saisi tekemällä laajan koesarjan, joka tukisi laskelmia. Tässä diplomityössä kokeellisia epävarmuustutkimuksia ei kuitenkaan ole suoritettu. Laskennallisesti arvioidut epävarmuudet on esitetty taulukossa 5.7.

Laskettaessa kalibroinnissa kammion läpi siirtyvän lämpövirran, koe-elementin läpi siirtyvän lämpövirran sekä lämmönläpäisykertoimien mittausepävarmuutta käytettiin laskentakaavaa, jolla voidaan laskea useita suureita sisältävän yhtälön lopputuloksen todennäköinen virhe laskemalla virheen kokonaisdifferentiaali osittaisdifferentiaaleista. Osittaisdifferentiaalien avulla laskettiin, kuinka paljon kunkin mitattavan suureen virhe vaikuttaa koko tarkasteltavan funktion virheeseen (Hiltunen et al. 2011; Asdurbali & Balardinelli 2011).

**Taulukko 5.7.** Eri koetilanteissa mitattujen rakenteen läpi siirtyvien lämpövirtojen sekä lämmönläpäisykertoimen mittausepävarmuudet, joiden sisälle 95 % mittaustuloksista asetuu. Tarkemmat laskelmat on esitetty liitteessä E.

Koetilanne	$\Phi_{rak}$	$U_{rak}$
U-arvokoe 510 IV0,06	±2,39 %	±4,76 %
U-arvokoe 560 IV0,06	±2,50 %	±4,99 %
U-arvokoe 560 IV0,0	±2,50 %	±4,39 %
U-arvokoe 560 IV0,13	±2,44 %	±4,86 %
U-arvokoe 560 IV0,35	±2,27 %	±5,09 %

Standardin SFS-EN ISO 8990 (1996) mukaan kokeellisesti on osoitettu, että homogeenisiä materiaaleja testattaessa laitteiston tarkkuus on yleensä ±5 %. Tämän diplomityön mittausten laskennalliset U-arvon mittaustarkkuudet ovat myös noin ±5 %, vaikka tutkitavat koe-elementit eivät olleet homogeenisiä.

## 5.5.2 Koetulosten vertailu standardin vaatimuksiin

Taulukkoon 5.8 on koottu standardien SFS-EN ISO 8990 (1996) ja SFS-EN ISO 12567 (2010) asettamia vaatimuksia ja yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisella tutkimuslaitteistolla mitattuja tuloksia. Taulukossa on vertailtu tuloksia normaalitilanteen U-arvokokeissa, joissa matalammalla koe-elementillä tuuletusilmavirta oli 0,07 m/s ja korkeammalla koe-elementillä 0,06 m/s. Taulukossa ei ole käsitelty korkeamman koe-elementin ilmavirtauskokeiden tuloksia.

**Taulukko 5.8.** Standardien SFS-EN ISO 8990 (1996) ja SFS-EN ISO 12567 (2010) asettamat vaatimukset sekä kokeissa mitatut tulokset matalammalle ja korkeammalle koe-elementille suoritetuissa normaalitilanteen U-arvokokeissa.

Toiminnallinen vaatimus	Standardin vaatimus	Koetus
Sisä- ja ulkoympäristölämpötilojen ero	20 ±2 °C	19,98 °C
Sisälämpötilan vaihtelu stationääritilassa	≤ ±0,2 °C	±0,01 °C
Ulkolämpötilan vaihtelu stationääritilassa	≤ ±0,2 °C	±0,2 °C
Pintalämpötilojen erot keskiarvosta sisällä*	≤ ±3,94 °C	≤ ±0,24 °C
Pintalämpötilojen erot keskiarvosta ulkona*	≤ ±2,64 °C	≤ ±0,66 °C
Ilman lämpötilaerot vaakasuunnassa**	≤ 0,4 °C	≤ 0,32 °C
Ilman lämpötilaerot pystysuunnassa	2 °C/m	< 2 °C/m
Ilmavirran nopeus sisällä	≤ 0,3 m/s	0,57–0,58 m/s
Ilmavirran nopeus ulkona	≥ 2,0 m/s	0,70–1,43 m/s
Kokonaispintavastuksien arvo	0,12 m <sup>2</sup> K/W	0,13–0,15 m <sup>2</sup> K/W
*Enintään 20 % keskimääräisestä pintalämpötilojen erosta.		
**Enintään 2 % ilma-ilma lämpötilaerosta		

Kylmän kammion lämpötilat vaihtelivat enemmän kuin lämpimän kammion. Tämä johtui pakkahuoneen jäädytyksen jaksoittaisesta säädöstä. Standardin SFS-EN ISO 8990 (1996) mukaisesti ulko- ja sisätilan lämpötilojen vaihtelu stationääritilanteessa saa olla enintään ±1 % mitattavasta lämpötilaerosta. 20 °C:n lämpötilaerolla lämpötilat saavat siis vaihdella ±0,2 °C välillä. Myös kylmän kammion lämpötilavaihtelu pysyi kuitenkin juuri standardin sallimissa rajoissa.

Kokeissa mitatut ilmavirran nopeudet koe-elementin pinnoilla eivät olleet aivan standardin SFS-EN ISO 8990 (1996) vaatimusten mukaisia. Standardin mukaan luonnollinen

konvektion ollessa riittämätön vaakarakenteita testattaessa, tulisi käyttää tuulettimia ilman kierrättämiseen, jotta lämpö saataisiin leviämään tarpeeksi tasaisesti ympäri kammiota. Tällöin myös tuulettimien teho tulee mitata ja laskea kokonaislämmitystehon arvoon. Yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisessa tutkimuslaitteistossa käytettiin lämmittimien tuulettimien lisäksi kahdeksaa pientä tuuletinta, jotta lämpö saataisiin siirrettyä tasaisesti joka puolelle lämmintä kammiota. Tämän takia koe-elementin sisäpinnalla vallitsi suurempi ilmavirtaus kuin luonnollisen konvektion aiheuttama ilmavirtaus ( $<0,3$  m/s). Kaikkien tuulettimien vaatima teho mitattiin. Lämpimässä kammiossa ilmavirtausanturi oli sijoitettu koe-elementin keskikohdalle ylhäältä päin katsottuna. Anturi oli sijoitettu suojalevyn ja koe-elementin pinnan puoliväliin eli noin 100 mm päähän koe-elementin pinnasta.

Kylmässä kammiossa oli kaksi kanavapuhallinta, jotka puhalsivat ilmaa suojakammion sisään ja tutkittavan koe-elementin pinnalle. Standardin SFS-EN ISO 12567 (2010) mukaisesti ilmavirtausanturi oli sijoitettu noin puoliväliin tutkittavan koe-elementin pinnan ja suojalevyn väliin. Tällöin ilmavirtausanturi sijoittui noin 200–250 mm etäisyydelle tutkittavan rakenteen pinnasta. Sisä- ja ulkopinnan ilmavirtausten poikkeaminen standardin ohjeistoista vaikutti myös siihen, että yhdistettynä pintavastusten arvot eivät ihan täyttäneet standardin asettamia pintavastusarvoja.

Suojalevyjen olisi hyvä olla hieman suurempia kuin tutkittava rakenne, jotta suojalevyiltä mitattuja pintalämpötiloja voidaan käyttää ympäröivien pintojen keskimääräisenä lämpötilana. Lämpimän ja kylmän kammion suojalevyjen tulisi olla mittausaukon kokoisia, mutta niiden päissä pitäisi kuitenkin olla raot ilman kiertoa varten. Yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisen tutkimuslaitteiston muodosta johtuen sisätilan suojalevyt eivät voineet olla yhteensä mittausaukon kokoisia, koska niiden täytyi olla liikuteltavissa siten, että laitteiston pohjalla voitiin työskennellä valmisteltaessa koetilanteita. Ilma ei myöskään olisi kiertänyt kammiossa, jos suojalevyt olisivat ylettyneet lämpimän kammion reunoihin asti. Kokeiden aikana lämpimän kammion suojalevyt oli asetettu niin, että suojalevyn ja laitteiston reunan väliin jäi päissä 250 mm ja reunoilla 220 mm, jolloin ilman kierto saatiin riittäväksi. Tämän diplomityön mittauksissa lämpimän kammion suojalevyt ylettyivät myös melkein koko koe-elementin alueelle, koska koe-elementti ei ollut koko mittausaukon kokoinen. Myös laitteiston seinäpinnat ja lattia olivat väriltään mustia, joten koe-elementin alapinnan näkemien pintojen emissiviteetit olivat suunnilleen samoja kuin suojalevyillä.

Kylmässä kammiossa suojalevyt ylettyivät pituussuunnassa noin 4 cm todellisen tutkimusaukon reunojen yli ja leveyssuunnassa suojalevyjen leveys jäi molemmissa reunoissa noin 2 cm todellisen tutkimusaukon reunoista. Voidaan kuitenkin olettaa, että tämän diplomityön mittauksissa kylmän kammion suojalevyjen koko oli riittävä koe-elementin kokoon nähden ja koe-elementin pinnan näkemät pinnat olivat suurimmaksi osaksi mattamustia.



Lämpimän ja kylmän kammion suojalevyjen pintalämpötila-anturit sekä ilmalämpötila-anturit eivät olleet aivan samoilla kohdilla toisiinsa nähden, sillä lämpimän kammion suojalevyjen pinta-ala oli hieman pienempi kuin kylmän kammion ja standardin SFS-EN ISO 12567 (2010) mukaan anturit tulisi asettaa vähintään 100 mm etäisyydelle suojalevyjen reunoista. Sen sijaan mittausten tarkkuuden kannalta tärkeimmät anturit eli koe-elementin pintalämpötila-anturit olivat samoilla kohdilla elementin sisä- ja ulkopinnassa.

Standardeissa ei ole esitetty sovellusohjeita kaikkia tämän diplomityön mittausten tilanteita varten. Esimerkiksi tuuletusvälin ilmavirtausten arvojen valintaan tai säätämiseen ei ole ohjeita standardeissa. Tässä tutkimuksessa suunniteltiin ja toteutettiin koejärjestely, jolla haluttu ilmavirran nopeus voitiin toteuttaa koe-elementin tuuletusväliin ilmavirtauskammion avulla. Ilmavirtauskammion toimintaa testattiin ennen varsinaisten kokeiden aloittamista, jotta koe-elementin tuuletusväliin johdettava ilmavirtaus saatiin mahdollisimman tasaiseksi.

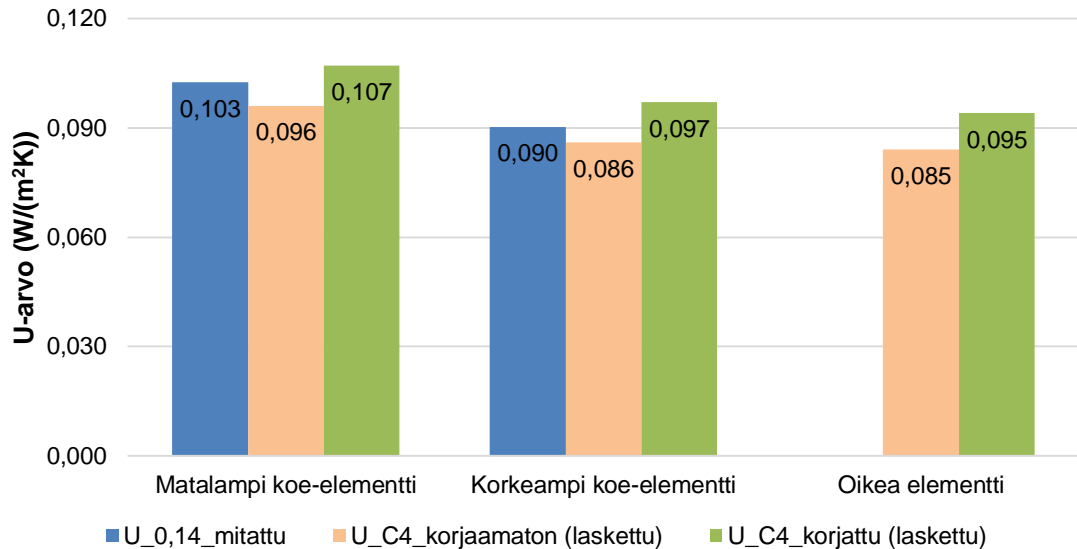
### 5.5.3 Koetulosten vertailu RakMk C4 mukaiseen laskentaan

Matalammalle ja korkeammalle koe-elementille sekä todelliselle Kerto-Ripa -kattoelementille laskettiin vertailuksi Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C4 (2012) mukaiset U-arvot. Laskennassa käytettiin materiaaliominaisuuksina mitattuja tuloksia kertosuun ja mineraalivillan osalta, jotta tulokset vastaisivat mahdollisimman hyvin todellista tilannetta. Kipsilevyn ja vanerin lämmönjohtavuuksina käytettiin keskimääräisiä arvoja RakMk:n osan C4 (2012) mukaan.

Koska normaalitilanteessa koe-elementin tuuletus oli vain vähäistä, laskennassa oletettiin, että ilmaväli oli kokonaan eristävänä osana rakennetta. Tällöin RakMk C4:n (2012) mukaan 50 mm tuulettumattoman ilmakerroksen lämmönvastus lämpövirran suunnan ollessa ylöspäin on  $0,16 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Tätä arvoa voidaan käyttää, jos lämpötilaero ilmavälin pintojen välillä on enintään  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C4 mukainen laskenta on esitetty liitteessä D. Kuvassa 5.6 näkyy mittaustulosten ja laskennallisten tulosten välinen ero. Mitatuissa tuloksissa etuna on se, että U-arvoa heikentäviä korjaustekijöitä ei tarvitse enää ottaa huomioon, koska kyseiset tekijät ovat jo mukana mittaustuloksissa.

Tutkimuksessa laskettiin vertailuksi myös korjattu U-arvo, jossa otettiin huomioon eristeen sisällä mahdollisesti olevat ilmaraoit ja eristeen epätäydellinen asennus. Tutkimuksen koe-elementtien eristeet kuitenkin näyttivät silmämääräisesti olevan hyvin asennettuja. U-arvon korjaustermi tulee kuitenkin ottaa huomioon laskennallisessa tarkastelussa, koska laskettu U-arvon korjaustermi ei jäänyt alle 3 % lasketusta U-arvosta. Ilmaraoista aiheutuvan korjaustekijän arvona on käytetty Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C4 (2012) mukaista tason 1 arvoa  $\Delta U'' = 0,01 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , jolloin standardin mukaan lämmöneristeessä on eristeen läpäiseviä ilmarakoja, jotka eivät kuitenkaan aiheuta ilman

kiertokulkua lämmöneristeen lämpimän ja kylmän puolen välillä. Koe-elementin levyviljojen liitoskohdat oli asetettu limittäin, joten ainakaan yhtenäistä ilmarakoa eristeen alapinnasta yläpintaan kokeissa ei syntynyt. Laskennallisessa korjatussa U-arvossa ei otettu huomioon mekaanisten kiinnikkeiden tai muiden pistemäisten kylmäsiltojen aiheuttamaa korjausta.



**Kuva 5.6.** Mitattujen ja laskennallisten U-arvojen ero. Siniset pylväät kuvaavat kokeessa mitattuja U-arvoja. Laskennallisissa arvoissa ilmaväli on oletettu kokonaan eristäväksi osaksi rakennetta. Korjatussa U-arvossa on mukana ilmaraoista aiheutuva korjaustekijä.

Laskennassa tuuletusväli oletettiin eristäväksi osaksi rakennetta, mutta todellisessa tilanteessa se ei ollut täysin eristävä, sillä tuuletusväliin johdettiin ilmavirtausta, jonka nopeus oli matalamman koe-elementin tapauksessa 0,07 m/s ja korkeamman koe-elementin tapauksessa 0,06 m/s. Käytössä olevissa Kerto-Ripa -kattoelementeissä tehtyjen mittausten (Leivo et al. 2013) perusteella elementin tuuletusvälissä virtasi 0,011–0,045 m/s ilmavirtaus. Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C4 (2012) mukaan, kun rakenneosassa on hyvin tuulettuva ilmakerros, ei ilmakerrosta ja sen ulkopuolella olevia rakenteita oteta mukaan U-arvon laskentaan. Ulkopinnan pintavastuksena käytetään tällöin myös sisäpinnan pintavastusta, joka on kattojen tapauksessa 0,10 m<sup>2</sup>K/W. Hyvin tuulettuvan elementin laskentaperiaatteilla laskettuna matalamman koe-elementin laskennalliseksi korjaamattomaksi U-arvoksi saataisiin 0,099 W/(m<sup>2</sup>K) ja korkeamman koe-elementin tapauksessa 0,089 W/(m<sup>2</sup>K). Mittauksissa mitattiin kuitenkin koko koe-elementin U-arvo, jossa olivat mukana myös ilmaväli ja ylälaatta.

Tulosten perusteella korjattu laskennallinen U-arvo on hieman mitattua arvoa suurempi. Korjauksessa on otettu huomioon ilmaraot ja eristeen epätäydellinen asennus. Tulosten perusteella voidaan päätellä, että koe-elementein eriste on asennettu hyvin ilman suurem-

pia ilmarakoja. Tällaisessa tapauksessa mittauksella saadaan etua laskennalliseen määrittelykseen nähden, koska mitattuun tulokseen ei tarvitse enää lisätä laskennallisia korjaustermejä.

Tutkittavassa koe-elementissä oli 40 mm leveämpi eristetila kuin normaalin Kerto-Ripa -kattoelementin puolikkaassa, joka johtaa siltä osin hieman todellista parempaan mitattuun U-arvotulokseen. Tämän takia tilanteesta tehtiin laskennallinen tarkastelu, jotta voitiin varmistaa, että todellinen Kerto-Ripa -kattoelementti täyttää vaaditun U-arvon tästä huolimatta. Laskenta on esitetty viimeisenä liitteessä D. Kun käytetylle koe-elementille lasketusta U-arvosta vähennettiin oikean kattoelementin eristetilan leveydellä lasketun elementin U-arvo, saatiin tulokseksi  $0,00022 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Jos tämä tulos lisätään mitattuun U-arvoon, saadaan sen pyöristetyksi arvoksi edelleen  $0,090 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Tästä voidaan päätellä, että mitattua U-arvotulosta voidaan käyttää hyvin myös normaalin Kerto-Ripa -kattoelementin U-arvotuloksena.

Tutkittavan rakenteen reuna muodostaa kylmäsilan, joka lisää lämpövirtaa koerakenteen läpi. Tästä johtuen kalibroidun lämmönläpäisylaitteen menetelmällä mitatuissa U-arvoissa kylmäsilta vaikutus heikentää hieman U-arvotulosta. Reunan aiheuttaman häviön vaikutus korostuu yleensä paksuilla rakenteilla ja voidaan olettaa, että tehdyissä kokeissa tutkittaessa 510 mm ja 560 mm paksuja rakenteita sillä on ollut jo vaikutusta. Tutkimusaukon reunan hyvä lämmöneristys vähentää kylmäsilta vaikutusta. Yksi ratkaisu reuna-alueen kylmäsilta vaikutuksen eliminoimiseksi on guarded hot box -menetelmä, jossa tutkittavan rakenteen läpi siirtyvä lämpövirta määritetään suojakammion sisällä erillisen mittaustilatikon alueelta. Tämä voidaan tehdä kaukana tutkimusaukon reunoista. Tämän diplomityön koe-elementin U-arvon mittausta ei olisi voitu suorittaa guarded hot box -menetelmällä, koska silloin ei olisi saatu kokonaiskäsitystä koko elementin lämpötekniisestä toiminnasta, missä reunojen puurakenteet ovat suuressa roolissa.

Reunojen kylmäsilta vaikutusta on vaikea arvioida, sillä koe-elementti ei ollut homogeeninen. Jos rakenteen sisällä muodostui eristeessä sisäistä konvektiota, se saattoi jäähtyä eristereunusta ja voimistaa siten lämmön johtumista eristereunuksessa ja tutkimusaukon reunoissa. Myös eristereunuksen ja laitteiston sekä eristereunuksen ja koe-elementin välissä oleviin polypropeenieristeellä täytettyihin asennusvaroihin saattaa aiheutua sisäistä konvektiota, joka voi kuljettaa lämpöä kylmän ja lämpimän kammion välillä. Reunaeristeiden sisäistä konvektiota pyrittiin estämään teippaamalla reunat niin, että ulkopuolelta ei päässyt ilmavirtausta asennusvarojen eristeisiin.

## 6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Kokeissa selvitettiin Metsä Woodin Kerto-Ripa -kattoelementin lämpötekniisiä ominaisuuksia. Koska koe-elementti suunniteltiin kokeen vaatimusten perusteella, täytyi tulosten tarkastelussa ottaa huomioon monia tuloksiin vaikuttavia tekijöitä. Tässä luvussa on esitetty myös johtopäätöksiä uuden yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisen tutkimuslaitteiston toiminnasta.

### 6.1 Koetulokset

Kerto-Ripa -kattoelementti on normaalisti 15–20 metriä pitkä. Koe-elementin pituus oli 2,5 metriä, joten suhteessa lyhyt koe-elementti ei kuvannut täysin totuudenmukaisesti oikean rakenteen käyttäytymistä esimerkiksi tuuletusvälin ilmavirtauksen osalta. Normaalissa kattoelementtiä kannattelee molemmilla reunoilla 39 mm leveät Kerto-S -palkit ja keskellä 51 mm Kerto-S -palkki. Normaalisissa kattoelementeissä on siis kolme tukiripaa, joiden väliin jää kaksi eristetilaa. Koska kokonainen elementti oli liian leveä tutkittavaksi yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisella tutkimuslaitteistolla, täytyi koe-elementiksi valita pienempi osa Kerto-Ripa -kattoelementistä. Jotta koe-elementillä mitattu tulos olisi vastannut parhaiten myös koko elementin U-arvoa, olisi mittaukset pitänyt tehdä tarkastelemalla normaalin kattoelementin puolikasta. Koe-elementissä toinen tukirivoista oli kuitenkin 1,5 mm normaalin keskimmäisen tukirivan puolikasta paksumpi. Tämä aiheutti koe-elementtiin suhteessa hieman suuremman kylmäsillan oikeaan kattoelementtiin verrattuna. Myös päätälevy oli koe-elementin kokoon nähden suhteessa paksumpi kuin oikeassa kattoelementissä.

Kerto-Ripa -elementin tuuletusvälissä tehdyissä mittauksissa tuuletusilmavirran nopeus vaihteli 0,011–0,045 m/s välillä. Suoritetuissa kokeissa normaalitilanteen ilmavirran nopeudeksi valittiin hieman normaalitilanteissa vaikuttavaa suurinta ilmavirtausta suurempi virtaus, joka oli matalamman koe-elementin mittauksissa 0,07 m/s ja korkeamman koe-elementin mittauksissa 0,06 m/s. Myös tämä valinta johti hieman varmalla puolella olevaan mitattuun U-arvotulokseen.

Koe-elementissä oli käytetty 40 mm leveämpää eristetilaa kuin normaalissa Kerto-Ripa -kattoelementissä, mikä parantaa hieman koe-elementin eristävyttä normaalien Kerto-Ripa -kattoelementtien puolikkaaseen verrattuna. Tilannetta tutkittiin laskemalla U-arvot koe-elementille sekä elementille, joka oli muuten mitoiltaan koe-elementin kaltainen, mutta eristetila oli normaalin Kerto-Ripa -kattoelementin eristetilan levyinen. Leveämpi eristetila paransi koe-elementin eristävyttä  $0,00022 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

Matalamman koe-elementin U-arvotulokseksi normaalitilanteessa saatiin  $0,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , joten sellaisenaan koe-elementti ei täyttänyt Suomen rakentamismääräyskokoelman osan

D3 mukaista yläpohjarakenteiden vertailuarvoa. Mikäli matalampi elementti haluttaisiin ottaa käyttöön, täytyisi siinä käyttää tehokkaampaa lämmöneristettä ja mahdollisesti tuulensuojakalvoa eristeen pinnalla eristetyypistä riippuen. Toisenlaisen elementtityypin käyttö edellyttäisi kuitenkin, että laskenta ja U-arvokokeet suoritettaisiin uudelleen.

Korkeamman normaalipaksuisen eristekerroksen sisältävän koe-elementin U-arvoksi mitattiin  $0,090 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Koe-elementin mittaustulosta heikensivät hieman suurempi kylmäsilta-vaikutus ja tuuletusilmavirran nopeus sekä calibrated hot box -menetelmällä mitattaessa tapahtuva reunan kylmäsilta-vaikutus. Jos koe-elementissä käytetyn leveämmän eristetilan tuoma hyöty otetaan huomioon mitattuun U-arvotulokseen, saadaan silti elementin U-arvoksi  $0,090 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Tuloksista voidaan todeta, että todellinen Kerto-Ripa-kattoelementti täyttää U-arvovaatimukset ilmavirtausten ja lämpötilaerojen suhteen tavanomaisissa olosuhteissa Suomessa. Laskennallisesti korjatuksi U-arvoksi korkeammalle koe-elementille saatiin hieman suurempi arvo kuin mittaamalla. Tästä voidaan päätellä, että koe-elementin eriste oli hyvin asennettu eikä siihen ollut jäänyt juurikaan ilmaraajoja. Tällaisessa tapauksessa mittauksella saadaan etua laskennalliseen määrittämiseen nähden, koska mitattuun tulokseen ei tarvitse enää lisätä laskennallisia korjaustermejä, jotka eivät välttämättä kuvaa oikein todellista tilannetta.

Korkeammalle koe-elementille tehtiin myös ilmavirtauskokeita. Teorian mukaan paras U-arvotulos saataisiin, kun tuuletusvälissä ei kulkisi ollenkaan ilmavirtausta, jolloin paikallaan olevan ilman eristävä vaikutus olisi kokonaan mukana U-arvossa. Ilman ilmavirtausta ja normaalilla ilmavirtauksella tehdyt testit antoivat kuitenkin mittauksissa pyöristettynä saman U-arvon  $0,090 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , vaikka voisi olettaa, että ilman ilmavirtausta tehdyssä kokeessa tuhannesosan kohdalla olisi tapahtunut pieni parannus U-arvossa. Kyseisen kokeen U-arvon mittaustarkkuudeksi määritettiin  $\pm 4,4 \%$ .

U-arvo heikkenee tuuletusilmavirran lisääntyessä, sillä paikallaan olevan ilman eristävä vaikutus häviää. Suurella ilmavirran nopeudella eristeessä alkaa tapahtua myös sisäistä konvektiota, mikä heikentää rakenteen U-arvoa. Sisäistä konvektiota voidaan pyrkiä estämään esimerkiksi asettamalla tuulensuojakalvo eristeen päälle. FRAME-tutkimuksessa (Vinha et al. 2013; Pakkanen 2012) tehtiin yläpohjarakenteiden U-arvokokeita ja tarkasteltiin lämmöneristekerroksessa tapahtuvaa sisäistä konvektiota. Tutkimuksessa tutkittiin pelkkiä lämmöneristeitä eivätkä todellisuudessa eristeen ympärillä olevat rakenteet olleet mukana mittauksissa. Tutkimuksessa 600 mm levyvillakerrokselle saatiin laskennallisesti U-arvoksi  $0,056 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Kokeissa normaalitilanteessa eristeen pinnalle luotiin ilmavirtaus, jonka nopeus oli  $0,06 \text{ m/s}$ . Tällöin U-arvoksi saatiin mittaamalla  $0,073 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Kun samassa tilanteessa villakerroksen päälle asetettiin tuulensuojakalvo, rakenteen U-arvoksi mitattiin  $0,055 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Tulosten perusteella voidaan olettaa, että sisäinen konvektio vaikuttaa myös levyvillaeristeessä, vaikka puhallusvillassa vaikutus on suurempi. Tämän diplomityön tutkimuksissa koe-elementtien eristeiden päällä ei ollut tuulensuojakalvoa, joten sisäistä konvektiota on oletettavasti tapahtunut mittauksissa, joissa koe-elementin ilmaväliin johdettiin ilmavirtausta.

## 6.2 Yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisen tutkimuslaitteiston toiminta

TTY:n yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalinen tutkimuslaitteisto valmistui tämän diplomityön mittauksia varten marraskuussa 2016. Laitteisto pyrittiin rakentamaan standardin SFS-EN ISO 8990 (1996) vaatimusten mukaisesti. Normaalityönteiden kokeissa suurin osa standardin vaatimuksista täyttyivät.

Lämpimän kammion lämpötila tasaantui todella hyvin tavoitearvoon, mistä voidaan päätellä, että säätöjärjestelmä on toimiva ja säätökertoimet on valittu hyvin. Stationääritilan saavuttaminen koetilanteissa kesti 46–56 tuntia. Stationääritila saavutettiin nopeammin kokeissa, jotka aloitettiin pian edellisen kokeen jälkeen, jolloin laitteisto ja tutkittava koeelementti olivat jo valmiiksi lähempänä tavoiteltavia olosuhteita.

Ulkoilman lämpötila vaihteli stationääritilanteessa  $\pm 0,2$  °C välillä pakkahuoneen oman säätöjärjestelmän takia. Pakkahuoneen säätö oli jaksottaista. Pakkahuoneen tavoitelämpötilaa säädettiin käsin, joten kylmän kammion lämpötila oli vaikea saada asettumaan täysin samaan arvoon eri kokeiden välillä. Tästä voidaan päätellä, että pakkahuoneen lämpötilan säätö täytyy saada mukaan ohjausohjelmaan, jotta sen tarkkuutta saadaan parannettua.

Tutkimusaukon ja reunan välinen suhde vaikuttaa kokeiden tuloksiin, sillä lämpövirta ei säily yksidimensionaalisen laitteiston reuna-alueella. Rakenteen reunan kylmäsiltavaikutus pienenee, kun tutkimusaukon koko reunan määrään kasvaa. Yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisen tutkimuslaitteiston tutkimusaukon pinta-ala on  $5,02$  m<sup>2</sup>, mikä täyttää standardien asettamat vaatimukset ja on  $3,58$  m<sup>2</sup> suurempi kuin edellisen yläpohjarakenteiden tutkimukseen TTY:llä rakennetun laitteiston tutkimusaukko.

Lämpimän kammion häviölämpövirran määrityksen tarkkuus vaikuttaa suurelta osin myös koetulosten tarkkuuteen. Tutkimuslaitteiston kalibrointi on tärkeää, sillä reunahäviö muuttaa häviölämpövirran arvoa, kun tutkittavan rakenteen paksuus muuttuu. Paksuilla yläpohjarakenteilla häviölämpövirran muutoksen määrittäminen rakenteen paksuuden muuttuessa on epävarmempaa ja se lisää U-arvon mittausepävarmuutta.

Lämpimässä kammiossa ilmavirran nopeus oli kokeissa suurempi, kuin standardin SFS-EN 8990 (1996) asettama vaatimus, jotta lämpö saatiin tasoitettua mahdollisimman tasaiseksi koko lämpimän kammion sisällä. Tulevissa kokeissa voitaisiin testata tasaantuvatko lämpötilat kammiossa yhtä hyvin myös pienemmällä määrällä tuulettimia. Tällöin jäljelle jätettävien tuulettimien paikat kannattaa muuttaa niin, että ne on asetettu tasaisin välimatkoin suojalevyjen pintaan tuulettimien määrästä riippuen.

Tämän diplomityön mittauksille laadittiin laskennallisesti mittausepätkkuudet. Laskennalliseksi epätarkkuudeksi suoritetuille U-arvokokeille saatiin  $\pm 5\%$ . Suuressa itse rakennetussa laitteistossa on kuitenkin paljon tekijöitä, joita on vaikea arvioida luotettavasti laskelmien avulla. Laitteiston tarkempi toiminnan arvio ja tutkiminen vaatisi laajemman koesarjan homogeenisilla koekappaleilla, minkä perusteella voitaisiin arvioida luotettavammin laitteiston mittausepätkkuutta ja kokeiden toistettavuutta.

## 7. YHTEENVETO

Tässä tutkimuksessa selvitettiin Metsä Woodin Kerto-Ripa -kattoelementin lämpöteknistä toimintaa kalibroidun lämmönläpäisylaitteen (calibrated hot box) menetelmällä. Mittaukset suoritettiin TTY:n rakennushallissa yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisella tutkimuslaitteistolla. Tässä diplomityössä kuvattiin myös uuden yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisen tutkimuslaitteiston rakenteita ja toimintaa.

Tutkimuslaitteiston koko asetti vaatimuksia tutkittavalle koe-elementille. Koe-elementti oli vain osa oikeasta Kerto-Ripa -kattoelementistä, mikä täytyi ottaa huomioon koetulosten tulkinnessa. Koe-elementti suunniteltiin yhdessä Metsä Woodin kanssa, jonka jälkeen Metsä Wood valmisti koe-elementin ja toimitti sen TTY:n rakennushalliin.

Taulukossa 7.1 on esitetty todellisen Kerto-Ripa -kattoelementin ja koe-elementtien keskeisimmät erot. Mittauksissa saatiin hieman varmalla puolella oleva tulos, koska toinen tukiripa oli 1,5 mm normaalin tukirivan puolikasta paksumpi, päätylevy oli koe-elementin kokoon nähden suhteessa paksumpi kuin oikeassa kattoelementissä ja koe-elementin tuuletusväliin johdettu ilmavirtaus oli hieman normaalia elementin tuuletusvälissä virtaavaa ilmavirtausta suurempi. Koe-elementin eristetila oli kuitenkin hieman leveämpi kuin oikeassa Kerto-Ripa -kattoelementissä. Luvussa 5.5.3 todistettiin laskennallisesti, että korkeamman koe-elementin tapauksessa se ei kuitenkaan vaikuttanut pyöristettyyn koetulokseen heikentävästi.

**Taulukko 7.1.** Kerto-Ripa -kattoelementin ja koe-elementtien keskeisimmät erot.

	<b>Kerto-Ripa</b>	<b>Koe-elementit</b>
Leveys	2495 mm (kaksi eristetilaa)	1289 mm (yksi eristetila)
Pituus	15–25 m	2,5 m
Lämmöneristeen paksuus	450 mm	400 mm ja 450 mm
Eristetilan leveys	1183 mm	1223 mm
Tukirivat	reunoilla 39 mm Kerto-S ja keskellä 51 mm Kerto-S	39 mm ja 27 mm Kerto-S
Ylälaatan	31 mm Kerto-Q	21 mm vaneri
Ylälaatan kiinnitys	rakenteellinen liimaus	mekaaniset kiinnikkeet
Päätylevy	15 mm vaneri	9 mm vaneri

U-arvo mitattiin koko kattoelementistä, jossa oli mukana myös tuuletusvälin ja vesikatteen lämpöä eristävä vaikutus. Näin oli mahdollista tehdä, koska kattoelementin tuuletus on tyypillisesti melko vähäistä. Kattoelementille määritettyä U-arvoa voidaan käyttää suoraan rakenteen U-arvona energiateknisesti vaatimusten mukaisuutta osoitettaessa, sillä kokeellinen määrittäminen suoritettiin standardin SFS-EN ISO 8990 (1996) mukaisella



laboratoriomittauksella. Mitattuun U-arvoon ei tarvitse ottaa laskennallisia korjaustekijöitä huomioon.

Tutkimuksessa selvitettiin, täyttääkö Metsä Woodin Kerto-Ripa -kattoelementti Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa D3 (2012) esitetyn U-arvon vertailuarvon myös 50 mm normaalia matalammalla lämmöneristekerroksella. Matalamman koe-elementin U-arvotulokseksi normaalitilanteessa tuuletusilmavirran nopeudella 0,07 m/s saatiin 0,10 W/(m<sup>2</sup>K), joten sellaisenaan elementti ei täyttänyt vaatimuksia. Mikäli matalampaa koe-elementtiä halutaan käyttää, täytyisi siihen vaihtaa tehokkaampaa lämmöneristettä ja mahdollisesti asettaa tuulensuojakalvo eristeen pinnalle eristetyypistä riippuen. Uuden elementin käyttö edellyttäisi kuitenkin, että laskenta ja U-arvokokeet suoritettaisiin uudelleen ennen kuin uuden elementin U-arvovaatimusten täyttymisestä voitaisiin olla varmoja.

Matalamman koe-elementin kokeiden jälkeen koe-elementtiä korotettiin normaaliin korkeuteen, jolloin koe-elementissä oli 450 mm lämmöneristekerros. Korkeammalle koe-elementille mittaukset suoritettiin normaalitilanteelle, jossa koe-elementin tuuletusvälin ilmavirtaus oli 0,06 m/s sekä normaalista poikkeaville tilanteille, joissa tuuletusilmavirtaukset olivat 0,0 m/s, 0,13 m/s ja 0,35 m/s. Koonti kaikkien mittausten tuloksista on esitetty taulukossa 7.2. Tarkemmat mittaustulokset ja laskenta on esitetty liitteessä D.

Normaalitilanteessa korkeammalle koe-elementille U-arvoksi saatiin 0,090 W/(m<sup>2</sup>K), joten tehtyjen tutkimusten perusteella voidaan todeta, että myös todellinen Kerto-Ripa -kattoelementti täyttää vaaditun vertailuarvon ilmavirtausten ja lämpötilaerojen suhteen tavanomaisissa olosuhteissa Suomessa, koska mitattu tulos oli hieman varmalla puolella. Koetuloksista nähdään, että ilmavirran nopeuden kasvaessa elementti ei täytä enää vaadittua U-arvoa. Tämä johtuu tuuletusvälin lämpöä eristävän ominaisuuden häviämisestä sekä siitä, että tuuletusilmavirta aiheuttaa sisäistä konvektiota eristeeseen.

Matalammalle ja korkeammalle koe-elementille sekä oikealle Kerto-Ripa -kattoelementille laskettiin vertailuksi Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C4 (2012) mukaiset U-arvot. Laskennallisesti korjatuksi U-arvoksi korkeammalle koe-elementille saatiin hieman suurempi arvo kuin mittaamalla. Tästä voidaan päätellä, että koe-elementin eriste oli hyvin asennettu eikä siihen ollut jäänyt juurikaan ilmarakoja. Tällaisessa tilanteessa mittauksella saadaan etua laskennalliseen määritykseen nähden, koska mitattuun tulokseen ei tarvitse enää lisätä laskennallisia korjaustermejä.

*Taulukko 7.2. Koonti U-arvokokeiden mittaustuloksista.*

Suure	Yksikkö	510 IV0,07	560 IV0,06	560 IV0,0	560 IV0,13	560 IV0,35
$v_{a,iv}$	m/s	0,07	0,06	0,00	0,13	0,35
$T_i$	°C	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
$T_e$	°C	0,02	0,02	-0,04	0,08	0,15
$T_{n,i}$	°C	19,93	19,92	19,92	19,92	19,92
$T_{n,e}$	°C	0,03	-0,02	-0,07	-0,03	0,01
$\Delta T$	°C	19,98	19,98	20,04	19,92	19,85
$T_{si}$	°C	19,78	19,77	19,78	19,78	19,77
$T_{se}$	°C	0,06	0,05	-0,01	0,18	0,33
$T_{bi}$	°C	19,82	19,82	19,82	19,82	19,82
$T_{be}$	°C	-0,23	-0,22	-0,28	-0,16	-0,06
$v_{a,i}$	m/s	0,57	0,58	0,57	0,57	0,57
$v_{a,e}$	m/s	0,7	1,43	1,09	1,13	0,83
$RH_i$	% RH	19,1	20,1	19,5	19,9	20,1
$Rh_e$	% RH	78,9	76,6	73,4	76,4	74,5
$\Phi_h$	W	57,51	67,58	67,79	67,38	67,15
$P_{kok}$	W	74,01	73,31	73,53	73,25	73,52
$\Phi_{rak}$	W	6,5	5,73	5,74	5,87	6,37
$q_{rak}$	W/m <sup>2</sup>	2,02	1,78	1,78	1,82	1,96
$R_{si}$	m <sup>2</sup> K/W	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
$R_{se}$	m <sup>2</sup> K/W	0,04	0,04	0,03	0,12	0,17
$U_{koe}$	W/m <sup>2</sup> K	<b>0,10</b>	<b>0,090</b>	<b>0,090</b>	<b>0,093</b>	<b>0,10</b>
$U_{0,14}$	W/m <sup>2</sup> K	<b>0,10</b>	<b>0,090</b>	<b>0,090</b>	<b>0,093</b>	<b>0,10</b>

Lämpimän kammion säätöjärjestelmä osoittautui toimivaksi, sillä lämpimän kammion lämpötila tasaantui todella hyvin tavoitearvoon ja stationääritila saavutettiin 46–56 tunnissa. Kylmän kammion lämpötilan vaihtelu oli suurempaa, koska säätö tapahtui pakkashuoneen oman säätöjärjestelmän avulla jaksottaisesti. Ulkolämpötilan vaihtelu pysyi kuitenkin sallituissa rajoissa. Jatkossa pakkashuoneen säätö aiotaan lisätä mukaan ohjausohjelmaan tulosten tarkkuuden parantamiseksi.

Tehtyjen kokeiden osalta laitteiston mittausepä-tarkkuudeksi määritettiin laskennallisesti  $\pm 5\%$ . Suuressa itse rakennetussa laitteistossa on kuitenkin paljon tekijöitä, joita on vaikea arvioida luotettavasti laskelmien avulla. Laitteiston tarkempi toiminnan arvio ja tutkiminen vaatisi laajemman koesarjan homogeenisilla tutkimuskappaleilla, minkä perusteella voitaisiin arvioida luotettavammin laitteiston mittausepä-tarkkuutta.

## LÄHTEET

Asdurbali, F. Baldinelli, G. (2011). Thermal transmittance measurements with the hot box method: Calibration, experimental procedures, and uncertainty analyses of three different approaches. *Energy and Buildings*. 43. pp. 1618–1626.

ASTM C518. (2004). Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus. American Society for Testing and Materials.

Bergman, T. Lavine, A. Incropera, F. Dewitt, D. (2011) Fundamentals of heat and mass transfer, seventh edition. John Wiley & Sons Ltd, New Jersey, United States of America. 1050 p.

Defraeye, T. Blocken, B. Carmeliet, J. (2011). Convective heat transfer coefficients for exterior building surfaces: Existing correlations and CFD modeling. *Energy Conversion and Management*. 52 (1). pp. 512–522.

Elmahdy, A. H. Haddad, K. (2000). Experimental procedure and uncertainty analysis of a guarded hotbox method to determine the thermal transmission coefficient of skylights and sloped glazing. *ASHRAE Transactions*. 106 (2). pp. 601–613.

Emmel, M. Abadie, M. Mendes, N. (2007). New external convective heat transfer coefficient correlations for isolated low-rise buildings. *Energy and Buildings*. 39. pp. 335–342.

Finnfoam. (2017). Koostumus ja rakenne. Viitattu 15.2.2017. Saatavilla: <http://www.finnfoam.fi/tuotteet/finnfoam-eristelevyt/koostumus-ja-rakenne/>

Haavi, T. Jelle, B. P, Gustavsen, A. (2012). Vacuum insulation panels in wood frame wall constructions with different stud profiles. *Journal of Building Physics*. 36 (2). pp. 212–226.

Hagentoft, C-E. (2001). Introduction to Building Physics. Studentlitteratur. Lund. 422 s.

Hens, H. (2007). Building Physics – Heat, Air and Moisture, Fundamentals and Engineering Methods with Examples and Exercises. A Wiley Company, Ernst & Sohn. Belgium. 270 p.

Hiltunen, E. Linko, L. Hemminki, S. Hägg, M. Järvenpää, E. Saarinen, P. Simonen, S. Kärhä, P. (2011). Laadukkaan mittaamisen perusteet. Julkaisu J4/2011. Mikes. Espoo. 134 s.

ISO. 8301. (1991). Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Heat flow meter apparatus. Geneve. International Organization for Standardization. 38 p.

JCGM 100. (2008). Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. 120 s. Saatavilla: <http://www.bipm.org/en/publications/guides/>

Tektronix. (2015). Programmable DC Power Supplies. Series 2260B. Keithley. A Tektronix Company. 8 s.

Keller, F. Gettys, W. Skove, M. (1993). Physics. Classical and modern. International edition. McGraw-Hill Inc. United States of Amerika.

Klems, J. H. (1979). A calibrated hot box for testing window systems – construction, calibration and measurements on prototype high-performance windows. ASHRAE/DOE Conference on the Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings. Florida. pp. 338–346.

Lampinen, M. (1997). Termodynamiikan perusteet. Otatieto. Oy Yliopistokustannus. Helsinki. 182 s. + 25 liites.

LaserComp. (1999-2009). FOX200, FOX300, FOX304 and FOX314 Instruments Manual. LaserComp, Inc. U.S.A. 29 s.

Leivo, V. Kiviste, M. Utriainen, V. (2013). RIPA-kattoelementin rakennusfysikaaliset mittaukset kauppakeskus Karismassa. Tutkimusselostus TRT/2208/2013. Tampereen teknillinen yliopisto, rakennetekniikka. 16 s. + 20 liites.

Manelius, E. Pirinen, M. (2011). Kertopuun ja vanerin lämmönjohtavuuden mittaus kahdessa eri koeolosuhteessa. Tutkimusselostus Nro 1965. Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikka. Tampere. 12 s. + 2 liites.

Mills, A. F. (1999). Basic heat and mass transfer. Second edition. Prentice Hall, Inc. United States of America. 1000 p.

Mumaw, J. R. (1974). Calibrated hot box: An Effective Means for Measuring Thermal Conductance in Large Wall Sections. Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations. ASTM STP 544, American Society for Testing and Materials. pp. 193–211.

National Semiconductor. (2008). LM135/LM325/LM335, LM135A/LM235A/LM335. Precision Temperature Sensors. National Semiconductor Corporation. 15 s.

Pakkanen, T. (2012). Sisäisen konvektion vaikutus yläpohjan lämmöneristävyyteen. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan koulutusohjelma. Tampere. 64 s + 129 liites.

Paroc. 2016. Rakennuksen vaippa. Viitattu 24.8.2016. Saatavilla: <http://www.paroc.fi/knowhow/energiatehokkuus/rakennusten-suunnittelu/rakennuksen-vaippa>

RIL 255-1-2014. (2014). Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry. Tammerprint Oy. Helsinki. 384 s + 115 liites.

SFS-EN ISO. 6946. (2008). Rakenne- ja rakennusosat. Lämmönvastus ja lämmönläpäisykerroin. Laskentamenetelmä. Suomen standardoimisliitto SFS. Helsinki. 31 s.

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.

SFS-EN ISO. 10456. (2008). Rakennusaineet ja -tuotteet. Lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet. Taulukoidut suunnitteluarvot ja menetelmät ilmoitetun lämpöteknisen arvon ja lämpöteknisen suunnitteluarvon määrittämiseksi. Suomen standardoimisliitto SFS. Helsinki. 20 s. + 10 liites.

SFS-EN ISO. 12567. (2010). Thermal performance of windows and doors. Determination of thermal transmittance by the hot-box method. Part 1: Complete windows and doors. Suomen standardoimisliitto SFS. Helsinki. 18 s. + 35 liites.

Shankar, V. Hagentoft, C-E. A Numerical Study of Effect of Natural Convection on Thermal Properties of Horizontal Oriented Porous Insulation. *Journal of Building Physics*. 24 (2). pp. 155–167.

TSI Incorporated. (2013) Air velocity transducers models 8455, 8465, and 8475. Operation and service manual. TSI Incorporated. U.S.A. 24 s.

TTY. 2016. COMBI – Comprehensive development of nearly zero-energy municipal service buildings. Viitattu 28.11.2016. Saatavilla: <http://www.tut.fi/rakennusfysiikka/combi>

Vaisala. (1998). HMP230-sarjan lähettimet, käyttöohje. U115fi-2.2. Vaisala Oy. 155 s. + 2 liites.

Vinha, J. Laukkarinen, A. Mäkitalo, M. Nurmi, S. Huttunen, P. Pakkanen, T. Kero, P. Manelius, E. Lahdensivu, J. Köliö, A. Lahdesmäki, K. Piironen, J. Kuhno, V. Pirinen, M. Aaltonen, A. Suonketo, J. (2013). Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. Tampere. 354 s. Saatavilla: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-2949-8>

Vinha, J. (1998). Rakenteiden lämmöneristysominaisuuksien mittauslaitteisto. Lisensiaatintutkimus. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. Tampere. 106 s. + 17 liites.

Vinha, J. (2007) Hygrothermal Performance of Timber-Framed External Walls in Finnish Climatic Conditions: A Method for Determining the Sufficient Water Vapour Resistance of the Interior Lining of a Wall Assembly. Tampere University of Technology, Tampere. 338 s. + 10 liites. Saatavilla: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:tty-200903101040>

Wakili, K.G. Tanner, C. (2003) U-value of a dried wall made of perforated porous clay bricks. Hot box measurement versus numerical analysis. Energy and buildings. 35. pp. 675–680.

RakMk C4. (2012). Lämmöneristys Ohjeet 2012. LUONNOS 16.maaliskuuta 2012. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. Helsinki. 47 s.

RakMk D3. (2012). Rakennusten energiatehokkuus. Määräykset ja ohjeet 2012. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. Helsinki. 47 s.

Ympäristöministeriö. (2014). Ympäristöministeriön asetus rakennusten energiatehokkuudesta annetun ympäristöministeriön asetuksen muuttamisesta. 1/14. Helsinki. 1 s. Saatavilla: <http://www.ymparisto.fi/download/noname/%7BF48C187B-90DB-4789-AA94-A88C9A83C0D3%7D/102477>

## **LIITTEET**

LIITE A: ANTURILUETTELO JA -PAIKAT

LIITE B: KUVIA LAITTEISTOSTA JA KOKEEN SUORITTAMISESTA

LIITE C: KOKEIDEN TULOKSET

LIITE D: RAKMK OSAN C4 MUKAINEN U-ARVOLASKENTA

LIITE E: KOKEIDEN VIRHEARVIO

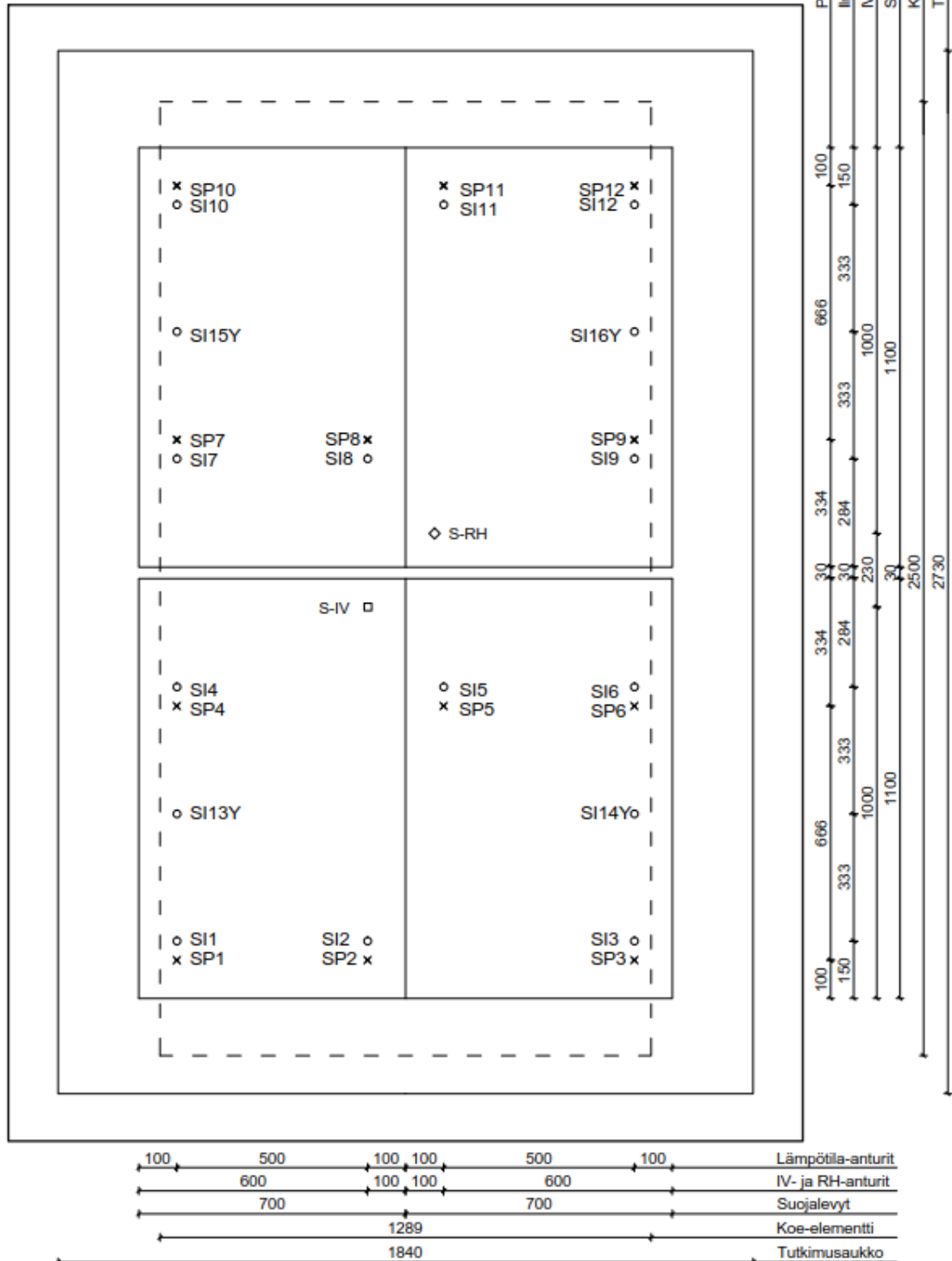
**LIITE A: ANTURILUETTELO JA -PAIKAT**

<b>Nimi</b>	<b>Tyyppi</b>	<b>Kerroin k</b>	<b>Kerroin b</b>	<b>Sijainti</b>
SP1	PINTA	100,202	274,383	sisäsuojalevy
SP2	PINTA	100,099	273,283	sisäsuojalevy
SP3	PINTA	99,757	272,032	sisäsuojalevy
SP4	PINTA	100,361	274,134	sisäsuojalevy
SP5	PINTA	100,104	273,605	sisäsuojalevy
SP6	PINTA	99,542	271,478	sisäsuojalevy
SP7	PINTA	99,557	276,651	sisäsuojalevy
SP8	PINTA	100,125	273,640	sisäsuojalevy
SP9	PINTA	99,351	271,537	sisäsuojalevy
SP10	PINTA	99,353	271,068	sisäsuojalevy
SP11	PINTA	99,420	273,798	sisäsuojalevy
SP12	PINTA	99,719	272,101	sisäsuojalevy
SP13	PINTA	100,214	274,390	elementin sisäpinta
SP14	PINTA	99,164	271,248	elementin sisäpinta
SP15	PINTA	100,020	273,582	elementin sisäpinta
SP16	PINTA	99,270	271,898	elementin sisäpinta
SP17	PINTA	99,825	274,062	elementin sisäpinta
SP18	PINTA	99,851	273,237	elementin sisäpinta
SP19	PINTA	99,545	271,627	elementin sisäpinta
SP20	PINTA	99,604	272,655	elementin sisäpinta
SP21	PINTA	99,777	271,941	elementin sisäpinta
SP22	PINTA	100,806	275,873	elementin sisäpinta
SP23	PINTA	100,736	275,608	elementin sisäpinta
SP24	PINTA	99,901	272,121	elementin sisäpinta
SI1	ILMA	98,943	269,857	lämmin kammio
SI2	ILMA	99,182	271,328	lämmin kammio
SI3	ILMA	99,584	273,117	lämmin kammio
SI4	ILMA	98,377	270,237	lämmin kammio
SI5	ILMA	97,967	269,515	lämmin kammio
SI6	ILMA	98,925	270,612	lämmin kammio
SI7	ILMA	98,196	270,536	lämmin kammio
SI8	ILMA	98,821	271,940	lämmin kammio
SI9	ILMA	97,626	269,371	lämmin kammio
SI10	ILMA	99,609	272,176	lämmin kammio
SI11	ILMA	99,002	271,179	lämmin kammio
SI12	ILMA	98,025	269,520	lämmin kammio
SI13Y	ILMA YLIM	99,074	273,228	lämmin kammio
SI14Y	ILMA YLIM	98,868	270,159	lämmin kammio
SI15Y	ILMA YLIM	98,102	271,009	lämmin kammio
SI16Y	ILMA YLIM	99,729	273,632	lämmin kammio
UP1	PINTA	100,362	274,033	ulkosuojalevy
UP2	PINTA	98,298	269,469	ulkosuojalevy



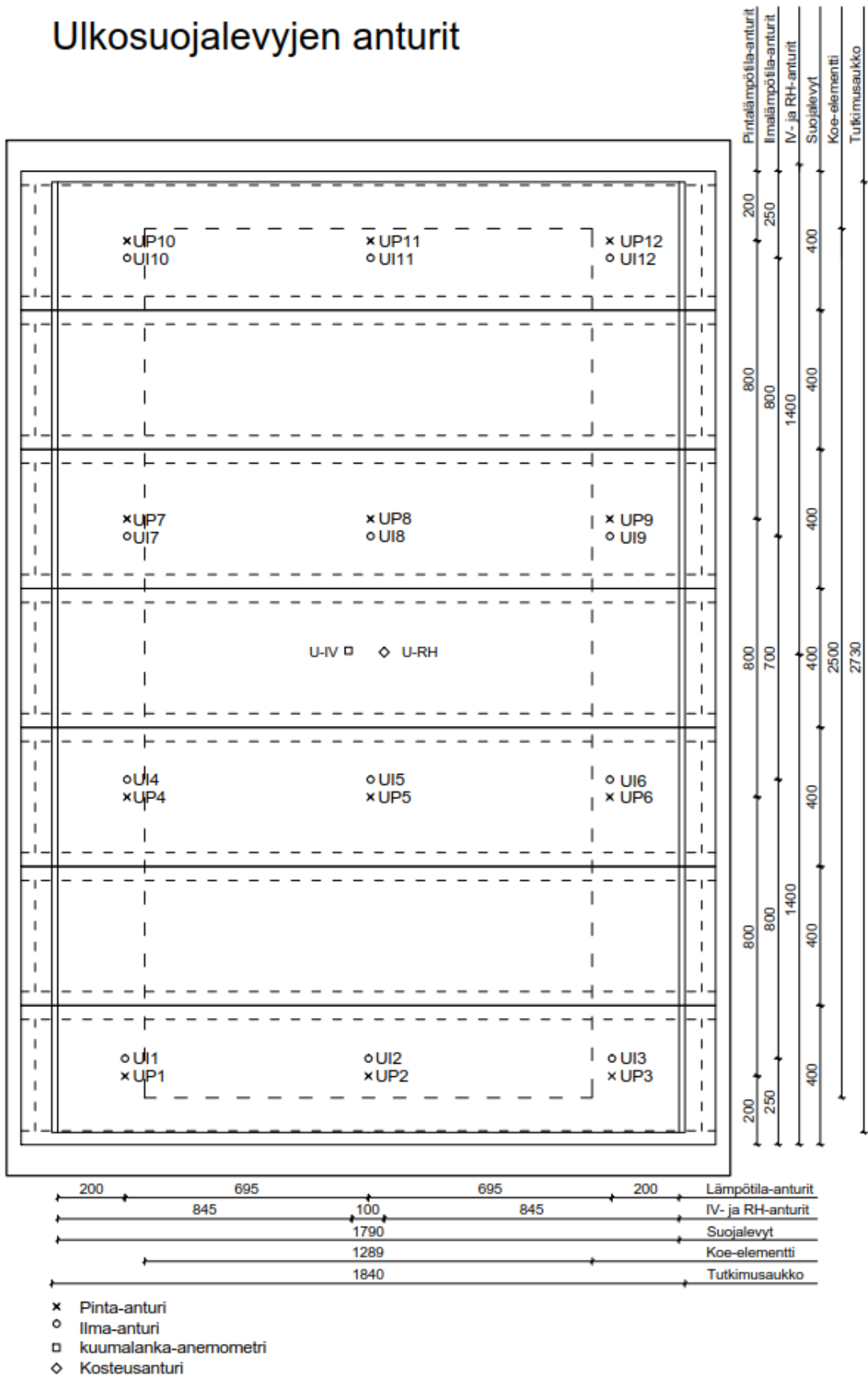
<b>Nimi</b>	<b>Tyyppi</b>	<b>Kerroin k</b>	<b>Kerroin b</b>	<b>Sijainti</b>
UP3	PINTA	98,801	270,679	ulkosuojalevy
UP4	PINTA	98,494	269,436	ulkosuojalevy
UP5	PINTA	99,377	272,432	ulkosuojalevy
UP6	PINTA	99,440	271,362	ulkosuojalevy
UP7	PINTA	99,138	273,059	ulkosuojalevy
UP8	PINTA	99,510	271,734	ulkosuojalevy
UP9	PINTA	99,748	274,977	ulkosuojalevy
UP10	PINTA	99,179	271,748	ulkosuojalevy
UP11	PINTA	100,770	275,048	ulkosuojalevy
UP12	PINTA	98,701	272,682	ulkosuojalevy
UP13	PINTA	100,661	274,440	elementin ulkopinta
UP14	PINTA	98,788	269,081	elementin ulkopinta
UP15	PINTA	99,196	272,843	elementin ulkopinta
UP16	PINTA	100,353	272,960	elementin ulkopinta
UP17	PINTA	98,804	271,593	elementin ulkopinta
UP18	PINTA	99,158	271,026	elementin ulkopinta
UP19	PINTA	100,182	274,587	elementin ulkopinta
UP20	PINTA	99,310	274,093	elementin ulkopinta
UP21	PINTA	99,387	273,349	elementin ulkopinta
UP22	PINTA	100,657	275,671	elementin ulkopinta
UP23	PINTA	100,151	273,578	elementin ulkopinta
UP24	PINTA	98,416	271,630	elementin ulkopinta
UI1	ILMA	98,622	271,079	kylmä kammio
UI2	ILMA	98,673	269,702	kylmä kammio
UI3	ILMA	98,303	268,559	kylmä kammio
UI4	ILMA	97,997	266,461	kylmä kammio
UI5	ILMA	99,481	273,477	kylmä kammio
UI6	ILMA	100,752	272,559	kylmä kammio
UI7	ILMA	97,995	267,263	kylmä kammio
UI8	ILMA	98,610	269,312	kylmä kammio
UI9	ILMA	98,268	267,740	kylmä kammio
UI10	ILMA	98,293	268,605	kylmä kammio
UI11	ILMA	101,062	273,473	kylmä kammio
UI12	ILMA	99,419	270,019	kylmä kammio
UI13Y	ILMA YLIM	99,626	271,210	kylmä kammio
UI14Y	ILMA YLIM	100,304	273,408	kylmä kammio
UI15Y	ILMA YLIM	100,783	273,715	kylmä kammio
UI16Y	ILMA YLIM	99,533	270,855	kylmä kammio
S-IV	ILMAVIRTAUS	0,500	-	lämmin kammio
U-IV	ILMAVIRTAUS	0,500	-	kylmä kammio
S-RH	RH	13,486	4,716	lämmin kammio
S-RH	LÄMPÖTILA	14,902	39,235	lämmin kammio
U-RH	RH	13,503	4,263	kylmä kammio
U-RH	LÄMPÖTILA	14,880	39,461	kylmä kammio
IV3	ILMAVIRTAUS	0,500	-	elementin tuuletusväli

# Sisäsuojalevyjen anturit

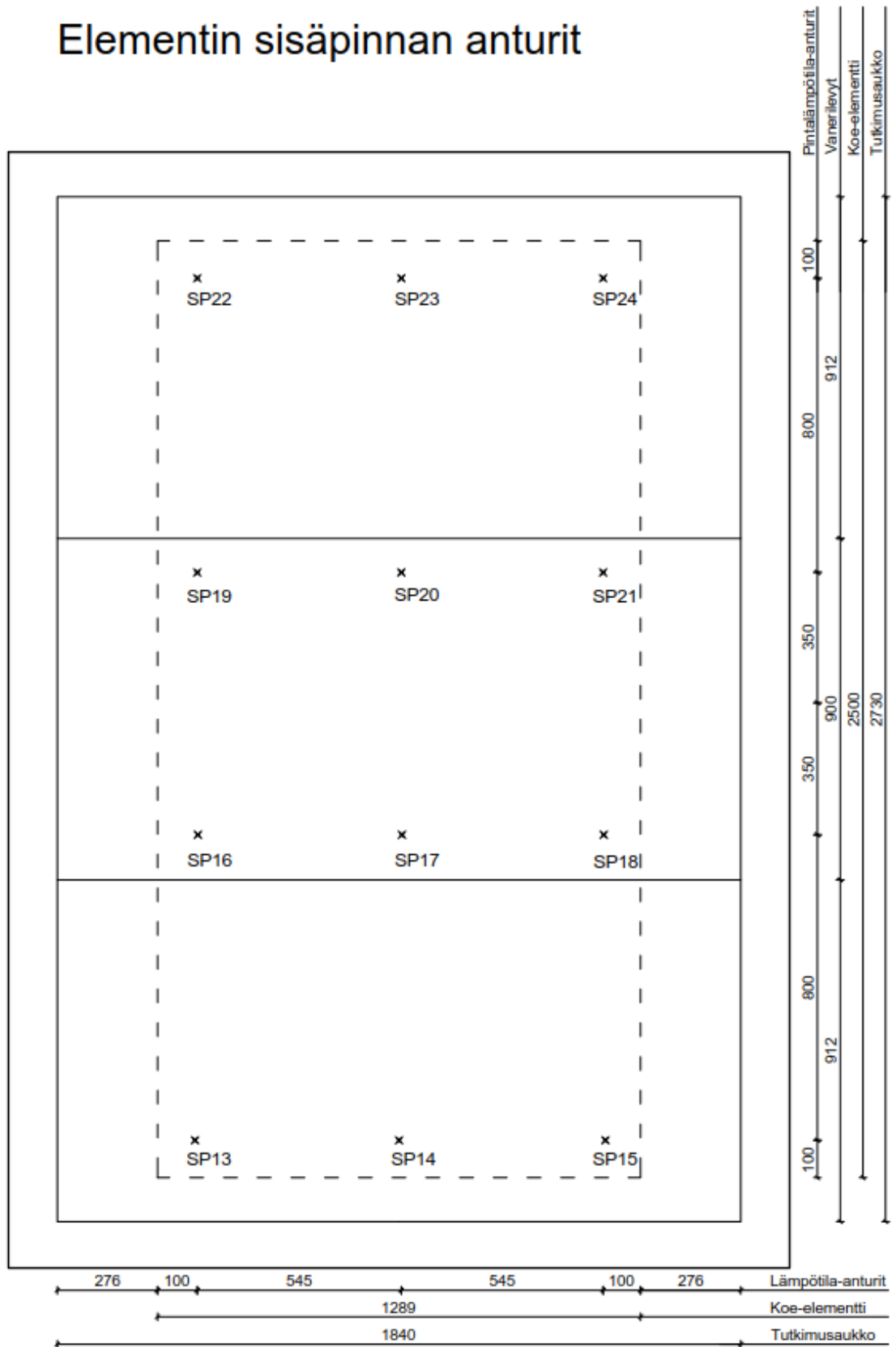


- × Pinta-anturi
- Ilma-anturi
- kuumalanka-anemometri
- ◇ Kosteusanturi

# Ulkosuojalevyjen anturit

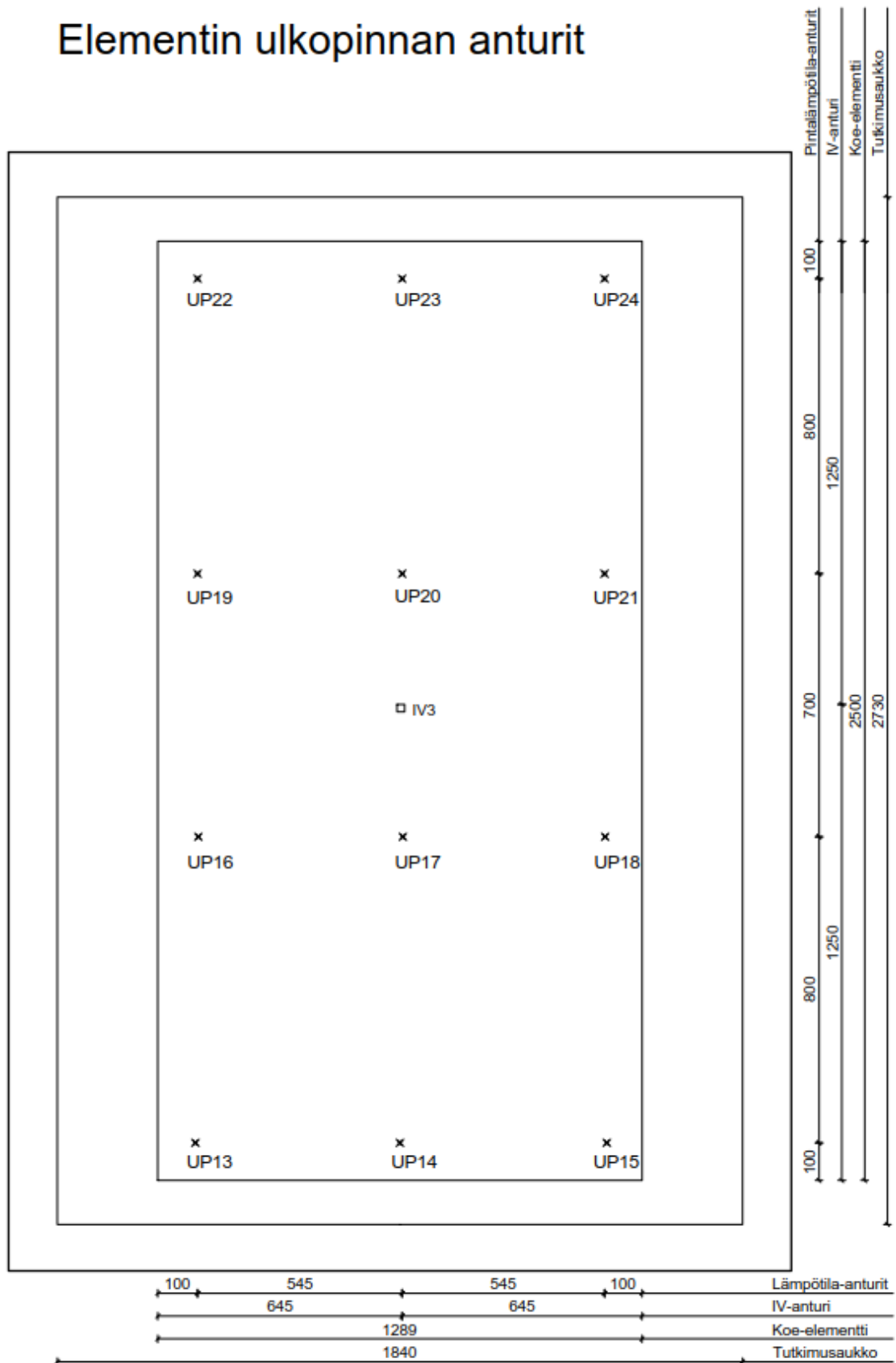


# Elementin sisäpinnan anturit



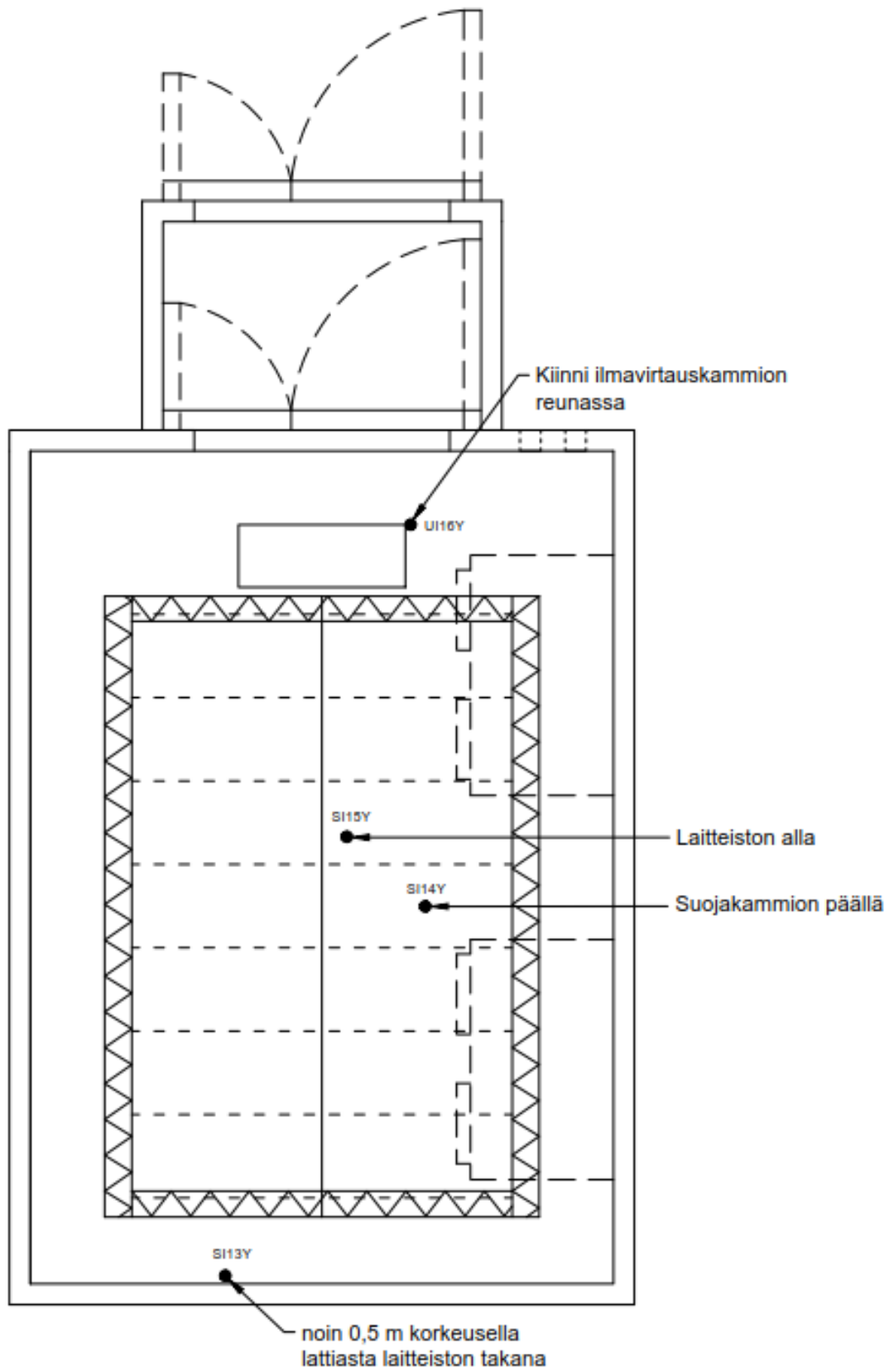
- × Pinta-anturi
- Ilma-anturi
- kuumalanka-anemometri
- ◇ Kosteusanturi

# Elementin ulkopinnan anturit

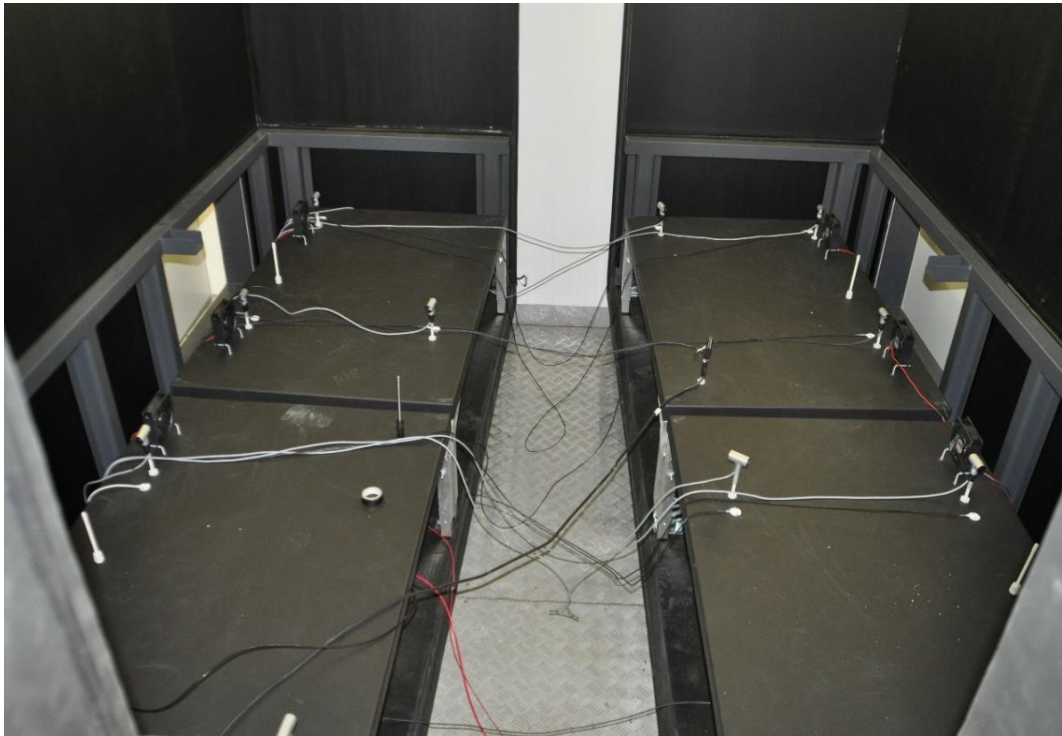


- × Pinta-anturi
- Ilma-anturi
- kuumalanka-anemometri
- ◇ Kosteusanturi

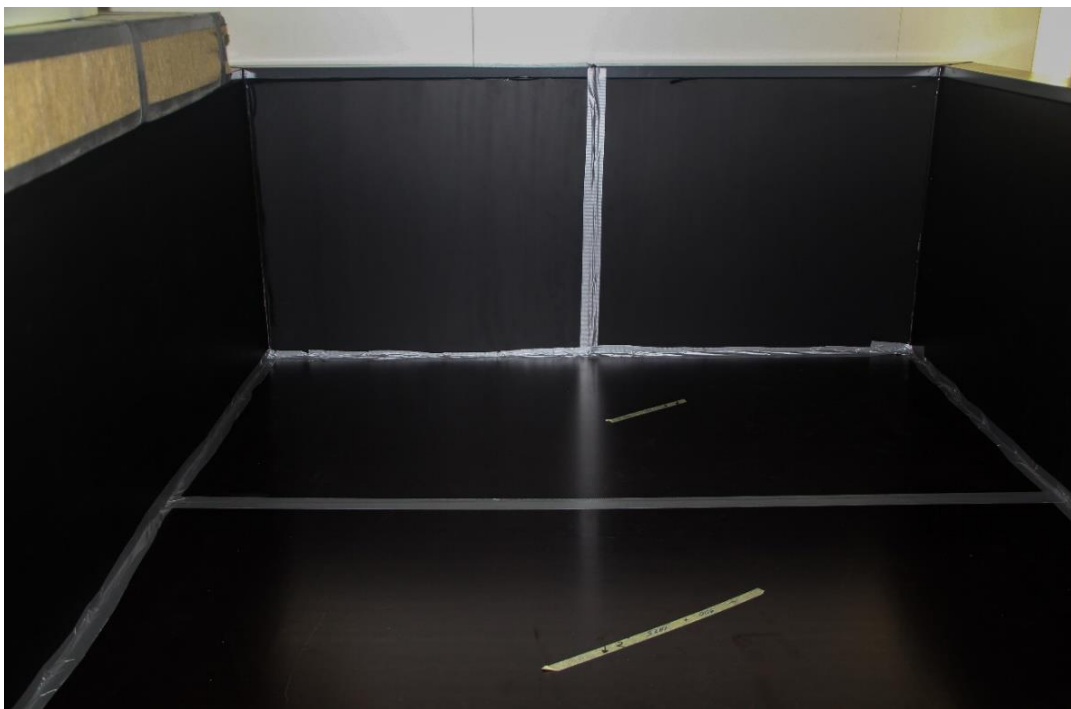
## Kylmän kammion ylimääräiset ilma-anturit



## LIITE B: KUVIA LAITTEISTOSTA JA KOKEEN SUORITTAMISESTA



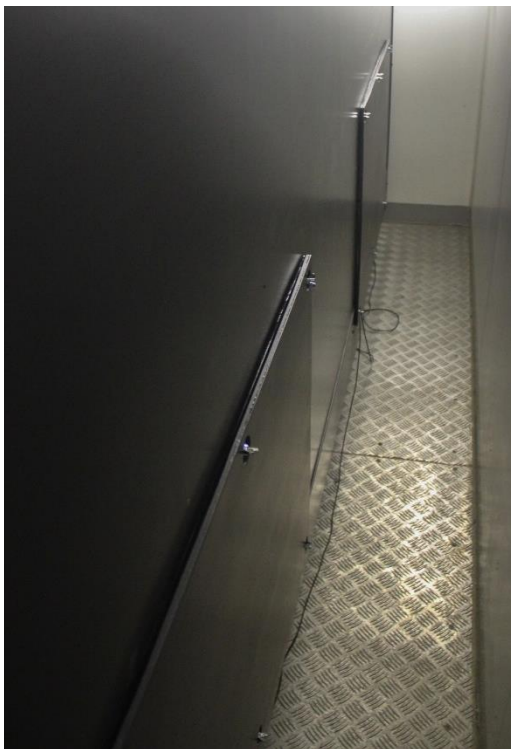
*Kuva 1. Lämpimän kammion suojalevyt ennen laitteiston puolikkaiden yhdistämistä ja vanerilevyjen asettamista teräskehikoiden päälle.*



*Kuva 2. Laitteisto yhdistettynä ja vanerilevyt asennettuna teräskehikoiden päälle.*



**Kuva 3.** Kalibrointikokeen valmistelu. Osa kalibrointieristeistä ja eristereunuksesta asetettuna laitteistoon.



**Kuva 4.** Lämpimän kammion huoltoluukut.



**Kuva 5.** Kylmän kammion suojakammion ja suojalevyjen osia ennen laitteistoon asentamista.





*Kuva 6. Ilmavirtausputkien johtaminen koe-elementin tuuletusväliin.*

## LIITE C: KOKEIDEN TULOKSET

### KALIBROINTIKOE matalampi koe-elementti

#### Lähtötiedot

##### Kalibrointielementti

Pituus	x	2,5	m
Leveys	y	1,289	m
Pinta-ala	$A_{kal}$	3,2225	m <sup>2</sup>
Korkeus	$d_{kal}$	0,51	m
Lämmönvastus	$R_{kal}$	13,9489	m <sup>2</sup> K/W

##### Vaneri

Lämmönjohtavuus	$\lambda_{van}$	0,127	W/mK
Korkeus	$d_{van}$	0,02	m
Lämmönvastus	$R_{van}$	0,157	m <sup>2</sup> K/W

##### Kalibrointielementti + vaneri

Lämmönvastus	$R_{kal+van}$	14,1058	m <sup>2</sup> K/W
Lämmönläpäisykerroin	$U_{kal+van}$	0,0709	W/m <sup>2</sup> K

#### Mittaustulokset

	Lämmin kammio		Kylmä kammio		Erotus
Ilman lämpötila	$T_i$	19,9996 °C	$T_e$	-0,0273 °C	<b>20,03 °C</b>
Elementin pintalämpötila	$T_{si}$	19,8340 °C	$T_{se}$	0,0433 °C	19,79 °C
Suojalevyn pintalämpötila	$T_{bi}$	19,8245 °C	$T_{be}$	-0,2822 °C	20,11 °C
Ilmavirran nopeus pinnalla	$v_{a,i}$	0,57 m/s	$v_{a,e}$	0,86 m/s	
Kosteuspitoisuus	$RH_i$	20,4 % RH	$RH_e$	76,8 % RH	
Pinnan emissiviteetti	$\epsilon_{si}$	0,97	$\epsilon_{se}$	0,97	
Suojalevyn emissiviteetti	$\epsilon_{bi}$	0,97	$\epsilon_{be}$	0,97	

<b>Kokonaisteho</b>	<b><math>P_{kok}</math></b>	<b>72,17</b>	<b>W</b>
---------------------	-----------------------------	--------------	----------

#### Laskennalliset tulokset

Lämpövirta kalib.elem. läpi	$\Phi_{kal}$	4,52	W	(vaneri mukana)
<b>Lämpövirta kammion läpi</b>	<b><math>\Phi_h</math></b>	<b>67,65</b>	<b>W</b>	
Lämpövirran suhde lämpötilaeroon	$\Phi_h / \Delta T$	3,378	W/K	
Lämpövirran tiheys kalib.elem. läpi	$q_{rak}$	1,40	W/m <sup>2</sup>	

#### Säteilyn lämmönsiirtokerroimen määrittäminen, ympäristölämpötila ja pintavastus

	Lämmin kammio		Kylmä kammio		Erotus
Stefan-Boltzmannin vakio	$\sigma$	$5,67 \cdot 10^{-8}$ W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>	$\sigma$	$5,67 \cdot 10^{-8}$ W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>	
Tehollinen emissiviteetti	$\epsilon_i$	0,9417	$\epsilon_e$	0,9417	
Keskimääräinen säteilylämpötila	$T_{r,i}$	19,83 °C	$T_{r,e}$	-0,12 °C	
Säteilyn lämmönsiirtokerroin	$h_{r,i}$	5,3714 W/m <sup>2</sup> K	$h_{r,e}$	4,3472 W/m <sup>2</sup> K	
<b>Ympäristölämpötila</b>	$T_{n,i}$	19,9331 °C	$T_{n,e}$	-0,2926 °C	<b>20,23 °C</b>
<b>Pintavastus</b>	$R_{si}$	0,07 m <sup>2</sup> K/W	$R_{se}$	0,24 m <sup>2</sup> K/W	

**KALIBROINTIKOE korkeampi koe-elementti****Lähtötiedot****Kalibrointielementti**

Pituus	x	2,5	m
Leveys	y	1,289	m
Pinta-ala	$A_{kal}$	3,2225	m <sup>2</sup>
Korkeus	$d_{kal}$	0,56	m
Lämmönvastus	$R_{kal}$	15,4234	m <sup>2</sup> K/W

**Vaneri**

Lämmönjohtavuus	$\lambda_{van}$	0,127	W/mK
Korkeus	$d_{van}$	0,02	m
Lämmönvastus	$R_{van}$	0,157	m <sup>2</sup> K/W

**Kalibrointielementti + vaneri**

Lämmönvastus	$R_{kal+van}$	15,5809	m <sup>2</sup> K/W
Lämmönläpäisykerroin	$U_{kal+van}$	0,0642	W/m <sup>2</sup> K

**Mittaustulokset**

	Lämmin kammio			Kylmä kammio			Erotus
Ilman lämpötila	$T_i$	19,9998	°C	$T_e$	-0,0621	°C	<b>20,06 °C</b>
Elementin pintalämpötila	$T_{si}$	19,8400	°C	$T_{se}$	0,0828	°C	19,83 °C
Suojalevyn pintalämpötila	$T_{bi}$	19,8255	°C	$T_{be}$	-0,3107	°C	20,14 °C
Ilmavirran nopeus pinnalla	$v_{a,i}$	0,58	m/s	$v_{a,e}$	1,23	m/s	
Kosteuspitoisuus	$RH_i$	20,3	% RH	$RH_e$	78,9	% RH	
Pinnan emissiviteetti	$\epsilon_{si}$	0,97		$\epsilon_{se}$	0,97		
Suojalevyn emissiviteetti	$\epsilon_{bi}$	0,97		$\epsilon_{be}$	0,97		

<b>Kokonaisteho</b>	<b><math>P_{kok}</math></b>	<b>71,96</b>	<b>W</b>
---------------------	-----------------------------	--------------	----------

**Laskennalliset tulokset**

Lämpövirta kalib.elem. läpi	$\Phi_{kal}$	4,10	W	(vaneri mukana)
<b>Lämpövirta kammion läpi</b>	<b><math>\Phi_h</math></b>	<b>67,86</b>	<b>W</b>	
Lämpövirran suhde lämpötilaeroon	$\Phi_h / \Delta T$	3,382	W/K	
Lämpövirran tiheys kalib.elem. läpi	$q_{rak}$	1,28	W/m <sup>2</sup>	

**Säteilyn lämmönsiirtokerroimen määrittäminen, ympäristölämpötila ja pintavastus**

	Lämmin kammio			Kylmä kammio			Erotus
Stefan-Boltzmannin vakio	$\sigma$	$5,67 \cdot 10^{-8}$	W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>	$\sigma$	$5,67 \cdot 10^{-8}$	W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>	
Tehollinen emissiviteetti	$\epsilon_i$	0,9417		$\epsilon_e$	0,9417		
Keskimmääinen säteilylämpötila	$T_{r,i}$	19,83	°C	$T_{r,e}$	-0,15	°C	
Säteilyn lämmönsiirtokerroin	$h_{r,i}$	5,3716	W/m <sup>2</sup> K	$h_{r,e}$	4,3457	W/m <sup>2</sup> K	

<b>Ympäristölämpötila</b>	$T_{n,i}$	19,9321	°C	$T_{n,e}$	-0,4529	°C	<b>20,38 °C</b>
<b>Pintavastus</b>	$R_{si}$	0,07	m <sup>2</sup> K/W	$R_{se}$	0,36	m <sup>2</sup> K/W	

**U-ARVOKOE matalampi koe-elementti****Lähtötiedot****Kalibrointielementti**

Pituus	x	2,5	m
Leveys	y	1,289	m
Pinta-ala	$A_{rak}$	3,2225	m <sup>2</sup>
Korkeus	$d_{rak}$	0,51	m

**Mittaustulokset**

	Lämmin kammio		Kylmä kammio		Erotus
Ilman lämpötila	$T_i$	20,0001 °C	$T_e$	0,0158 °C	<b>19,98 °C</b>
Elementin pintalämpötila	$T_{si}$	19,7720 °C	$T_{se}$	0,0584 °C	19,71 °C
Suojalevyn pintalämpötila	$T_{bi}$	19,8195 °C	$T_{be}$	-0,2304 °C	20,05 °C
Ilmavirran nopeus pinnalla	$v_{a,i}$	0,57 m/s	$v_{a,e}$	0,70 m/s	
Kosteuspitoisuus	$RH_i$	19,1 % RH	$RH_e$	78,9 % RH	
Pinnan emissiviteetti	$\epsilon_{si}$	0,97	$\epsilon_{se}$	0,9	
Suojalevyn emissiviteetti	$\epsilon_{bi}$	0,97	$\epsilon_{be}$	0,97	

Ilmavirran nopeus tuuletusvälissä	$v_{a,iv}$	0,065	m/s
<b>Kokonaisteho</b>	<b><math>P_{kok}</math></b>	<b>74,01</b>	<b>W</b>

**Laskennalliset tulokset**

Lämpövirran suhde lämpötilaeroon	$\Phi_h / \Delta T$	3,378	W/°C	(kalibroinnista)
Lämpövirta kammion läpi	$\Phi_h$	67,51	W	
<b>Lämpövirta koe-elementin läpi</b>	<b><math>\Phi_{rak}</math></b>	<b>6,50</b>	<b>W</b>	
Lämpövirran tiheys koe-elem. läpi	$q_{rak}$	2,02	W/m <sup>2</sup>	

**Säteilyn lämmönsiirtokerroimen määrittäminen, ympäristölämpötila ja pintavastus**

	Lämmin kammio		Kylmä kammio		Erotus
Stefan-Boltzmannin vakio	$\sigma$	$5,67 \cdot 10^{-8}$ W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>	$\sigma$	$5,67 \cdot 10^{-8}$ W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>	
Tehollinen emissiviteetti	$\epsilon_i$	0,9417	$\epsilon_e$	0,8756	
Keskimmääinen säteilylämpötila	$T_{r,i}$	19,7957 °C	$T_{r,e}$	-0,0860 °C	
Säteilyn lämmönsiirtokerroin	$h_{r,i}$	0,0764 W/m <sup>2</sup> K	$h_{r,e}$	4,0435 W/m <sup>2</sup> K	

<b>Ympäristölämpötila</b>	$T_{n,i}$	19,9260 °C	$T_{n,e}$	-0,0257 °C	<b>19,95 °C</b>
<b>Pintavastus</b>	$R_{si}$	0,08 m <sup>2</sup> K/W	$R_{se}$	0,04 m <sup>2</sup> K/W	

**Lämmönläpäisykerroin**

			Pyörästetty	
U-arvo koetilanne	$U_{koe}$	0,1027 W/m <sup>2</sup> K	<b><math>U_{koe}</math></b>	<b>0,10 W/m<sup>2</sup>K</b>
U-arvo pinnasta pintaan + 0,14 m <sup>2</sup> K/W	$U_{0,14}$	0,1025 W/m <sup>2</sup> K	<b><math>U_{0,14}</math></b>	<b>0,10 W/m<sup>2</sup>K</b>

**U-ARVOKOE korkeampi koe-elementti****Lähtötiedot****Kalibrointielementti**

Pituus	x	2,5	m
Leveys	y	1,289	m
Pinta-ala	$A_{rak}$	3,2225	m <sup>2</sup>
Korkeus	$d_{rak}$	0,56	m

**Mittaustulokset**

	Lämmin kammio		Kylmä kammio		Erotus
Ilman lämpötila	$T_i$	20,0000 °C	$T_e$	0,0192 °C	<b>19,98 °C</b>
Elementin pintalämpötila	$T_{si}$	19,7725 °C	$T_{se}$	0,0520 °C	19,72°C
Suojalevyn pintalämpötila	$T_{bi}$	19,8183 °C	$T_{be}$	-0,2187 °C	20,04 °C
Ilmavirran nopeus pinnalla	$v_{a,i}$	0,58 m/s	$v_{a,e}$	1,43 m/s	
Kosteuspitoisuus	$RH_i$	20,1 % RH	$RH_e$	76,6 % RH	
Pinnan emissiviteetti	$\epsilon_{si}$	0,97	$\epsilon_{se}$	0,9	
Suojalevyn emissiviteetti	$\epsilon_{bi}$	0,97	$\epsilon_{be}$	0,97	

Ilmavirran nopeus tuuletusvälissä	$v_{a,iv}$	0,064	m/s
<b>Kokonaisteho</b>	<b><math>P_{kok}</math></b>	<b>73,31</b>	<b>W</b>

**Laskennalliset tulokset**

Lämpövirran suhde lämpötilaeroon	$\Phi_h / \Delta T$	3,382	W/°C	(kalibroinnista)
Lämpövirta kammion läpi	$\Phi_h$	67,58	W	
<b>Lämpövirta koe-elementin läpi</b>	<b><math>\Phi_{rak}</math></b>	<b>5,73</b>	<b>W</b>	
Lämpövirran tiheys koe-elem. läpi	$q_{rak}$	1,78	W/m <sup>2</sup>	

**Säteilyn lämmönsiirtokertoimen määrittäminen, ympäristölämpötila ja pintavastus**

	Lämmin kammio		Kylmä kammio		Erotus
Stefan-Boltzmannin vakio	$\sigma$	$5,67 \cdot 10^{-8}$ W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>	$\sigma$	$5,67 \cdot 10^{-8}$ W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>	
Tehollinen emissiviteetti	$\epsilon_i$	0,9417	$\epsilon_e$	0,8756	
Keskimääräinen säteilylämpötila	$T_{r,i}$	19,7941 °C	$T_{r,e}$	-0,0834 °C	
Säteilyn lämmönsiirtokerroin	$h_{r,i}$	5,3695 W/m <sup>2</sup> K	$h_{r,e}$	4,0436 W/m <sup>2</sup> K	

<b>Ympäristölämpötila</b>	$T_{n,i}$	19,9185 °C	$T_{n,e}$	-0,0194 °C	<b>19,94 °C</b>
<b>Pintavastus</b>	$R_{si}$	0,08 m <sup>2</sup> K/W	$R_{se}$	0,04 m <sup>2</sup> K/W	

**Lämmönläpäisykerroin**

			Pyörästetty	
U-arvo koetilanne	$U_{koe}$	0,0904 W/m <sup>2</sup> K	$U_{koe}$	<b>0,090 W/m<sup>2</sup>K</b>
U-arvo pinnasta pintaan + 0,14 m <sup>2</sup> K/W	$U_{0,14}$	0,0903 W/m <sup>2</sup> K	$U_{0,14}$	<b>0,090 W/m<sup>2</sup>K</b>

**U-ARVOKOE korkeampi koe-elementti, tuuletusilmavirta 0,0 m/s****Lähtötiedot****Kalibrointielementti**

Pituus	x	2,5	m
Leveys	y	1,289	m
Pinta-ala	$A_{rak}$	3,2225	m <sup>2</sup>
Korkeus	$d_{rak}$	0,56	m

**Mittaustulokset**

	Lämmin kammio		Kylmä kammio		Erotus
Ilman lämpötila	$T_i$	20,0001 °C	$T_e$	-0,0419 °C	<b>20,04 °C</b>
Elementin pintalämpötila	$T_{si}$	19,7756 °C	$T_{se}$	-0,0143 °C	19,79 °C
Suojalevyn pintalämpötila	$T_{bi}$	19,8156 °C	$T_{be}$	-0,2786 °C	20,10 °C
Ilmavirran nopeus pinnalla	$v_{a,i}$	0,57 m/s	$v_{a,e}$	1,09 m/s	
Kosteuspitoisuus	$RH_i$	19,5 % RH	$RH_e$	73,4 % RH	
Pinnan emissiviteetti	$\epsilon_{si}$	0,97	$\epsilon_{se}$	0,9	
Suojalevyn emissiviteetti	$\epsilon_{bi}$	0,97	$\epsilon_{be}$	0,97	
			$T_e$		
Ilmavirran nopeus tuuletusvälissä	$v_{a,iv}$	0,0 m/s			
<b>Kokonaisteho</b>	<b><math>P_{kok}</math></b>	<b>73,53 W</b>			

**Laskennalliset tulokset**

Lämpövirran suhde lämpötilaeroon	$\Phi_h / \Delta T$	3,382 W/°C	(kalibroinnista)
Lämpövirta kammion läpi	$\Phi_h$	67,79 W	
<b>Lämpövirta koe-elementin läpi</b>	<b><math>\Phi_{rak}</math></b>	<b>5,74 W</b>	
Lämpövirran tiheys koe-elem. läpi	$q_{rak}$	1,78 W/m <sup>2</sup>	

**Säteilyn lämmönsiirtokertoimen määrittäminen, ympäristölämpötila ja pintavastus**

	Lämmin kammio		Kylmä kammio		Erotus
Stefan-Boltzmannin vakio	$\sigma$	$5,67 \cdot 10^{-8}$ W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>	$\sigma$	$5,67 \cdot 10^{-8}$ W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>	
Tehollinen emissiviteetti	$\epsilon_i$	0,9417	$\epsilon_e$	0,8756	
Keskimmääinen säteilylämpötila	$T_{r,i}$	19,7971 °C	$T_{r,e}$	-0,1465 °C	
Säteilyn lämmönsiirtokerroin	$h_{r,i}$	5,3696 W/m <sup>2</sup> K	$h_{r,e}$	4,0408 W/m <sup>2</sup> K	
<b>Ympäristölämpötila</b>	$T_{n,i}$	19,9207 °C	$T_{n,e}$	-0,0738 °C	<b>19,99 °C</b>
<b>Pintavastus</b>	$R_{si}$	0,08 m <sup>2</sup> K/W	$R_{se}$	0,03 m <sup>2</sup> K/W	

**Lämmönläpäisykerroin**

			Pyörästetty	
U-arvo koetilanne	$U_{koe}$	0,0904 W/m <sup>2</sup> K	$U_{koe}$	<b>0,090 W/m<sup>2</sup>K</b>
U-arvo pinnasta pintaan + 0,14 m <sup>2</sup> K/W	$U_{0,14}$	0,0902 W/m <sup>2</sup> K	$U_{0,14}$	<b>0,090 W/m<sup>2</sup>K</b>

**U-ARVOKOE korkeampi koe-elementti, tuuletusilmavirta 0,13 m/s****Lähtötiedot****Kalibrointielementti**

Pituus	x	2,5	m
Leveys	y	1,289	m
Pinta-ala	$A_{rak}$	3,2225	m <sup>2</sup>
Korkeus	$d_{rak}$	0,56	m

**Mittaustulokset**

	Lämmin kammio		Kylmä kammio		Erotus
Ilman lämpötila	$T_i$	20,0004 °C	$T_e$	0,0780 °C	<b>19,92 °C</b>
Elementin pintalämpötila	$T_{si}$	19,7766 °C	$T_{se}$	0,1791 °C	19,59 °C
Suojalevyn pintalämpötila	$T_{bi}$	19,8186 °C	$T_{be}$	-0,1588 °C	19,98 °C
Ilmavirran nopeus pinnalla	$v_{a,i}$	0,57 m/s	$v_{a,e}$	1,13 m/s	
Kosteuspitoisuus	$RH_i$	19,9 % RH	$RH_e$	76,4 % RH	
Pinnan emissiviteetti	$\epsilon_{si}$	0,97	$\epsilon_{se}$	0,9	
Suojalevyn emissiviteetti	$\epsilon_{bi}$	0,97	$\epsilon_{be}$	0,97	

Ilmavirran nopeus tuuletusvälissä	$v_{a,iv}$	0,132	m/s
<b>Kokonaisteho</b>	<b><math>P_{kok}</math></b>	<b>73,25</b>	<b>W</b>

**Laskennalliset tulokset**

Lämpövirran suhde lämpötilaeroon	$\Phi_h / \Delta T$	3,382	W/°C	(kalibroinnista)
Lämpövirta kammion läpi	$\Phi_h$	67,38	W	
<b>Lämpövirta koe-elementin läpi</b>	<b><math>\Phi_{rak}</math></b>	<b>5,87</b>	<b>W</b>	
Lämpövirran tiheys koe-elem. läpi	$q_{rak}$	1,82	W/m <sup>2</sup>	

**Säteilyn lämmönsiirtokertoimen määrittäminen, ympäristölämpötila ja pintavastus**

	Lämmin kammio		Kylmä kammio		Erotus
Stefan-Boltzmannin vakio	$\sigma$	$5,67 \cdot 10^{-8}$ W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>	$\sigma$	$5,67 \cdot 10^{-8}$ W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>	
Tehollinen emissiviteetti	$\epsilon_i$	0,9417	$\epsilon_e$	0,8756	
Keskimääräinen säteilylämpötila	$T_{r,i}$	19,7976 °C	$T_{r,e}$	0,0102 °C	
Säteilyn lämmönsiirtokerroin	$h_{r,i}$	5,3697 W/m <sup>2</sup> K	$h_{r,e}$	4,0478 W/m <sup>2</sup> K	

<b>Ympäristölämpötila</b>	$T_{n,i}$	19,9223 °C	$T_{n,e}$	-0,0344 °C	<b>19,96 °C</b>
<b>Pintavastus</b>	$R_{si}$	0,08 m <sup>2</sup> K/W	$R_{se}$	0,12 m <sup>2</sup> K/W	

**Lämmönläpäisykerroin**

			Pyörästetty	
U-arvo koetilanne	$U_{koe}$	0,0925 W/m <sup>2</sup> K	<b><math>U_{koe}</math></b>	<b>0,093 W/m<sup>2</sup>K</b>
U-arvo pinnasta pintaan + 0,14 m <sup>2</sup> K/W	$U_{0,14}$	0,0930 W/m <sup>2</sup> K	<b><math>U_{0,14}</math></b>	<b>0,093 W/m<sup>2</sup>K</b>

**U-ARVOKOE korkeampi koe-elementti, tuuletusilmavirta 0,35 m/s****Lähtötiedot****Kalibrointielementti**

Pituus	x	2,5	m
Leveys	y	1,289	m
Pinta-ala	$A_{rak}$	3,2225	m <sup>2</sup>
Korkeus	$d_{rak}$	0,56	m

**Mittaustulokset**

	Lämmin kammio		Kylmä kammio		Erotus
Ilman lämpötila	$T_i$	19,9995 °C	$T_e$	0,1455 °C	<b>19,85 °C</b>
Elementin pintalämpötila	$T_{si}$	19,7708 °C	$T_{se}$	0,3334 °C	19,44 °C
Suojalevyn pintalämpötila	$T_{bi}$	19,8177 °C	$T_{be}$	-0,0625 °C	19,88 °C
Ilmavirran nopeus pinnalla	$v_{a,i}$	0,57 m/s	$v_{a,e}$	0,83 m/s	
Kosteuspitoisuus	$RH_i$	20,1 % RH	$RH_e$	74,5 % RH	
Pinnan emissiviteetti	$\epsilon_{si}$	0,97	$\epsilon_{se}$	0,9	
Suojalevyn emissiviteetti	$\epsilon_{bi}$	0,97	$\epsilon_{be}$	0,97	

Ilmavirran nopeus tuuletusvälissä	$v_{a,iv}$	0,35	m/s
<b>Kokonaisteho</b>	<b><math>P_{kok}</math></b>	<b>73,52</b>	<b>W</b>

**Laskennalliset tulokset**

Lämpövirran suhde lämpötilaeroon	$\Phi_h / \Delta T$	3,382	W/°C	(kalibroinnista)
Lämpövirta kammion läpi	$\Phi_h$	67,15	W	
<b>Lämpövirta koe-elementin läpi</b>	<b><math>\Phi_{rak}</math></b>	<b>6,37</b>	<b>W</b>	
Lämpövirran tiheys koe-elem. läpi	$q_{rak}$	1,96	W/m <sup>2</sup>	

**Säteilyn lämmönsiirtokertoimen määrittäminen, ympäristölämpötila ja pintavastus**

	Lämmin kammio		Kylmä kammio		Erotus
Stefan-Boltzmannin vakio	$\sigma$	$5,67 \cdot 10^{-8}$ W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>	$\sigma$	$5,67 \cdot 10^{-8}$ W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>	
Tehollinen emissiviteetti	$\epsilon_i$	0,9417	$\epsilon_e$	0,8756	
Keskimääräinen säteilylämpötila	$T_{r,i}$	19,7943 °C	$T_{r,e}$	0,1255 °C	
Säteilyn lämmönsiirtokerroin	$h_{r,i}$	5,3695 W/m <sup>2</sup> K	$h_{r,e}$	4,0533 W/m <sup>2</sup> K	

<b>Ympäristölämpötila</b>	$T_{n,i}$	19,9239 °C	$T_{n,e}$	0,0056 °C	<b>19,92 °C</b>
<b>Pintavastus</b>	$R_{si}$	0,08 m <sup>2</sup> K/W	$R_{se}$	0,17 m <sup>2</sup> K/W	

**Lämmönläpäisykerroin**

			Pyörästetty	
U-arvo koetilanne	$U_{koe}$	0,1007 W/m <sup>2</sup> K	<b><math>U_{koe}</math></b>	<b>0,10 W/m<sup>2</sup>K</b>
U-arvo pinnasta pintaan + 0,14 m <sup>2</sup> K/W	$U_{0,14}$	0,1018 W/m <sup>2</sup> K	<b><math>U_{0,14}</math></b>	<b>0,10 W/m<sup>2</sup>K</b>

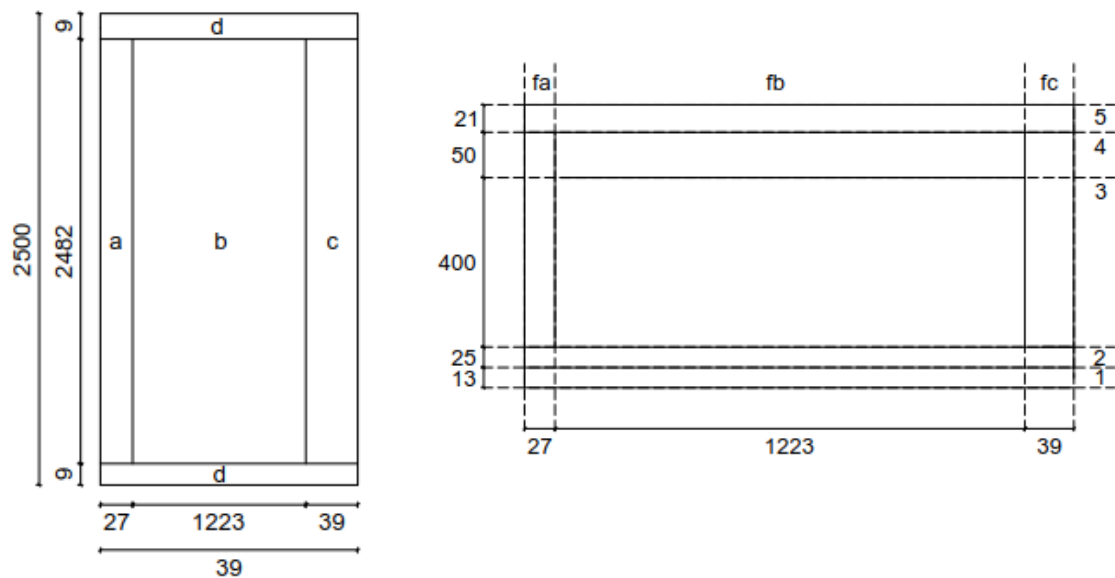


## LIITE D: RAKMK OSAN C4 MUKAINEN U-ARVOLASKENTA

### Matalampi koe-elementti

Paksuus $d$ (m)	Rakennekerros	Kerroksen osa	Lämmönjohtavuus $\lambda$ (W/mK)	Lämmönvastus $R$ (m <sup>2</sup> K/W)	Kerros
	sisäpinnan pintavastus			0,100	$S_i$
0,013	Kipsilevy		0,23*	0,057	1
0,025	Kerto-Q		0,148	0,169	2
0,4	Mineraalivilla, vaneri, Kerto-S 27 mm ja Kerto-S 39 mm	Kerto-S 27 mm	0,111	3,604	3.1
		mineraalivilla	0,037	10,811	3.2
		Kerto-S 39 mm	0,111	3,604	3.3
		vaneri x2	0,13*	3,077	3.4
0,05	Ilmakerros, Kerto-S 27 mm ja Kerto-S 39 mm	Kerto-S 27 mm	0,111	0,450	4.1
		ilmakerros		0,160	4.2
		Kerto-S 39 mm	0,111	0,450	4.3
0,021	vaneri		0,13*	0,162	5
	ulkopinnan pintavastus			0,040	$S_e$

\*Laskennassa käytetyt lämmönjohtavuuden arvot ovat mitattuja arvoja muille paitsi vanerille ja kipsilevyille, joille on käytetty RakMk C4:n mukaisia keskimääräisiä lämmönjohtavuuden arvoja.



Huom. Kuvat ovat vain havainnollistavia ja niiden mittasuhteet eivät ole oikein.

**Elementin pinta-ala**

leveys	1,289	m
pituus	2,5	m
pinta-ala	3,223	m <sup>2</sup>

**Osa-alueiden pinta-alat**

fa	0,0208
fb	0,9420
fc	0,0300
fd	0,0072
tarkistus	1,0

**Kokonaislämmönvastusten yläkiiarvo**

Osa-alueiden kokonaislämmönvastukset

R <sub>Ta</sub>	4,5810	m <sup>2</sup> K/W
R <sub>Tb</sub>	11,4978	m <sup>2</sup> K/W
R <sub>Tc</sub>	4,5810	m <sup>2</sup> K/W
R <sub>Td</sub>	3,4424	m <sup>2</sup> K/W

R<sub>T</sub><sup>I</sup> 10,5137 m<sup>2</sup>K/W**Kokonaislämmönvastuksen alalikiarvo**

Rinnakkaisten lohkojen lämmönvastukset

Kerros 3	
R <sub>3</sub>	9,6545 m <sup>2</sup> K/W
Kerros 4	
R <sub>4</sub>	0,1667 m <sup>2</sup> K/W

R<sub>T</sub><sup>II</sup> 10,3482 m<sup>2</sup>K/W**Kokonaislämmönvastus**R<sub>T</sub> 10,4309 m<sup>2</sup>K/W**Lämmönläpäisykerroin**U 0,096 W/m<sup>2</sup>K**Ilmaraoista aiheutuva korjaustermi** $\Delta U''$  0,01 W/(m<sup>2</sup>K)R<sub>3.2</sub> 10,811 m<sup>2</sup>K/WR<sub>Th</sub> 10,4309 m<sup>2</sup>K/WU<sub>g</sub> 0,010742 W/(m<sup>2</sup>K)

Korjaustermi prosentteina U-arvosta

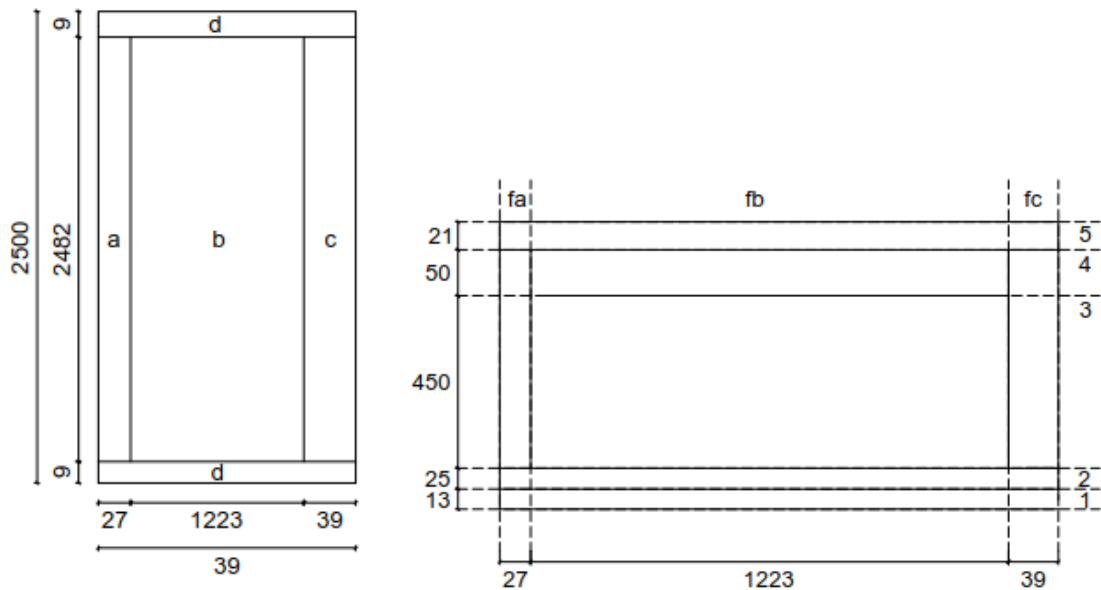
11,2 %

**Korjattu lämmönläpäisykerroin** $\Delta U$  0,11 W/(m<sup>2</sup>K)

## Korkeampi koe-elementti

Paksuus $d$ (m)	Rakennekerros	Kerroksen osa	Lämmönjohtavuus $\lambda$ (W/mK)	Lämmönvastus $R$ (m <sup>2</sup> K/W)	Kerros
	sisäpinnan pintavastus			0,100	$s_i$
0,013	Kipsilevy		0,23*	0,057	1
0,025	Kerto-Q		0,148	0,169	2
0,45	Mineraalivilla, vaneri, Kerto-S 27 mm ja Kerto-S 39 mm	Kerto-S 27 mm	0,111	3,604	3.1
		mineraalivilla	0,037	12,162	3.2
		Kerto-S 39 mm	0,111	3,604	3.3
		vaneri x2	0,13*	3,077	3.4
0,05	Ilmakerros, Kerto-S 27 mm ja Kerto-S 39 mm	Kerto-S 27 mm	0,111	0,450	4.1
		ilmakerros		0,160	4.2
		Kerto-S 39 mm	0,111	0,450	4.3
0,021	vaneri		0,13*	0,162	5
	ulkopinnan pintavastus			0,040	$s_e$

\*Laskennassa käytetyt lämmönjohtavuuden arvot ovat mitattuja arvoja muille paitsi vanerille ja kipsilevyille, joille on käytetty RakMk C4:n mukaisia keskimääräisiä lämmönjohtavuuden arvoja.



Huom. Kuvat ovat vain havainnollistavia ja niiden mittasuhteet eivät ole oikein.

**Elementin pinta-ala**

leveys	1,289	m
pituus	2,5	m
pinta-ala	3,223	m <sup>2</sup>

**Osa-alueiden pinta-alat**

$f_a$	0,0208
$f_b$	0,9420
$f_c$	0,0300
$f_d$	0,0072
tarkistus	1,0

**Kokonaislämmönvastusten yläkiiarvo**

Osa-alueiden kokonaislämmönvastukset

$R_{Ta}$	5,0315	m <sup>2</sup> K/W
$R_{Tb}$	12,8491	m <sup>2</sup> K/W
$R_{Tc}$	5,0315	m <sup>2</sup> K/W
$R_{Td}$	3,8270	m <sup>2</sup> K/W
$R'_T$	11,7241	m <sup>2</sup> K/W

**Kokonaislämmönvastuksen alalikiarvo**

Rinnakkaisten lohkojen lämmönvastukset

Kerros 3	
$R_3$	10,8614 m <sup>2</sup> K/W
Kerros 4	
$R_4$	0,1667 m <sup>2</sup> K/W
$R''_T$	11,5550 m <sup>2</sup> K/W

**Kokonaislämmönvastus**

$R_T$	11,6396	m <sup>2</sup> K/W
-------	---------	--------------------

**Lämmönläpäisykerroin**

$U$	0,086	W/m <sup>2</sup> K
-----	-------	--------------------

**Ilmaraoista aiheutuva korjaustermi**

$\Delta U''$	0,01	W/(m <sup>2</sup> K)
$R_{3.2}$	12,162	m <sup>2</sup> K/W
$R_{Th}$	11,6396	m <sup>2</sup> K/W
$U_g$	0,010918	W/(m <sup>2</sup> K)

Korjaustermi prosentteina U-arvosta

12,7 %

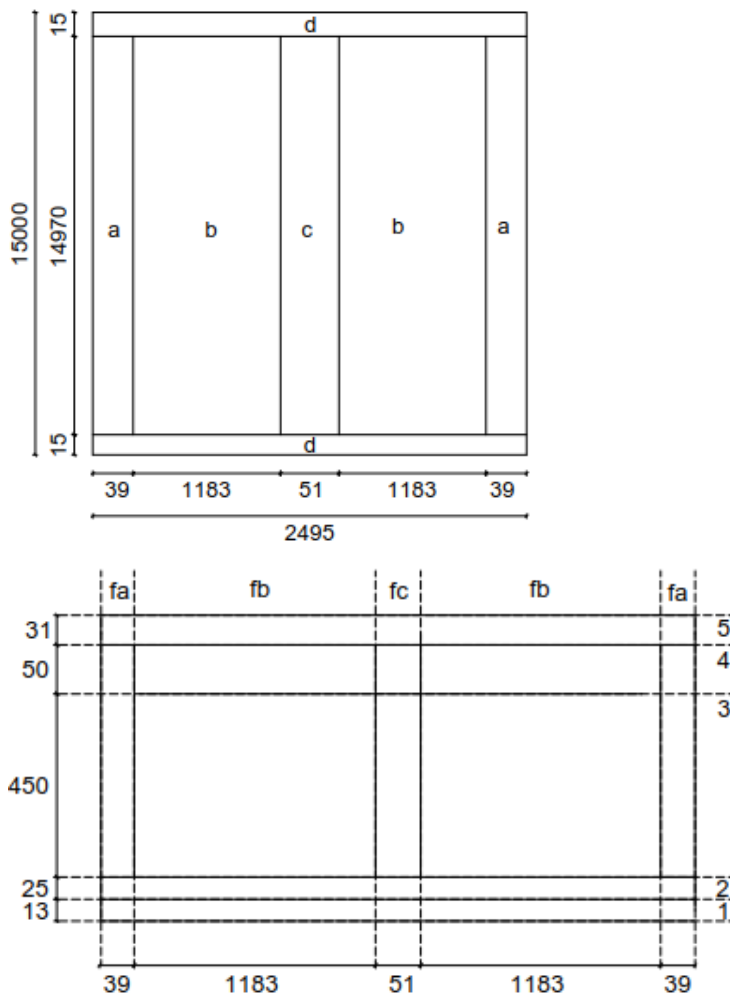
**Korjattu lämmönläpäisykerroin**

$\Delta U$	0,097	W/(m <sup>2</sup> K)
------------	-------	----------------------

## Normaali Kerto-Ripa -kattoelementti

Paksuus $d$ (m)	Rakennekerros	Kerroksen osa	Lämmönjohtavuus $\lambda$ (W/mK)	Lämmönvastus $R$ (m <sup>2</sup> K/W)	Kerros
	sisäpuolen pintavastus			0,100	si
0,013	Kipsilevy		0,23	0,057	1
0,025	Kerto-Q		0,148	0,169	2
0,45	mineraalivilla, vaneri, Kerto-S 39 mm ja Kerto-S 51 mm	Kerto-S 39 mm 2x	0,111	4,054	3.1
		Kerto-S 51 mm	0,111	4,054	3.2
		mineraalivilla 2x	0,037	12,162	3.3
		vaneri x2	0,13	3,462	3.4
0,05	ilmakerros ja Kerto-S 39 mm ja Kerto-S 51 mm	Kerto-S 39 mm 2x	0,111	0,450	4.1
		Kerto-S 51 mm	0,111	0,450	4.2
		ilmakerros 2x		0,160	4.3
0,031	Kerto-Q		0,148	0,209	5
	ulko puolen pintavas- tus			0,040	se

\*Laskennassa käytetyt lämmönjohtavuuden arvot ovat mitattuja arvoja muille paitsi vanerille ja kipsilevyille, joille on käytetty RakMk C4:n mukaisia keskimääräisiä lämmönjohtavuuden arvoja.



Huom. Kuvat ovat vain havainnollistavia ja niiden mittasuhteet eivät ole oikein.

**Elementin pinta-ala**

leveys	2,495	m
pituus	2,5	m
pinta-ala	37,425	m <sup>2</sup>

**Osa-alueiden pinta-alat**

f <sub>a</sub>	0,0312
f <sub>b</sub>	0,9464
f <sub>c</sub>	0,0204
f <sub>d</sub>	0,0020
tarkistus	1,0

**Kokonaislämmönvastusten yläkiiarvo**

Osa-alueiden kokonaislämmönvastukset

R <sub>Ta</sub>	5,1492	m <sup>2</sup> K/W
R <sub>Tb</sub>	12,9669	m <sup>2</sup> K/W
R <sub>Tc</sub>	5,0794	m <sup>2</sup> K/W
R <sub>Td</sub>	3,8270	m <sup>2</sup> K/W
R' <sub>T</sub>	11,8985	m <sup>2</sup> K/W

**Kokonaislämmönvastuksen alalikiarvo**

Rinnakkaisten lohkojen lämmönvastukset

Kerros 3		
R <sub>3</sub>	10,9743	m <sup>2</sup> K/W
Kerros 4		
R <sub>4</sub>	0,1658	m <sup>2</sup> K/W
R'' <sub>T</sub>	11,7150	m <sup>2</sup> K/W

**Kokonaislämmönvastus**

R <sub>T</sub>	11,8054	m <sup>2</sup> K/W
----------------	---------	--------------------

**Lämmönläpäisykerroin**

U	0,085	W/m <sup>2</sup> K
---	-------	--------------------

**Ilmaraoista aiheutuva korjaustermi**

ΔU''	0,01	W/(m <sup>2</sup> K)
R <sub>3.2</sub>	12,162	m <sup>2</sup> K/W
R <sub>Th</sub>	11,8054	m <sup>2</sup> K/W
U <sub>g</sub>	0,010614	W/(m <sup>2</sup> K)

Korjaustermi prosentteina U-arvosta

12,5 %

**Korjattu lämmönläpäisykerroin**

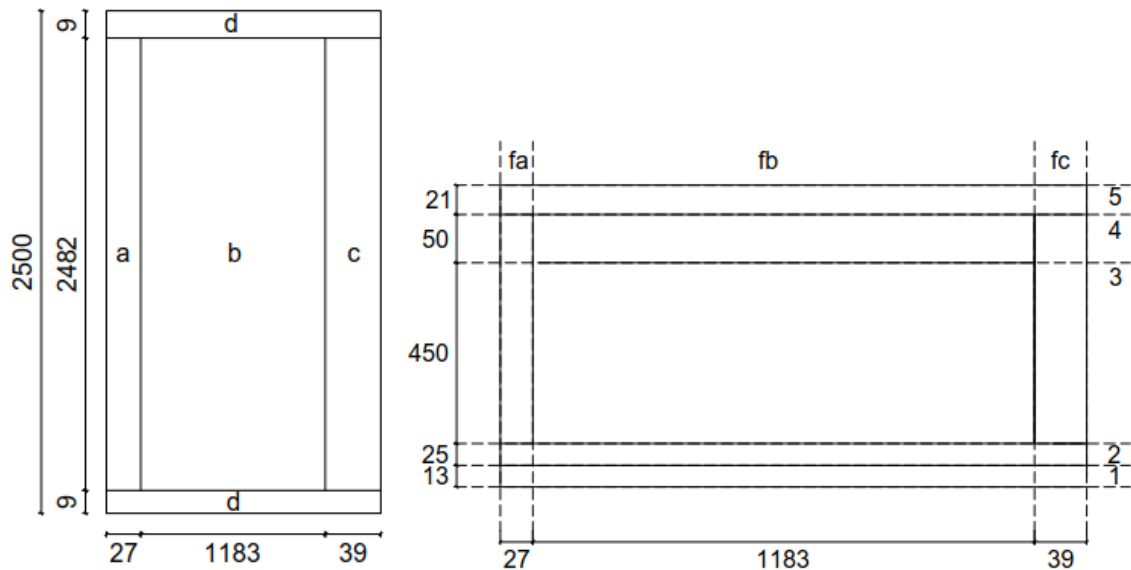
ΔU	0,095	W/(m <sup>2</sup> K)
----	-------	----------------------

### Korkeampi koe-elementti

Laskennallisesti tarkasteltu tilanne, jossa elementin eristetilä on normaalin Kerto-Ripa -kattoelementin eristetilän levyinen. Tällä tilanteella arvioitiin koe-elementissä käytetyn 40 mm leveämmän eristetilän vaikutusta U-arvotuloksiin.

Paksuus $d$ (m)	Rakennekerros	Kerroksen osa	Lämmönjohtavuus $\lambda$ (W/mK)	Lämmönvastus $R$ (m <sup>2</sup> K/W)	Kerros
	sisäpinnan pintavastus			0,100	$s_i$
0,013	Kipsilevy		0,23*	0,057	1
0,025	Kerto-Q		0,148	0,169	2
0,45	Mineraalivilla, vaneri, Kerto-S 27 mm ja Kerto-S 39 mm	Kerto-S 27 mm	0,111	3,604	3.1
		mineraalivilla	0,037	12,162	3.2
		Kerto-S 39 mm	0,111	3,604	3.3
		vaneri x2	0,13*	3,077	3.4
0,05	Ilmakerros, Kerto-S 27 mm ja Kerto-S 39 mm	Kerto-S 27 mm	0,111	0,450	4.1
		ilmakerros		0,160	4.2
		Kerto-S 39 mm	0,111	0,450	4.3
0,021	vaneri		0,13*	0,162	5
	ulkopinnan pintavastus			0,040	$s_e$

\*Laskennassa käytetyt lämmönjohtavuuden arvot ovat mitattuja arvoja muille paitsi vanerille ja kipsilevyille, joille on käytetty RakMk C4:n mukaisia keskimääräisiä lämmönjohtavuuden arvoja.



Huom. Kuvat ovat vain havainnollistavia ja niiden mittasuhteet eivät ole oikein.

**Elementin pinta-ala**

leveys	1,249	m
pituus	2,5	m
pinta-ala	3,123	m <sup>2</sup>

**Osa-alueiden pinta-alat**

$f_a$	0,0215
$f_b$	0,9403
$f_c$	0,0310
$f_d$	0,0072
tarkistus	1,0

**Kokonaislämmönvastusten yläkiiarvo**

Osa-alueiden kokonaislämmönvastukset

$R_{Ta}$	5,0315	m <sup>2</sup> K/W
$R_{Tb}$	12,8491	m <sup>2</sup> K/W
$R_{Tc}$	5,0315	m <sup>2</sup> K/W
$R_{Td}$	3,8270	m <sup>2</sup> K/W
$R'_T$	11,7241	m <sup>2</sup> K/W

**Kokonaislämmönvastuksen alalikiarvo**

Rinnakkaisten lohkojen lämmönvastukset

Kerros 3		
$R_3$	10,8299	m <sup>2</sup> K/W
Kerros 4		
$R_4$	0,1668	m <sup>2</sup> K/W
$R''_T$	11,5237	m <sup>2</sup> K/W

**Kokonaislämmönvastus**

$R_T$	11,6104	m <sup>2</sup> K/W
-------	---------	--------------------

**Lämmönläpäisykerroin**

$U$	0,086	W/m <sup>2</sup> K
-----	-------	--------------------

**Ilmaraoista aiheutuva korjaustermi**

$\Delta U''$	0,01	W/(m <sup>2</sup> K)
$R_{3.2}$	12,162	m <sup>2</sup> K/W
$R_{Th}$	11,6104	m <sup>2</sup> K/W
$U_g$	0,010973	W/(m <sup>2</sup> K)

Korjaustermi prosentteina U-arvosta

12,7 %

**Korjattu lämmönläpäisykerroin**

$\Delta U$	0,097	W/(m <sup>2</sup> K)
------------	-------	----------------------

Korkeamman koe-elementin ja 40 mm leveämmän eristetilan sisältävän elementin pyöristämättömistä U-arvoista laskettu erotus on 0,00022 W/(m<sup>2</sup>K).



**LIITE E: KOKEIDEN VIRHEARVIO****Lämpötilan mittausepävarmuus**

Vertailulämpötilan mittausepävarmuus	$s_{ve}$	$\pm 0,02$ °C
Vertailulämpötilan lukematarkkuus	$s_{vi}$	$\pm 0,05$ °C
Antureiden aiheuttama lukemavirhe	$s_l$	$\pm 0,04$ °C
Antureiden lineaarisuusvirhe	$s_{al}$	$\pm 0,05$ °C
Antureiden lukema-arvojen muutokset ajan mukana	$s_{ai}$	$\pm 0,15$ °C
Lämpötilan epätasainen jakaantuminen kalibrointiastiasa	$s_{kl}$	$\pm 0,05$ °C
Jännitemittarin mittausepävarmuus	$s_j$	$\pm 0,0007$ °C
Antureiden asennuksesta johtuva mittausepävarmuus	$s_a$	$\pm 0,04$ °C
Mittaustuloksen yhdistetty mittausepävarmuus	$s_{T,y}$	$\pm 0,183$ °C
$s_{T,y} = \pm \sqrt{s_{ve}^2 + s_{vi}^2 + s_l^2 + s_{al}^2 + s_{ai}^2 + s_{kl}^2 + s_j^2 + s_a^2}$		
Varmuuskerroin	$k$	2
Mittaustulosten kokonaisepävarmuus	$s_T$	$\pm 0,37$ °C
$s_T = \pm s_{T,y} \cdot k$		

**Lämpötilakeskiarvon mittausepävarmuus**

Keskiarvon laskennassa käytettävien antureiden lukumäärä	$n$	12 kpl
Lämpötilakeskiarvojen mittausepävarmuus	$s_{T,k}$	$\pm 0,106$ °C
$s_{T,k} = s_T / \sqrt{n}$		
Lämpötilaeron mittausepävarmuus	$s_{\Delta T,k}$	$\pm 0,15$ °C
$s_{\Delta T,k} = (s_{T,k} \cdot 2) / \sqrt{2}$		

**Lämpövirran mittausepävarmuus**

Lämpötilaero	$s_{\Delta T}$	$\pm 0,0748$ °C
Kalibrointielementin lämmönjohtavuus	$s_{\lambda}$	$\pm 0,0005$ W/mK
Kalibrointielementin paksuus	$s_d$	$\pm 0,001$ m
Kalibrointielementin pinta-ala	$s_A$	$\pm 0,0025$ m <sup>2</sup>
Kokonaislämpövirta kammion vaipan läpi	$s_{\Phi,kok}$	$\pm 0,035$ W

**Lämpövirran mittausepävarmuus kalibrointikokeissa**

Kalibrointielementin paksuus		510	560
Lämpötilaero	$\Delta T$	20,03 °C	20,06 °C
Kalibrointielementin lämmönjohtavuus*	$\lambda_{kal}$	0,037 W/mK	0,037 W/mK
Kalibrointielementin paksuus	$d$	0,51 m	0,56 m
Kalibrointielementin pinta-ala	$A$	3,22 m <sup>2</sup>	3,22 <sup>2</sup>
Kokonaislämpövirta kammion vaipan läpi	$\Phi_h$	67,65 W	67,86 W
Lämpövirran mittausepävarmuus **	$s_{\Phi h,f}$	$\pm 0,075$ W	$\pm 0,070$ W
Lämpövirran mittausepävarmuus ( $k = 2$ )	$s_{\Phi h,k}$	$\pm 0,15$ W	$\pm 0,14$ W
Lämpövirran mittausepävarmuus prosentteina		<b><math>\pm 0,22</math> %</b>	<b><math>\pm 0,21</math> %</b>

\* Kalibrointielementin lämmönjohtavuus ei ole yksikäsitteinen, koska kalibrointielementti koostuu useasta kerroksesta, joiden lämmönjohtavuudet eivät ole samat. Epävarmuuslaskentaan on valittu painotettu keskiarvo.

\*\* Laskettu kaavalla  $s_f = \sqrt{\left(s_1 \frac{\partial f}{\partial u_1}\right)^2 + \left(s_2 \frac{\partial f}{\partial u_2}\right)^2 + \dots + \left(s_n \frac{\partial f}{\partial u_n}\right)^2}$ , missä  $s_1 \dots s_n$  ovat yksittäisten mitattavien suureiden epävarmuuksia ja  $\partial f / \partial u_i$  ovat yhtälön kunkin suureen suhteen laskettuja osittaisderivaattoja. Tarkasteltu funktio:  $\Phi_h = \phi_{kok,kal} - \frac{A_{kal} \cdot \Delta T \cdot \lambda_{kal}}{d_{kal}}$ .

### Rakenteen läpi siirtyvän lämpövirran mittausepävarmuus

Koetilanne		510 IV0,07	560 IV0,06	560 IV0,0	560 IV0,13	560 IV0,4
Lämpötilaero	$\Delta T$	19,98 °C	19,98 °C	20,04 °C	19,92 °C	19,85 °C
Koe-elementin lämmönjohtavuus*	$\lambda$	0,052 W/mK	0,051 W/mK	0,051 W/mK	0,052 W/mK	0,057 W/mK
Koe-elementin paksuus	$d$	0,51 m	0,56 m	0,56 m	0,56 m	0,56 m
Koe-elementin pinta-ala	$A$	3,22 m <sup>2</sup>	3,22 m <sup>2</sup>	3,22 m <sup>2</sup>	3,22 m <sup>2</sup>	3,22 m <sup>2</sup>
Koe-elementin läpi siirtyvä lämpövirta	$\Phi_{rak}$	6,50 W	5,73 W	5,74 W	5,87 W	6,37 W
Lämpövirran mittausepävarmuus **	$s_{\Phi_{h,f}}$	±0,078 W	±0,072 W	±0,072 W	±0,072 W	±0,073 W
Lämpövirran mittausepävarmuus ( $k = 2$ )	$s_{\Phi_{h,k}}$	±0,16 W	±0,14 W	±0,14 W	±0,14 W	±0,15 W
Lämpövirran mittausepävarmuus prosentteina		±2,39 %	±2,50 %	±2,50 %	±2,44 %	±2,27 %

\* Koe-elementin lämmönjohtavuus on laskettu suoraan mitatun koe-elementin lämmönvastuksen avulla.

\*\* Laskettu kaavalla  $s_f = \sqrt{\left(s_1 \frac{\partial f}{\partial u_1}\right)^2 + \left(s_2 \frac{\partial f}{\partial u_2}\right)^2 + \dots + \left(s_n \frac{\partial f}{\partial u_n}\right)^2}$ , missä  $s_1 \dots s_n$  ovat yksittäisten mitattavien suureiden epävarmuuksia ja  $\partial f / \partial u_i$  ovat yhtälön kunkin suureen suhteen laskettuja osittaisderivaattoja. Tarkasteltu funktio:  $\Phi_{rak} = \Phi_{kok} - \Phi_h$ .

### Lämmönläpäisykertoimen mittausepävarmuus

Koetilanne		510 IV0,07	560 IV0,06	560 IV0,0	560 IV0,13	560 IV0,4
Lämpötilaero	$\Delta T$	19,98 °C	19,98 °C	20,04 °C	19,92 °C	19,85 °C
Koe-elementin pinta-ala	$A$	3,22 m <sup>2</sup>	3,22 m <sup>2</sup>	3,22 m <sup>2</sup>	3,22 m <sup>2</sup>	3,22 m <sup>2</sup>
Koe-elementin läpi siirtyvä lämpövirta	$\Phi_{rak}$	6,50 W	5,73 W	5,74 W	5,87 W	6,37 W
Lämmönläpäisykerroin	$U$	0,1026 W/m <sup>2</sup> K	0,0902 W/m <sup>2</sup> K	0,1026 W/m <sup>2</sup> K	0,0930 W/m <sup>2</sup> K	0,0902 W/m <sup>2</sup> K
Lämmönläpäisykertoimen mittausepävarmuus *	$s_{U,f}$	±0,00246 W/m <sup>2</sup> K	±0,00227 W/m <sup>2</sup> K	±0,00227 W/m <sup>2</sup> K	±0,00226 W/m <sup>2</sup> K	±0,00232 W/m <sup>2</sup> K
Lämmönläpäisykertoimen mittausepävarmuus ( $k = 2$ )	$s_{U,k}$	±0,0049 W/m <sup>2</sup> K	±0,0045 W/m <sup>2</sup> K	±0,0045 W/m <sup>2</sup> K	±0,0045 W/m <sup>2</sup> K	±0,0046 W/m <sup>2</sup> K
Lämmönläpäisykertoimen mittausepävarmuus prosentteina		±4,76 %	±4,99 %	±4,39 %	±4,86 %	±5,09 %

\* Laskettu kaavalla  $s_f = \sqrt{\left(s_1 \frac{\partial f}{\partial u_1}\right)^2 + \left(s_2 \frac{\partial f}{\partial u_2}\right)^2 + \dots + \left(s_n \frac{\partial f}{\partial u_n}\right)^2}$ , missä  $s_1 \dots s_n$  ovat yksittäisten mitattavien suureiden epävarmuuksia ja  $\partial f / \partial u_i$  ovat yhtälön kunkin suureen suhteen laskettuja osittaisderivaattoja. Tarkasteltu funktio  $U = \frac{\Phi_{rak}}{A \cdot \Delta T}$ .