



Karelia-ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK)
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

Rakennuksen lämmönläpäisyker- toimien mittaus ja tulkinta

Marko Mononen

Opinnäytetyö, Tammikuu 2025

www.karelia.fi

Sisältö

1	Johdanto	7
2	Rakenteiden energiatekninen suunnittelu	8
2.1	Uudet rakennukset.....	8
2.2	Korjausrakentaminen	9
3	Rakennuksen seinärakenteet	11
3.1	Ulkoseinärakenteet yleisesti	11
3.2	Massiivirakenteiset seinät	12
3.3	Kerrokselliset seinärakenteet.....	13
3.4	Sandwich-rakenteiset seinät	14
3.5	Maanvastaiset seinärakenteet	15
4	Lämpöenergian siirtyminen rakenteessa	16
4.1	Säteily	16
4.2	Johtuminen	17
4.3	Konvektio	17
5	Lämpötekniikka rakenteessa	18
5.3	Lämmönvastus	18
5.4	Pintavastukset ja ilmakerroksen lämmönvastus	18
5.1	Lämmönjohtavuus	19
5.2	Kylmäsillat ja konduktanssi	20
5.5	Lämmönläpäisykerroin	20
6	U-arvon mittaaminen.....	21
6.1	Standardi	21
6.2	Lämpövirtaus anturit	22
6.3	Mittaustiedot ja tulkinta	22
7	Menetelmät	23
8	Mittalaitteisto	24
8.1	Hukseflux TRSYS20	24
8.2	Antureiden asettelu.....	26
8.3	Mittaus ja tulokset	28
9	Mittaukset ja laskenta	29
9.1	Pyöröhirsi 225mm	29
9.1.1	Mittaus	30
9.1.2	Laskenta ja vertailu	32
9.2	Lamellihirsi 180mm	34
9.2.1	Mittaus	35
9.2.2	Laskenta ja vertailu	37
9.3	Purueristeinen rankarunko.....	37
9.3.1	Mittaus	38
9.3.2	Laskenta ja tulkinta	39
9.4	Metallinen ulkoverhous	39
9.4.1	Mittaus	39
9.4.2	Laskenta	42
9.5	Villaeristeinen rankarunko.....	42
9.5.1	Mittaus	43
9.5.2	Laskenta	45
10	Pohdinta.....	46
	Lähteet.....	48

Liitteet

- Liite 1 Mitattujen seinärakenteiden rakennekuvat
- Liite 2 Seinärakenteiden U-arvo laskelmat



OPINNÄYTETYÖ
Tammikuu 2025
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan
insinööri (AMK)

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
+358 13 260 600

Tekijä
Marko Mononen

Nimeke
Rakennuksen lämmönläpäisykertoimien mittaust ja tulkinta.

Toimeksiantaja
Karelia-ammattikorkeakoulu

Tiivistelmä

Ympäristöministeriö on asettanut rakennuskannan energiatehokkuudelle tavoitearvot, jotka rakennusten tulee täyttää vuoteen 2050 mennessä. Tulevaisuudessa Suomessa pitää korjata vanhojen rakennusten energiatehokkuutta. Energiatehokkuutta voidaan parantaa rakennuksen ulkovaipan lämmönvastusta nostamalla. Opinnäytetyössä tutkitaan erilaisten seinärakenteiden lämmönjohtavuutta vertailemalla seinästä mitattuja ja laskettuja arvoja keskenään. Tuloksista arvioidaan, voidaanko rakenteeltaan tunnettuja tai tuntemattomia seiniä luotettavasti mitata käytössä olevista rakennuksista ja mitä luotettava mittaus vaatii. Työssä mittaukset suoritetaan Hukseflux TRSYS20-mittalaitteistoa.

Työssä käydään erilaisia seinärakenteita yleisesti läpi. Teoriaosuudessa käsitellään lämpöenergian siirtymismuodot, sekä seinärakenteissa vaikuttavia lämpöteknillisiä ominaisuuksia. Materiaalien lämmönvastus on riippuvainen ympäristön olosuhteista, eli lämmönvastus ei ole aina vakio. Osana teoriaa käydään paikan päällä mitattavien lämmönvastuksien olemassa olevaa standardia läpi. Mittalaitteistolla suoritettavat mittaukset perustuvat tähän standardiin.

Käytössä olevista rakennuksista voidaan mitata lämmönvastuksia, jotka vastaavat laskennallisiin arvoihin. Mittalaitteisto on kykenevä erilaisien seinärakenteiden lämmönvastusten mittauksiin standardin mukaan. Mittaamalla saatuja arvoja on mahdollista käyttää, esimerkiksi rakennuksen energiatodistuksen laatimisessa. Tutkimusta olisi ollut hyvä jatkaa yhdestä rakenteesta pidemmällä ajanjaksolla, jolloin voisi nähdä ympäristöolosuhteiden vaikutuksen rakenteen lämmönläpäisykertoimeen.

Kieli
suomi

Sivuja 60
Liitteet 2
Liitesivumäärä 10

Asiasanat
Lämmönläpäisykerroin, lämmönvastus, lämmönjohtavuus



THESIS
January 2025
Degree Programme in
Construction Engineering

Tikkarinne 9
FI 80200 JOENSUU
FINLAND
Tel. +350 13 260 600

Author
Marko Mononen

Title
Measurement and Interpretation of Building Thermal Transmittance Coefficients

Commissioned by
Karelia University of Applied Sciences

Abstract

The Ministry of the Environment has set target values for the energy efficiency of the building stock, which buildings must meet by 2050. In the future, the energy efficiency of old buildings must be improved in Finland. Energy efficiency can be improved by increasing the thermal resistance of the building's envelope. The thesis examines the thermal conductivity of various wall structures by comparing values measured and calculated from the wall. The results are used to assess whether walls of known or unknown structure can be reliably measured from buildings in use and what reliable measurement requires. The measurements are performed using the Hukseflux TRSYS20 measuring system.

The thesis generally reviews various wall structures. The theoretical part discusses the forms of thermal energy transfer and the thermal properties that affect wall structures. The thermal resistance of materials depends on environmental conditions, so thermal resistance is not always constant. As part of the theory, the existing standard for thermal resistances measured on site is reviewed. The measurements performed with the measuring equipment are based on this standard.

Corresponding calculated thermal resistances values can be measured from buildings in use. The measuring system can measure the thermal resistances of various wall structures according to the standard. The values obtained by measuring can be used, for example, in preparing a building's energy certificate. It would have been good to continue the research on one structure over a longer period of time in order to see the effect of environmental conditions on the thermal transmittance of the structure.

Language
Finnish

Pages 60
Appendices 2
Pages of Appendices 10

Keywords
thermal transmittance, thermal resistance, thermal conductivity

Käsitteet

Energialuokka	Rakennuksen energian tarvetta kuvaava asteikko. Asteikko on A paras G huonoin.
Energiaselvitys	Selvitys rakennuksen energiankäytöstä.
Energiatehokkuus	Rakennuksen mahdollisimman vähäinen energian kulutus ilman rakennuksen käyttötason tai mukavuuden laskua.
Kohdentuminen	Mittalaitteiston koko ajalta laskeman lämmönvastuksen ero testin viimeisen 24 tunnin ajalta saatuun lämmönvastusarvoon.
Kokonaislämmönvastus	Rakenteen eri kerrosten lämmönvastusten summa.
Kokonaislämpöhäviö	Rakennuksen kaikkien lämpöhäviöiden summa.
Konduktanssi	Aineen kyky siirtää lämpöä.
Konvektio	Lämmön kuljettuminen kaasun- tai nesteen virtauksen mukana.
Kylmäsilta	Rakenteen kohta, jossa on ympäröivää rakennetta selkeästi suurempi lämpöhäviö.
Lämmöneristävyys	Materiaalin kyky estää lämmön johtumista lävitseen. Käänteisarvo lämmönjohtavuudelle. Tunnetaan myös lämpöresistiivisyys nimellä.
Lämmönjohtavuus	Materiaalin kyky johtaa lämpöä. Käänteisarvo lämmöneristävyydelle.
Lämmönläpäisykerroin	Rakenteen läpi jatkuvuustilassa virtaavan lämpövirran tiheys. Tunnetaan myös U-arvo nimellä.
Lämmönsiirtokerroin	Lämpötehon määrä, joka virtaa rakenteen läpi. Tunnetaan myös k-arvo nimellä.

Lämmönvastus	Vastusarvo rakenteen läpi johtuvalle lämmölle. Tunnetaan R-arvo nimellä. On U-arvon käänteisluku.
Lämpöenergia	Aineen atomien liikettä.
Lämpöhäviö	Rakennuksen sisältä ulos siirtyvän lämpömäärä.
Lämpövirta	Lämmön siirtymisnopeus ainekerroksen läpi.
Lämpövirtamittari	Mittari joka näyttää lämpövirran suuruuden.
Lämpövuo	Rakenteen läpi virtaavan lämpövirran tiheys pinta-ala yksikköä kohden.
Lämpövuoanturi	Mittalaitteen anturi joka muuttaa lämpövuon sähköiseksi signaaliksi.
Tasauslaskelma	Laskentamalli joka kuvaa rakennuksen energiatehokkuutta ja lämpöhäviöitä.
TRSYS20	Mittalaitteisto jolla voi mitata rakenteen lämmönvastusta.
Yhteneväisyys	Mittalaitteiston laskema testauksen ensimmäisen 2/3 osan ja viimeisen 2/3 osan ajalta laskettujen lämmönvastuksien ero.
Vertailulämpöhäviö	Rakennusosien määrättyjen lämmönläpäisykertoimien ja rakennusosien pinta-aloista laskettava lämpöhäviö.

1 Johdanto

Työn aiheena on tarkastella käytössä olevien rakennusten seinärakenteiden lämmöneristävyyttä mittaamalla ja saatuja tuloksia verrataan laskennallisiin arvoihin. Tarkoituksena on myös tutkia, voidaanko mitattuja U-arvoja käyttää rakennusten energiatehokkuuden laskemiseen. Tulevaisuudessa rakennuksista halutaan mahdollisimman energiatehokkaita, jolloin korjausrakentamisessa tehtävät valinnat ovat tärkeitä rakennuksen energiatehokkuuden parantamisessa. Ympäristöministeriö on julkaissut vuonna 2020 korjausrakentamisen strategian, jossa Suomessa olemassa oleva rakennuskanta halutaan saattaa erittäin energiatehokkaaksi vuoteen 2050 mennessä (Ympäristöministeriö 2020).

Työssä käydään aluksi erilaisia seinärakenteita läpi, jonka jälkeen käsitellään lämpöenergian siirtymismuotoja. Teoriaosuudessa kerrotaan myös rakenteiden lämpötekniikkaa, sekä paikan päällä tapahtuvaan mittaukseen ohjeistavia kansainvälisiä standardeja. Tutkimuksessa käytettävä mittalaitteisto on Hukseflux Thermal Sensors TRSYS20. Mittalaitteisto perustuu ISO 9869-1 standardin määrittelemään lämpövirta mittaus menetelmään, jonka mukaan suoritetaan työssä tapahtuvat mittaukset. Tavoitteena on myös kasvattaa tietämystä paikan päällä tehtäviin mittauksiin liittyvistä ongelmista.

Seinärakenteita tutkitaan viidestä eri rakennuksesta. Kaksi omakotitaloa on 2000-luvun alkupuolen hirsitaloja ja kolme on vanhempia peruskorjattuja omakotitaloja. Työ rajataan vain seinärakenteiden tutkimiseen, vaikka rakennuksen lämmöneristävyyteen liittyy olennaisesti myös muut rakennuksen vaippaan kuuluvat rakenteet.

2 Rakenteiden energiatekninen suunnittelu

2.1 Uudet rakennukset

Uuden rakennuksen suunnittelussa ja myös rakennuksen korjaus- ja muutostöissä tulee laatia energiaselvitys, joka sisältää muun muassa rakennuksen kokonaisenergiakulutuksen laskennan. Lämpöhäviöiden määräystenmukaisuuden osoittaminen kuuluu osaksi energiaselvitystä. Rakennusosien kuten seinärakenteiden lämpöhäviöiden osoittamiseen liittyy U-arvo, eli lämmönläpäisykertoimen laskenta. Lämpö- ja energiateknisessä suunnittelussa yhtenä osa-alueena voidaan pitää lämmöneristyksen suunnittelua. (RIL ry 2014, 25.)

Lämpöhäviöiden määräystenmukaisuuden osoittaminen rakennuksissa tapahtuu vertailemalla rakennuksen lämpöhäviöiden tasauslaskelmaa vertailulämpöhäviön laskelmaan. Tasauslaskelman alittaessa vertailulämpöhäviöiden laskelman katsotaan lämpöhäviöiden määräystenmukaisuus osoitetuksi. Vertailulaskelman lämpöhäviöiden tavoite tulee määräyksistä tai rakennuttajan tiukemmaksi asettamista tavoitteista. Tasauslaskelmassa rakennuksen ilmanvaihdon lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde ja vaipan lämmönläpäisykertoimet sekä ilmanvuodot lasketaan yhteen kokonaislämpöhäviön selvittämiseksi. (RIL ry 2014, 25-26.)

Rakennusosat suunnitellaan yleisesti vastaamaan tai alittamaan asetetut U-arvot. Yksittäisen rakenneosan U-arvo voi olla isompi kuin määräyksissä on asetettu, kunhan rakennuksen kokonaislämpöhäviöiden tasauslaskelma alittaa vertailulämpöhäviöiden laskelman. (Ympäristöministeriö 2008, 9.)

Rakennuksen vaipan vertailu lämpöhäviöiden arvoja rakenneosittain:

- seinä 0,17 W/(m²K)
- massiivipuuseinä (keskimääräinen paksuus vähintään 180mm) 0,40 W/(m²K)
- yläpohja ja ulkoilmaan rajoittuva alapohja 0,09 W/(m²K)

- ryömintätilaan rajoittuva alapohja 0,17 W/(m²K)
- maata vasten oleva rakennusosa 0,16 W/(m²K)
- ikkuna ja ovi 1,0 W/(m²K).

(Ympäristöministeriö 2017.)

2.2 Korjausrakentaminen

Ympäristöministeriön pitkän aikavälin korjausrakentamisen strategia 2020–2050 on laadittu EU komission suositusten mukaisesti, johdattamaan Suomen rakennuskanta kohti energiatehokasta ja lähes hiilivapaata vuoteen 2050 mennessä. Uudet rakennukset täyttävät määräysten mukaisuuden, joten ennen vuotta 2020 valmistuneet rakennukset tulisi muuttaa määräykset täyttäväksi. Rakennukset täyttävät kansalliset vaatimukset, jos ne kuuluvat energialuokkiin A, B tai C. Rakennuskannan energiatehokkuus paranee uudisrakentamisen myötä, mutta myös vanhojen rakennusten poistumisen kautta. (Ympäristöministeriö 2020, 2.)

Energian kulutus jakaantuu 1960 – 1970 luvuilla rakennetussa omakotitalossa keskimäärin: ilmanvaihto 25%, valaistus/sähkö 24%, ulkoseinät 16%, ikkunat 14%, yläpohja 12%, käyttövesi 8% ja alapohja 1%, eli 43% vanhan omakotitalon energian kulutuksesta tulee rakennuksen ulkovaipasta. (Ympäristöministeriö 2020,10.)

Manner – Suomessa omakoti- ja paritaloja on 1,1 miljoonaa rakennusta. Näistä 72% ei vastaa 2018 vuonna asetettuja energialuokkia A, B tai C, mutta kaikista rakennuksista 91% on vain vakituisesti asuttuja. Taulukko 1 havainnollistaa omakoti- ja paritalojen energialuokkajakaumaa vuosikymmenittäin. (Ympäristöministeriö 2020, 9-11.)

Indikaattori energialuokat	-1959	1960-69	1970-79	1980-89	1990-99	2000-09	2010-19	Kaikki rakennukset
A	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	1 %	14 %	1 %
B	3 %	4 %	5 %	6 %	4 %	16 %	80 %	12 %
C	8 %	10 %	16 %	15 %	15 %	27 %	4 %	13 %
D	32 %	25 %	27 %	45 %	53 %	48 %	1 %	35 %
E	45 %	41 %	43 %	33 %	28 %	8 %	0 %	31 %
F	8 %	13 %	6 %	1 %	0 %	0 %	0 %	4 %
G	4 %	6 %	3 %	0 %	0 %	0 %	0 %	2 %
Yhteensä	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
Kerrosalaosuudet	26 %	8 %	13 %	18 %	12 %	14 %	9 %	100 %
Tietolähteet	Energiatodistusrekisteri, 2018 lainsäädännön mukaiset energiatodistukset, ARA Rakennukset ja kesämökkit, Tilastokeskus Rakennus- ja asuntotuotanto, Tilastokeskus							

Taulukko 1. Omakotitalojen ja paritalojen kerrosalaosuuksilla painottamalla lasketut energialuokkajakaumat vuosikymmenittäin (Ympäristöministeriö 2020, 11).

Korjausrakentamisessa vanhojen omakoti- ja paritalojen lämpöhäviöitä pyritään pienentämään, jolloin energiatehokkuus parantuisi. Energiatehokkuuden parantamiseen kustannustehokkain toimenpide on lisätä lämmöneristystä rakennuksen ulkovaippaan. Vaippa rakenteen tiiveys tulee myös varmistaa, jotta rakenne toimii kosteusteknillisesti oikein ja ilmanvuotokohtia on mahdollisimman vähän. (Ympäristöministeriö 2020, 28.)

Energiatehokkuuden parantaminen korjausrakentamisessa tapahtuu rakennesakohtaisesti. Jokaiselle rakennesalle on annettu vaatimus, joka tulee vähintään täyttyä rakennetta suunnitellessa ja toteuttaessa. Ulkoseinillä U-arvo tulee olla puolet alkuperäisestä, mutta enintään 0,17 W/(m²K). Yläpohjassa U-arvo tulee olla puolet alkuperäisestä, mutta enintään 0,09 W/(m²K). Alapohjassa energiatehokkuutta tulee parantaa mahdollisuuksien mukaan ja ikkunoiden sekä ovien U-arvo on oltava 1,0 W/(m²K) tai parempi. (Ympäristöministeriö 2013, 2.)

Suomessa on paljon rakennuksia joiden energiatehokkuutta tulee parantaa vuoteen 2050 mennessä. Lämpöhäviöiden pienentäminen rakennuksen ulkovaipassa parantaa rakennuksen energiatehokkuutta ja näin ollen nostaa energialuokkaa. Rakenteiden U-arvojen määrittäminen antaa suunnittelulle lähtökohdan rakenteen energiatehokkuuden parantamiseksi.

3 Rakennuksen seinärakenteet

3.1 Ulkoseinärakenteet yleisesti

Yleisimpiä ulkoseinärakenteita on kolmea tyyppiä. Sandwich-rakenteisissa seinissä on kantavan sisä- ja ulkokuoren välissä eristekerros. Sandwich-rakenteita ovat muun muassa betonielementtiseinät, eristeharkkoseinät ja ohutlevypeltiseinät. Massiivirakenteiset seinät koostuvat yhdestä materiaalista esimerkiksi puusta. Hirsiseinät ja kevytbetoniseinät ovat massiivirakenteisia seiniä. Kerroksellisissa seinärakenteissa on useita eri materiaalikerroksia, joilla jokaisella on oma toiminnallinen tarkoitus. Samassa kerroksessa voi olla myös kahta eri materiaalia esimerkiksi kantava puurunko ja eriste puurungon tolppien välissä. Puurunkoinen seinärakenne on yleinen kerroksellinen seinärakenne. Neljäntenä voidaan pitää harvinaisempia maanvastaisia seinärakenteita kuten kellarin seinät. (Vinha 2008, 403-404.)

Ulkoseinälle on paljon vaatimuksia niin kantavana rakenteena kuormituksien osalta, kuin asumismukavuuteen liittyvät lämmöneristys, äänitekniikka ja kosteusrasitukset. Turvallisuutta tulee myös huomioida suunnitellessa rakenneratkaisuja esimerkiksi tulipalon takia. Ulkoseinälle suunnitellaan käyttöikä varmuuksineen ja ulkonäkötavoitteet tulee myös saavuttaa. Kylmäsilat, asennusvirheet ja huonosti eristetyt yksityiskohdat tulisi minimoida rakennetta suunnitellessa ja toteuttaessa. (RIL ry 2014, 122.)

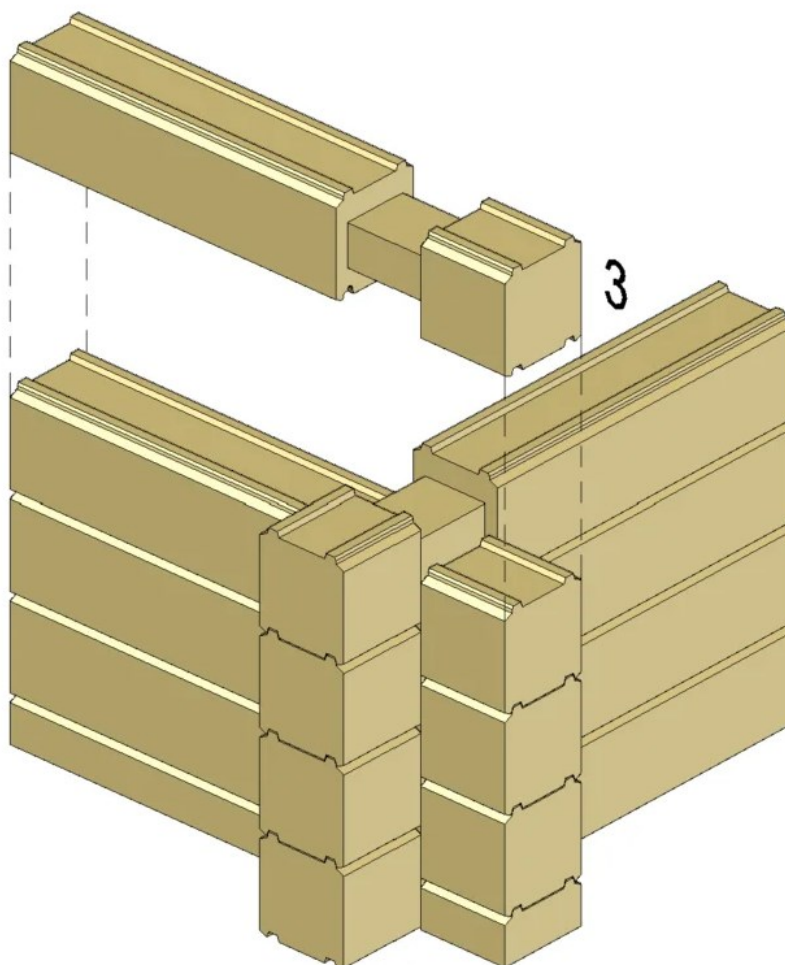
Ulkoseinän ulkoverhous kiinnityksineen suunnitellaan kestämään viistosaderasitukset, kosteuden tai veden kulkeutuminen ja haitallisten aineiden pääsy rakenteisiin. Kerroksellisten seinärakenteiden erillisen ulkoverhouksen tausta on oltava tuuletettu. Taustan tuuletusväliä ei tarvitse, jos ulkoverhousmateriaali pysyy haittaa aiheuttamatta haihduttamaan kertyneen kosteuden ulkoilmaan, kun lämpö- ja kosteusolosuhteet muuttuvat. (RIL ry 2014, 122-123.)

Seinärakenteen lämmöneristys tulee olla riittävän suuri, jotta saavutetaan vähintään määräysten mukainen lämmönläpäisykerroin. Eristeen ja tuulensuojaukerroksen tiiveys estää lämmöneristykselle haitallista konvektiota eristekerroksessa. (Siikanen 2014, 50.)

Ilmavuodot rakenteen läpi kuljettavat kosteutta rakenteeseen, joka on huono kosteustekniselle toiminnalle. Ilmantiivistyksenä rakenteessa voi olla yhtenäinen rakennekerros, kuten betoniseinä tai erillinen höyrynsulkukerros, kuten höyrynsulkumuovi. (RIL ry 2014, 122-123.)

3.2 Massiivirakenteiset seinät

Massiivirakenteiset seinät ovat pääsääntöisesti yhtä materiaalia esimerkiksi puuta (kuva 1). Seinän materiaali toimii kantavana rakenteena, lämmöneristeenä, höyrynsulkuna ja tuulensuojana. Rakenteen ilmantiiveys riippuu rakenteen saumojen tiiveydestä. Massiivirakenne suojataan viistosateelta ulkopintaan levitettävällä pinnoitteella, joka on vettä hylkivä, mutta vesihöyryä läpäisevä. Massiivirakenteeseen voi lisätä höyrynsulun tai lämpöeristystä. (Vinha 2008, 403-404.)



Kuva 1. Hirsirunko massiivirakenteena (Kuva: Puuinfo).

3.3 Kerrokselliset seinärakenteet

Kerroksellisessa seinärakenteessa on rakenteisiin tunkeutuvan sadeveden estävä ulkoverhous. Ulkoverhouksen takana on tuuletusväli, joka hoitaa kosteuden poistamisen. Tuuletusvälin jälkeen sisälle päin mentäessä on rakenteessa tuulensuojakerros lämmöneristeessä tapahtuvan konvektiovirtauksen estämiseksi. Tuulensuojana voi toimia tuulensuojalevy tai -kalvo. Pienen ilmanläpäisevyyden omaava lämmöneriste ei tarvitse erillistä tuulensuojaa, koska lämmöneristeessä ei tapahdu haitallisissa määrin ilmavirtausta. Kantava runko on seinärakenteessa monesti samassa kerroksessa lämmöneristyksen kanssa. Sisäilman ja lämmöneristeen välillä tulee olla ilmatiivis kerros, jolla on riittävän suuri vesihöyryvastus. Vesihöyry ei saa päästä tunkeutumaan eristekerrokseen

aiheuttamaan kosteusvaurioita. (Vinha 2008, 404.) Kuvasta 2 näkyy kerroksellisen seinärakenteen eri kerrokset.

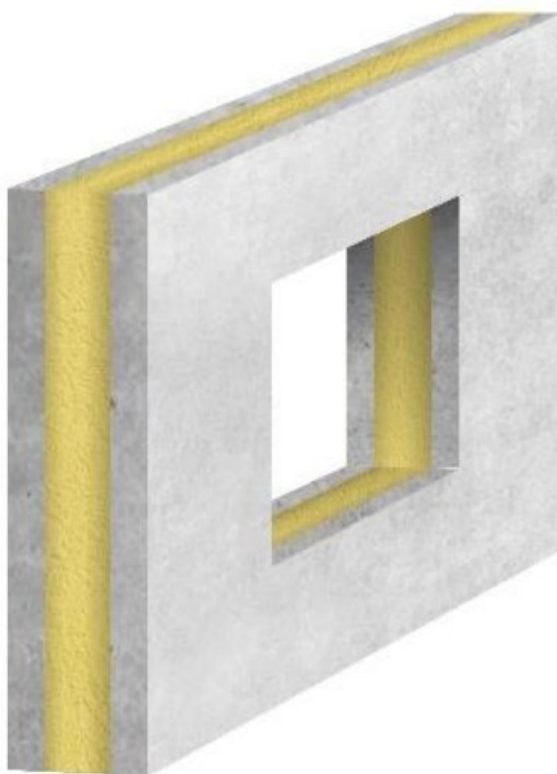


Kuva 2. Kerroksellisen seinärakenteen poikkileikkaus (Kuva: Eksergia.fi).

3.4 Sandwich-rakenteiset seinät

Sandwich-rakenne koostuu yhtenäisestä ulko- ja sisäkuoresta, joiden välissä on lämmöneristyskerros (kuva 3). Betonisandwich rakenteessa sisäkuori toimii kantavana rakenteena ja myös ilmatiiviinä höyrynsulkukerroksena. Ulkokuori toimii tuulensuojana ja sadeveden estävänä kerroksena. Ulkokuoren ja lämmöneristyskerroksen välillä voi olla tuuletusrako tai lämmöneristeessä on uritus tuulettusta varten. Lämmöneristeinä käytetään yleensä jäykkää mineraalivillaa tai solumuovia. (RIL ry 2014, 124–125.)

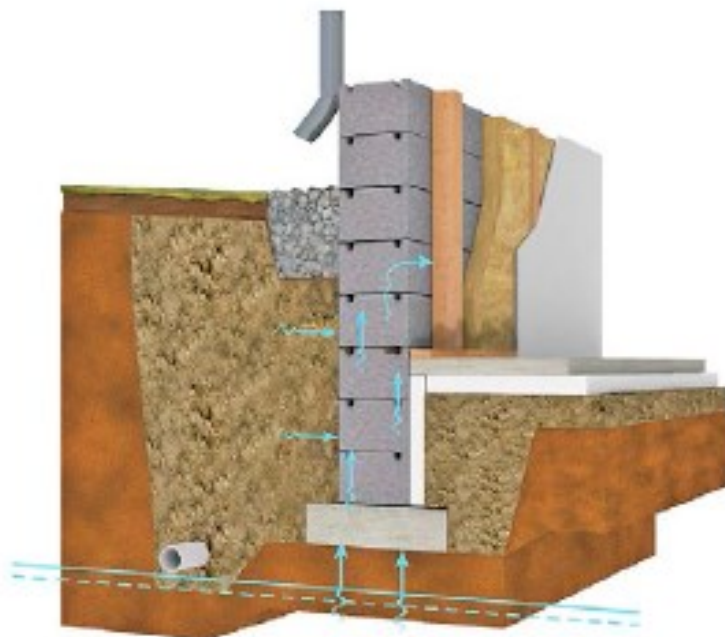
Sandwich-rakenteista saadaan rakennettua hyvin ilmatiiviitä, jos elementtien liitokset pystytään tiivistämään muihin runkorakenteisiin saumamassoilla. Lämmöneristyskerros saadaan yhtenäiseksi rakenteen kerroksellisuuden takia. (RIL ry 2014, 125.)



Kuva 3. Betonisandwich elementti (Kuva: Tenel Oy).

3.5 Maanvastaiset seinärakenteet

Maanvastaisessa seinärakenteessa käytetään käänteistä eristystä, jossa lämmöneristys on maata vasten (kuva 4). Eristyksen ja kantavan seinän väliin tulee vedeneristyskerros, joka toimii myös ilmansulkuna. (RIL ry 2014, 160.) Kantava seinärakenne tulee olla kivirakenteinen esimerkiksi betoni, betoniharkko tai kevytsoraharkko ovat sopivia. Seinärakenne kuivaa sisälle päin, koska vedeneristyskerros sijaitsee seinän ulkopuolella. Lämmöneristyksen on oltava kosteuden kestävää sekä maanpaineen kestävää. Eristyskerroksen ja maaperän väli täytetään kapillaarisen veden estävällä kerroksella, esimerkiksi sepelillä. (Vinha 2008, 404–405.)



Kuva 4. Maanvastaisen seinän havainnekuva (Kuva: Fise.fi).

4 Lämpöenergian siirtyminen rakenteessa

4.1 Säteily

Lämpöenergialla tarkoitetaan atomien tai molekyylien värähtelyliikettä. Aineessa lämpöenergia voi siirtyä säteilemällä, johtumalla tai ilmavirtauksen mukana. (Siikanen 2014, 40.)

Lämpöenergia siirtyy säteilyssä valon nopeudella sähkömagneettisen aaltoliikkeen välityksellä. Kaikki absoluuttisen nollapisteen yläpuolella olevat kappaleet lähettävät säteilyä, eli ihmiset säteilevät myös energiaa ympärillensä. (Björkholtz 1997, 12). Säteilyssä energia ei tarvitse mitään väliaineita, eli energiaa siirtyy myös tyhjiössä (Vinha 2008, 406).

Säteilyn osuessa johonkin pintaan, se joko heijastuu tai absorboituu osittain tai kokonaan. Lämpö voi säteillä eri aallonpituuksilla. Auringonsäteily on lyhytaaltoista ja läpäisee osittain ikkunalasin. Auringon säteilyenergia pääsee

ikkunalasien läpi rakennuksen sisälle, jossa se absorboituu pinnoille tuoden lämpöenergiaa sisälle. (Siikanen 2014, 40).

4.2 Johtuminen

Johtumisessa lämpöenergia siirtyy molekyylistä liike-energiana toiseen molekyyliin (Vinha 2008, 406). Liike-energian siirtymistä aineessa kutsutaan lämpövirtaukseksi. Lämpöenergia pyrkii tasoittumaan samalla tasolle aineessa eli lämpöenergia virtaa lämpimästä kylmempään. (Björkholtz 1997, 12.)

4.3 Konvektio

Konvektiossa lämpöenergiaa kulkeutuu kaasun tai nesteen virtauksen mukana. Konvektiota on luonnollista tai pakotettua. Luonnollisessa konvektiossa aineen lämpötilaeroista johtuva paine-ero aiheuttaa virtauksen. Pakotetussa konvektiossa virtaus tapahtuu ulkoisen voiman avulla, esimerkiksi tuuli tai ilmanvaihtokone. (Björkholtz 1997, 13.)

Ilma on kaasuseosta, joka sisältää vesihöyryä. Ilmalla on kokonaispaine, joka riippuu kaasun lämpötilasta ja osapaineista. Kokonaispaine-erot seinärakenteen eripuolilla aiheuttavat ilmavirtaus potentiaalinen rakenteen läpi, jos rakenne ei ole riittävän tiivis. Konvektion mukana siirtyy myös ilmaan sitoutunutta vesihöyryä, joka voi aiheuttaa rakenteeseen kosteusvaurioita. (Björkholtz 1997, 57.)

Luonnollista konvektiota tapahtuu rakennuksessa ja rakenteissa pystysuorana ilmanvirtauksena ilman tiheyserojen takia. Lämmin harvempi ilma pyrkii nousemaan ylöspäin, kun kylmä tiheämpi ilma laskeutuu alapäin. Konvektio voi tapahtua yläpohjan läpi rakenteen huonon tiiveyden takia. (Siikanen 2014, 34.)

Pakotetussa konvektiossa rakenteessa tulee myös olla epätiiveyttä ilman kulku reitiksi. Pakotetussa konvektiossa paine-erot rakenteiden eripuolille tapahtuu

ulkoisen voiman vaikutuksesta. Ilmanvaihtokone, savupiippuvaikutus ja tuuli aiheuttavat pakotettua konvektiota. (Siikanen 2014, 35.)

5 Lämpötekniikka rakenteessa

5.3 Lämmönvastus

Lämmönvastus on materiaalikerroksen tai materiaalikerroksien kyky vastustaa lämpövirtaa kerroksen läpi. Lämmönvastus R kuvaa kerroksen pintojen eripuolilla vaikuttavan pintalämpötilojen eron rakenteen läpi kulkevan lämpövirran suuruuden suhteen. Yksikkönä lämmönvastuksessa on ($\text{m}^2\text{K/W}$). Lämmönvastuksella voi kuvata yhden materiaalikerroksen tai kerroksellisen rakenteen kokonaislämmönvastusta. (Siikanen 2014, 46-47.) Kokonaislämmönvastusta merkitään R_{tot} . Kokonaislämmönvastus sisältää jokaisen materiaalikerroksen lämmönvastuksen sekä sisä- ja ulkopinnan pintavastukset yhteenlaskettuna. R_{tot} esitetty kaavassa (1). (Rafnet 2020, 16.)

$$R_{\text{tot}} = R_{\text{si}} + R_1 + R_2 + \dots + R_{\text{se}} \quad (1)$$

jossa

R_{tot} = rakenteen kokonaislämmönvastus ($\text{m}^2\text{K/W}$)

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

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

R_1, R_2, \dots, R_n = rakenteen yksittäisen materiaalikerroksen lämmönvastus ($\text{m}^2\text{K/W}$).

5.4 Pintavastukset ja ilmakerroksen lämmönvastus

Rakenteen pinnasta lämpö siirtyy, joko ympäröivään ilmaan tai ympäröivästä ilmasta rakenteeseen rajapinnan konvektion avulla. Sisätilaan rajoittuvan

pinnan vastusta merkitään R_{si} ja ulkoilmaan rajoittuvan pinnan vastusta merkitään R_{se} . (Rafnet 2020, 14.)

Tuulettumaton ilmakerros on rakennekerrosten välissä oleva ilmatila, joka ei ole yhteydessä sisä- tai ulkoilmaan. Tuulettumattomaksi ilmatilaksi katsotaan myös ilmakerros, johon johtaa pieniä aukkoja, mutta aukkojen kautta tuleva tuuletusvirtaus ei johda tilan reunalta toiselle. Tuulettumattomat ilmakerrokset otetaan huomioon kokonaislämmönvastuksessa. (Siikanen 2014, 47.)

5.1 Lämmönjohtavuus

Lämmönjohtavuus λ osoittaa jatkuvuustilassa olevan lämpövirran tiheyden materiaalikerroksen paksuuden suunnassa, kun materiaalikerroksen pintojen välillä vallitsee yhden Kelvin-asteen lämpötilaero. Lämmönjohtavuuden yksikkö on (W/mK). (RakMK 2002, 3.)

Lämmönjohtavuus on lämmönvastuksen käänteisarvo materiaalikerroksen paksuuden mukaan. Lämmönjohtavuuden ja lämmönvastuksen riippuvuus materiaalikerroksen paksuudesta on esitetty kaavassa (2). (Rafnet 2020, 14.)

$$\lambda = \frac{d}{R} \quad (2)$$

jossa

λ = materiaalikerroksen lämmönjohtavuus (W/mK)

d = materiaalikerroksen paksuus (m)

R = materiaalikerroksen lämmönvastus (m^2K/W).

Lämpö- ja kosteusolosuhteiden muutos vaikuttaa materiaalin lämmönjohtavuuteen. Lämpötilan tai kosteuden noustessa materiaalissa nousee myös materiaalin lämmönjohtavuus. Rakenteen käyttöolosuhteet tulee ottaa huomioon ja rakennusmateriaalin valmistajan ilmoittama lämmönjohtavuuden arvo λ_D tulee korjata SFS-EN ISO 10456 mukaisilla muuntotekijöillä olosuhteita vastaavaksi suunnitteluarvoksi λ_U . Valmistajan ilmoittaman lämmönjohtavuuden arvon korjaaminen suunnitteluarvoksi esitetty kaavassa (3). (Rafnet 2020, 11–13.)

$$\lambda = \lambda_D * F_t * F_m * F_a \quad (3)$$

λ = materiaalikerroksen lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo (W/mK)

λ_D = materiaalikerroksen lämmönjohtavuuden ilmoitettu arvo (W/mK)

F_t = lämpötilan muuntotekijä

F_m = kosteuden muuntotekijä

F_a = vanhenemisen muuntotekijä

Lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo λ_U tai λ on laskelmissa käytettävä arvo.

Lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo kertoo aineen lämmönjohtavuuden, jossa on otettu vanhenemisen, kosteuden ja lämpötilan muutosten vaikutus lämmönjohtavuuteen. Yksikkönä on (W/mK). (Siikanen 2014, 40.) Materiaalien suunnittelulämpötila on yleensä 10 °C ja materiaalin tulee olla kuiva. Näistä olosuhteista mitattu lämmönjohtavuus on materiaalin lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo λ . (Rafnet 2020, 13.)

5.2 Kylmäsillat ja konduktanssi

Kylmäsillaksi kutsutaan sellaista rakennusosaa, josta lämpövirran suuruus on huomattavasti isompi, kuin sitä ympäröivän eristävän rakennusosan lämpövirta. Kylmäsilta aiheuttaa lisäkonduktanssia, eli johtokykyä rakennusosan läpi. Konduktanssia käytetään rakenteen lämmönläpäisykerroimen laskentaan. Kylmäsilta voi olla pistemäinen tai jatkuva eli viivamainen. Pistemäisiä kylmäsiltoja rakenteisiin aiheuttavat siteet ja kiinnikkeet. Viivamaisia kylmäsiltoja syntyy esimerkiksi betoni- tai rautarakenteista. (Björkholtz 1997, 19-20.)

5.5 Lämmönläpäisykerroin

Lämmönläpäisykerroin U kertoo rakennusosan pinta-alan läpi kulkevan lämpövirran tiheyden, kun rakennusosan eri puolilla on ero ilman lämpötiloissa. Lämmönläpäisykerroimen yksikkö on (W/m²K). Lämmönläpäisykerroimessa otetaan myös huomioon rakennusosan pintavastukset, eli U -arvo kertoo

lämpövirran suuruuden lämpimästä ilmasta rakenteen läpi kylmään ilmaan. (Björkholtz 1997, 14-15.)

Lämmönläpäisykerroin on rakennusosan kokonaislämmönvastuksen R_{tot} käänteisluku, joka on esitetty kaavassa (4) (Siikanen 2014, 51).

$$U = \frac{1}{R_{\text{tot}}} \quad (4)$$

jossa

U = rakenteen lämmönläpäisykerroin ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)

R_{tot} = rakenteen kokonaislämmönvastus ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$)

Rakennuksen energiakulutuskalkelmissa käytetään korjattua lopullista lämmönläpäisykerrointa U_c , joka sisältää korjaustermillä ΔU huomioon otetut kylmäsiltojen aiheuttamat lisäkonduktanssit, ilmavuotojen korjaustekijän ja muut lämmönvastusta heikentävät tekijät rakenteessa. Energiakulutuskalkelmissa esitettävällä lämmönläpäisykerroimella U tarkoitetaan korjattua lämmönläpäisykerrointa. Korjaustermien ja lämmönläpäisykerroimen yhteys on esitetty kaavassa (5). (Siikanen 2014, 50-52.)

$$U_c = U + \Delta U \quad (5)$$

jossa

U_c = rakenteen korjattu lämmönläpäisykerroin ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)

U = rakenteen laskettu lämmönläpäisykerroin ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)

ΔU = lämmönläpäisykerroimen korjaustermi ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$).

6 U-arvon mittaaminen

6.1 Standardi

Kansainvälisessä standardissa 9869-1 kuvaillaan lämmönjohtavuuden mittaamista rakenneosasta paikan päällä. Rakenneosan U-arvo voidaan mitata lämpövirtamittarilla, jos rakenneosan molemmin puolin vaikuttavat vakaat lämpötilat. Tämmöistä vakaata tilaa paikan päällä harvemmin tavataan, mutta on olemassa keinoja mitata U-arvo vaihtelevissa olosuhteissa. (ISO 2014, 5.)

Epävakaissa olosuhteissa mittaus voidaan kumminkin suorittaa jos :

- rakenteen lämmönsiirtokerroin ja lämpötekniset ominaisuudet pysyvät samana mitattujen lämpötilaerojen alueella.
- rakenteeseen sitoutuneen lämpöenergian muutos on mitätön rakenteesta läpi kulkevan lämpöenergian määrään verrattuna. (ISO 2014, 5.)

6.2 Lämpövirtaus anturit

Lämpövirtausmittarissa on lämpöresistiivinen levy, joka muuttaa sen läpi kulkevan lämpövirran sähköiseksi signaaliksi. Anturin läpikulkeva lämpövirta on suoraan verrannollinen sähköisen signaalin suuruuteen. (ISO 2014, 10.)

Rakenteen molemmin puolin vaikuttavien ilmanlämpötilojen mittaukseen käytetään lämpötila-antureita, jotka muuttavat lämpötilan sähköiseksi signaaliksi. Käytettäessä U-arvon mittaukseen rakenteeseen vaikuttavan ilman lämpötilojen eroa, tulee lämpöanturit suojata lämpö- ja auringonsäteilyltä sekä tuulelta. (ISO 2014, 10.)

6.3 Mittaustiedot ja tulkinta

Mittalaitteiston antureilta keräämät tiedot tulee tallentaa jatkuvasti tai tietyn ajanjaksoin kokonaisten päivien ajan. Mittauksen kesto riippuu mitattavan rakenteen ominaisuuksista, kuten massasta tai eristävydestä. Rakenteen hyvä eristävyys ja korkea massa lisäävät mittaukseen tarvittavaa kestoja. Mittauksen pituus muuttuu myös, jos sisä- ja ulkolämpötilat vaihtelevat paljon ennen mittausta ja sen aikana. Lämpötilojen ollessa vakaat lämpövoiantureiden

ympärillä on mittauksen vähimmäiskesto 72 tuntia eli 3 päivää. Epävakaista lämpötiloista johtuen mittauksen kesto voi olla yli 7 päivää. (ISO 2014, 14.)

Tulosten analysoinnissa voi käyttää keskiarvo menetelmää tai dynaamista menetelmää (ISO 2014, 14). Tässä työssä käytettävä mittalaitteisto käyttää keskiarvo menetelmää tulosten saamiseksi, joten dynaamista menetelmää ei käsitellä tarkemmin.

Keskiarvo menetelmässä rakenteen lämpövirran läpäisykyky saadaan lämpövirran keskimääräisen tiheyden ja keskimääräisen lämpötilaeron osamäärästä. Tulokset ovat päteviä vasta, kun kahden peräkkäisen 24 tunnin väliltä saatujen tulosten arvot eivät poikkea yli $\pm 5\%$ toisistaan. (ISO 2014, 14-15.)

7 Menetelmät

Hukseflux TRSYS20 mittalaitteisto mittaa kahdesta eri kohdasta seinärakenteen sisä- ja ulkopuolen lämpötila eroa, sekä lämpövuon suuruutta. Mittalaitteisto tallentaa mittaustulokset sisäiseen muistiinsa. Mittaustulosten raakadata ladataan mittalaitteiston muistista tietokoneelle. Raakadata tuodaan Huksefluxin tarjoamaan Excel-pohjaiseen analysointityökaluun, jossa mittaustuloksia tulkitaan. Analysointityökalusta pystyy tarkastelemaan mittalaitteiston tallentamia antureiden arvoja graafisesti tai luettelosta. Mittausarvoja voi muokata analyysityökalussa, jos huomataan virheellisiä mittausrvoja. Esimerkiksi jos lämpövuuanturi on asennettu väärin päin ja kaikki anturin antamat arvot ovat negatiivisia, voi etumerkin muuttaa analysointityökalussa. Työkalu ilmoittaa laskentaan perustuen onko mittauskohdan mittaustulokset hyväksyttäviä.

Seinärakenteiden lämmönläpäisykertoimen laskemiseen käytetään Puuinfon sivuilta löytyvää puurakenteen U-arvon määrittämiseen tarkoitettua mitoitusohjelmaa, joka perustuu SFS-EN ISO 6946 standardiin. Ohjelma

määrittää rakenteelle ylä- ja alalikiarvon perusteella kokonaislämmönvastuksen, josta lasketaan rakenteen U-arvo. Mitoitusohjelmaan voi määrittää laskettavalle rakenteelle korjaustasoja sen mukaan miten hyvin rakenne on tehty.

Esimerkiksi huonosti tehtyjen rakenteiden eristeiden saumoihin jääneet ilmaraot heikentävät rakenteen lämmönvastusta. (Puuinfo 2012.) Tässä työssä oletetaan kaikkien seinärakenteiden olevan korjaustasossa 0, eli seinärakenteet ovat tehty todella hyvin.

Materiaaleille löytyy mitoitusohjelmasta valmiita lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoja. Kaikille työssä oleville seinärakenteiden materiaaleille ei löydy lämmönjohtavuuden arvoja mitoitusohjelmasta. Puuttuvat arvot haetaan materiaalien valmistajien sivustoilta tai Ympäristöministeriön rakennusosien lämmönläpäisykertoimen laskenta oppaasta (Ympäristöministeriö 2024).

8 Mittalaitteisto

8.1 Hukseflux TRSYS20

TRSYS20 on korkean tarkkuuden mittalaitteisto rakennusten kerrosrakenteiden lämmönvastuksen ja lämmönläpäisevyyden mittaamiseen paikan päällä (kuva 5). Mittalaitteistoa käytetään standardin ISO 9869 mukaisesti pitkän aikavälin keskiarvo mittauksiin. TRSYS20 järjestelmässä on kaksi HFP01-mallista lämpövuoanturia ja kaksi paria keskenään sovitettuja lämpötila-antureita. (Hukseflux 2023, 5.)



Kuva 5. TRSYS20 mittalaitteisto (Kuva: Hukseflux).

Rakenteen lämmönvastuksen mittaaminen perustuu lämpövuointurin ja lämpötila-anturiparin samanaikaiseen aikakeskiarvoon. Lämpövuointurista saadaan rakenteen läpi virtaava lämpövuoto ϕ ja lämpötila-anturiparista rakenteen yli vaikuttava lämpötilaero ΔT lämpövuointurin kohdalta. Mittalaitteistossa on kaksi lämpövuointuria ja kaksi lämpötila-anturiparia, jolloin rakenteen lämmönvastusta pystytään mittaamaan kahdesta paikasta samanaikaisesti. Lämmönvastuksen R riippuvuus lämpövuodosta ja lämpötilaerosta on esitetty kaavassa (6). (Hukseflux 2023, 5 - 8.)

$$R = \Delta T / \phi \quad (6)$$

jossa

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

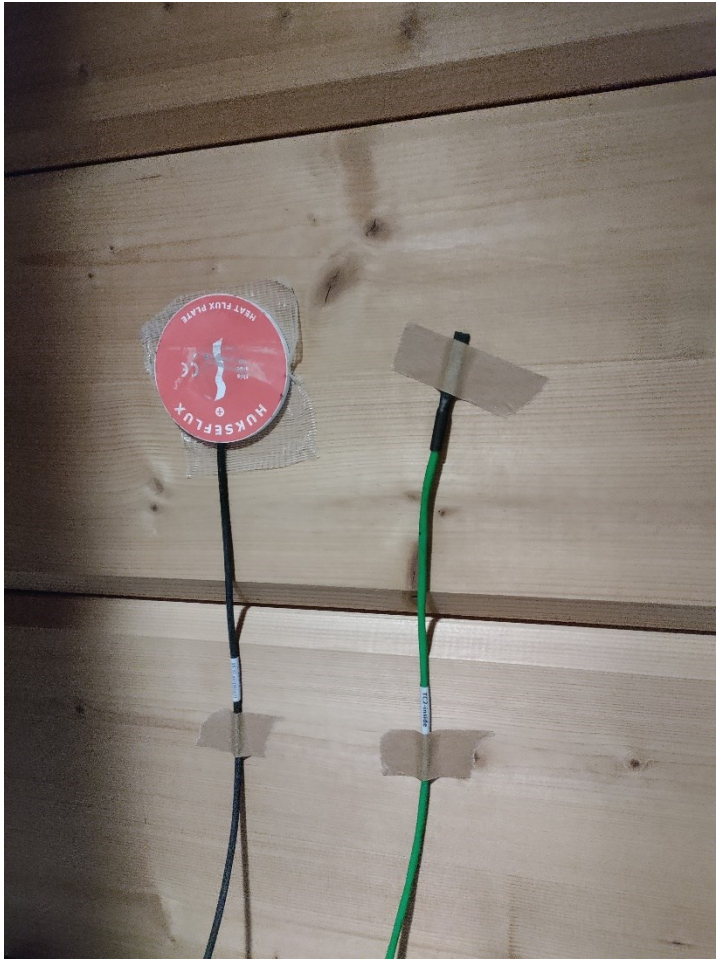
ΔT = rakenteen yli vaikuttava lämpötilaero (K)

ϕ = rakenteen läpi virtaava lämpövuoto (W/m^2).

Mittalaitteisto tallentaa antureilta mitatut arvot laitteeseen, josta ne voi ladata tietokoneelle tulosten käsittelyä varten. Laitteiston kytketään tietokoneeseen lähiverkko- tai usb-liittimen kautta. Tietokoneelta laitteiston ohjaaminen tapahtuu verkkoselaimen kautta, joten erillistä ohjelmisto ei tarvita. (Hukseflux 2023, 6 - 9.)

8.2 Antureiden asettelu

Mittauksessa on tarkoitus tutkia valitun rakenteen läpi virtaavaa lämpövirtaa ja rakenteen pintoihin vaikuttavaa ilman lämpötilaa. Mitattavan rakenteen tulee edustaa valtaosaa tutkittavasta rakenteesta (kuva 6). Antureita ei tule asentaa kylmäsiltojen, halkeamien tai semmoisten laitteiden läheisyyteen, jotka toiminnallaan muuttavan ilman lämpötilaa. Lämpökamera on hyvä apuväline antureiden sijoituspaikkoja etsiessä. Antureiden sijoittelussa pyritään etsimään rakennuksesta paikka, missä on mahdollisimman tasaiset ympäristön olosuhteet. (Hukseflux 2023, 26.)



Kuva 6. HFP01 lämpövuoanturi ja sisälämpötila-anturi asennettuna.

Mittausantureiden kiinnityskohta seinällä tulee olla puhdas ja tasainen. Seinän voi pyyhkiä puhdistuspyyhkeellä tai hioa hiekkapaperilla puhtauden varmistamiseksi. (Hukseflux 2023, 26.)

Ulkopuolen lämpötila-anturit (TC-1 outside ja TC-2 outside) tulee sijoittaa rakennuksen varjonpuolelle sateelta suojaiseen paikkaan, johon tuulee mahdollisimman vähän. Anturit kannattaa peittää seinärakennetta vastaavalla pinnoitteella, jos anturiin kohdistuu auringon- tai keinovaloa. Sisäpuolen lämpötila-anturit (TC-1 inside ja TC-2 inside) tulee sijoittaa ulkopuolen antureiden kohdalle. Sisäpuolella anturit kannattaa asentaa paikkaan, jossa on mahdollisimman vähän liikettä ja esimerkiksi suoran auringonvalon estämiseksi sälekaihtimien sulkeminen on hyvä vaihtoehto. Anturit voidaan kiinnittää seinään teipillä, kaksipuoleisella teipillä tai muulla vastaavalla kiinnitystavalla. (Hukseflux 2023, 26 – 28.)

Lämpövuoanturit (HFP01) kannattaa asentaa sisätiloihin lämpötila-anturien läheisyyteen. HFP01-anturin punainen puoli tulee osoittaa lämpövirran lähteen suuntaa. Yleensä lämpövirta virtaa sisätiloista ulkoilmaa kohden, joten anturin punainen puoli asetetaan sisäilmaan päin. Jos lämpövirta virtaa “väärään” suuntaan anturin läpi, voi mittaustuloksia korjata jälkikäteen muuttamalla arvojen etumerkkiä. Lämpövuoanturin kiinnittämisessä on jätettävä mahdollisimman pieni ilmarako seinän ja anturin väliin, jotta lämmönjohtavuus on mahdollisimman suuri näiden kahden välillä. Hukseflux suosittelee TESA 4939 kaksipuoleisen teipin käyttöä HFP01-anturien kiinnittämiseksi seinään. (Hukseflux 2023, 26 – 28.)

8.3 Mittaus ja tulokset

Mittalaitteistoa ohjataan tietokoneella. Ennen mittauksen aloittamista tulee mittalaitteistoon syöttää uuden testin tiedot, asettaa käytössä olevan sähköverkon verkkotaajuus ja lämpövuoantureiden kalibrointi tiedot. Kalibrointi tiedot tulee antureiden mukana tehtaalta. Mittaus lähtee käyntiin painamalla “start” painiketta. (Hukseflux 2023, 23-29.)

Mittauksen etenemistä seurataan tietokoneella nettiselaimen kautta. Seurannasta voi katsoa miten pitkään testaus on kestänyt ja onko testauksen kohdentuminen, yhteneväisyys sekä pituus halutuissa rajoissa. Kohdentumisen tai yhteneväisyyden ollessa liian suuri käyttöliittymä suosittelee testin jatkamista, kunnes tulokset ovat hyväksyttäviä. (Hukseflux 2023, 29.)

Tuloksia varten TRSYS20 käyttöliittymästä pystyy lataamaan Excel-pohjaisen analyysityökalun. Mittalaitteiston tuottama raakadata tuodaan Excel-tiedostoon, joka esittää testin tulokset. (Hukseflux 2023, 31.) Tuodessa tuloksia Excel-tiedostoon havaittiin maiden välisiä eroavaisuuksia. Hukseflux toimii Amerikkalaiseen tapaan, eli desimaalierottimena toimii piste, kun taas Suomessa desimaalierotin on pilkku. Raakadataa tuodessa kaikkien

mittausarvojen desimaalierottimet tulee muuttaa pisteistä pilkuiksi, jotta suomenkielinen Excel osaa käsitellä tietoa.

9 Mittaukset ja laskenta

9.1 Pyöröhirsi 225mm

Ensimmäinen mittaus suoritettiin pyöröhirsiseen omakotitaloon. Talo on alle 100 m² kooltaan, joka hankaloitti mitta-antureiden asentamista niin, ettei asukkaiden liikkuminen talossa vaikuta mittausarvoihin. Antureiden paikaksi valikoitui talon pohjoispuoli sisäänkäynnin vierestä. Seinän molemmin puolin tulee asentaa lämpötila-anturit, joista ulkopuolelle tulevien antureiden johdotukset vietiin kulkemaan raolleen jätetyn tuuletusikkunan kautta. Lämpötila-anturit aseteltiin vastaamaan sijainniltaan toisiaan seinän molemmin puolin. Ikkunan raot tukittiin pyyhkeillä, jolla pyrittiin vähentämään poikkeuksellisia lämpö- ja ilmavirtoja. TRSYS20- mittalaitteisto ja kannettava tietokone sijoittui lähelle antureita.

Pyöreä hirsi vaatii enemmän tarkkuutta lämpövuoantureiden asettelussa. Anturit tulisi asettaa semmoiseen kohtaan, joka edustaa valtaosaa seinärakenteesta. Pyöröhirren paksuin osuus ei edusta valtaosaa rakenteesta ja hirsien väliset saumat voivat toimia huonosti eristettynä, jopa vuotokohtana. HFP01- lämpövuoanturi on taipumaton ja tasainen, joten sen reunat jäävät koholle pyöreän hirren pinnasta. Lämpövuoanturit tulisi asettaa niin, että ilmaa tai lämpöä ei pääse virtaamaan anturien sivusta, vaan kaikki lämpövirtaus tulisi kohtisuoraan seinästä anturiin. Anturit päädyttiin asettamaan hirren paksuimpaan kohtaan, koska silloin anturit ovat kohtisuorassa vaakatasossa ja helpoiten tiivistettävissä. Sivusta tulevan lämpövirran estämiseksi tuli anturien "koholla" olevat reunat täyttää silikonilla, jotta riittävä tiiveys saavutettaisiin.

9.1.1 Mittaus

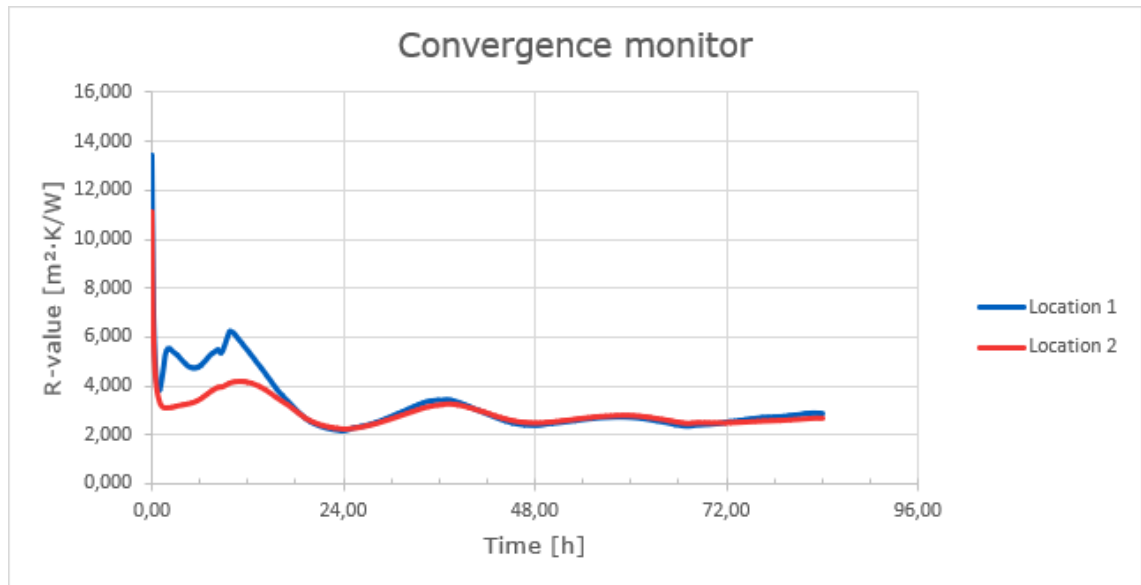
Mittauksen vähimmäispituus on 72 tuntia. Tätä mittausta suoritettiin 84 tuntia, koska antureiden läheisyydessä liikkui asukkaita päivittäin, mikä mahdollisesti häiritsee mittausta. Mittausta päättäessä mittalaitteisto ilmoitti, että mittausta tulisi jatkaa, koska kohdentuminen ja yhteneväisyys ovat liian suuret. Aikataulun takia mittaus oli pakko lopettaa. Tuloksia tulkittaessa analyysityökalulla havaittiin mittausten osittain epäonnistuneen. Seinän lämmönvastuiksi saatiin -paikassa 1: 2,87 (m²K/W)
-paikassa 2: 2,71 (m²K/W).

Kuvasta 7 nähdään paikan 1 kohdentuminen ja yhteneväisyys eivät ole hyväksyttävissä rajoissa. Samasta kuvasta nähdään myös paikan 2 yhteneväisyys ei ole hyväksyttävä.

Results		
	Location 1	Location 2
R-value [m ² ·K/W]	2,87	2,71
Experiment summary and quality checks		
	Location 1	Location 2
Time interval [h]	84,00	
ISO 9869:2014 data quality criteria: (section 7.1, page 9)		
- duration:	OK	OK
- convergence:	NOT OK	OK
- self consistency:	NOT OK	NOT OK

Kuva 7. Pyöröhirtisen rakennuksen mittaustuloksia.

Kuvasta 8 ilmenee, että 1 paikan mittaustuloksissa on paljon hajontaa ensimmäisen 24 tunnin aikana.



Kuva 8. Pyöröhirtisen rakennuksen ensimmäisen mittauksen kohdentumisen tulokset.

Mittauksen on mahdollista saada onnistumaan, jos otetaan vain mittauksen päättymistä edeltävät 72 tunnin mittaustulokset huomioon. Näin suoritettuna paikan 2 mittaustulokset ovat hyväksyttäviä, mutta paikan 1 kohdentuminen ja yhteneväisyys olivat vielä liian suuret, kuten kuvasta 9 nähdään.

Lämmönvastuksiksi saatiin

-paikassa 1: 2,54 (m²K/W)

-paikassa 2: 2,48 (m²K/W).

Results		
	Location 1	Location 2
R-value [m²·K/W]	2,54	2,48
Experiment summary and quality checks		
	Location 1	Location 2
Time interval [h]	72,00	
ISO 9869:2014 data quality criteria: (section 7.1, page 9)		
- duration:	OK	OK
- convergence:	NOT OK	OK
- self consistency:	NOT OK	OK

Kuva 9. Pyöröhirtisen rakennuksen viimeisen 72 tunnin mittaustulokset.

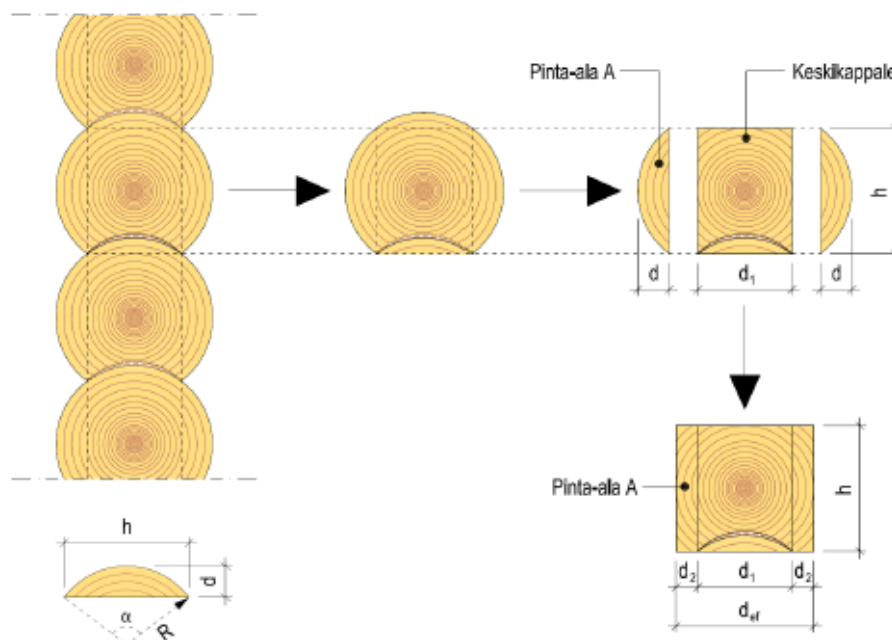
Ongelmaa etsiessä tarkasteltiin mittalaitteiston tallentamia mittausarvoja.

Lämpötilat molemmissa paikoissa vaikuttavat loogisilta ja niissä ei tapahdu

yllättäviä hyppäyksiä tai suuria poikkeuksia toisistaan. Paikan 1 lämpövuoanturi antaa epäsäännöllisesti negatiivisia arvoja, mikä kertoisi lämpövirran suunnan kääntyneen ulkoa sisälle, vaikka lämpötila-anturien arvot näyttävät lämpövirran menevän sisältä ulos. Kellon ajat milloin suunnan muutokset tapahtuivat kertovat, että mahdollinen ihmisten liike on aiheuttanut häiriötä mittaukseen. Paikan 1 arvoja ei voida käyttää rakenteen U-arvon arvioinnissa häiriöiden takia, joten tulokset tulkitaan paikan 2 arvojen mukaan. Seuraavissa mittauksissa täytyy huomioida antureiden parempi sijoittelu.

9.1.2 Laskenta ja vertailu

Pyöreän hirren lämmönjohtavuutta ei voi laskea hirren paksuimman osuuden mukaan vaan rakenteelle tulee määrittää tehollinen paksuus. Tehollinen paksuus määritetään muuttamalla keskikappaleen molemmiin puolin jäävien ympyräsegmenttien poikkipinta-alan vastaamaan suorakulmiota. (Puuinfo 2011, 3.)



Kuva 10. Puuinfon ohje pyöröhirsiseinän tehollisen paksuuden määrittämiseen (Kuva: Puuinfo.fi).

Tehollisen paksuuden kaavat (7-10) esitetty alla:

$$\alpha = 4 * \arctan\left(\frac{2*d}{h}\right) \quad (7)$$

$$A = \frac{R^2}{2} \left(\frac{\alpha}{180^\circ} * \pi - \sin\alpha \right) \quad (8)$$

$$d_2 = \frac{A}{h} \quad (9)$$

$$d_{ef} = d_1 + 2 * d_2 \quad (10)$$

jossa

α = hirren segmentin kulma (°)

d = hirren segmentin korkeus (mm)

h = hirren segmentin leveys (mm)

A = hirren segmentin pinta-ala (mm²)

R = hirren säde (mm)

d_1 = hirren keskikappaleen leveys (mm)

d_2 = segmentin muutettu leveys (mm)

d_{ef} = hirren tehollinen leveys (mm).

Tarkasteltavan talon hirren paksuus on 225 mm jolloin

$$R = 112,5 \text{ mm}$$

$$h = 180 \text{ mm}$$

$$d_1 = 140 \text{ mm}$$

$$d = \frac{225 \text{ mm} - 140 \text{ mm}}{2} = 42,5 \text{ mm}$$

$$\alpha = 4 * \arctan\left(\frac{2 * 42,5 \text{ mm}}{180 \text{ mm}}\right) = 101,1^\circ$$

$$A = \frac{112,5 \text{ mm}^2}{2} \left(\frac{\alpha}{180^\circ} * \pi - \sin\alpha \right) = 4957,7 \text{ mm}^2$$

$$d_2 = \frac{4957,7 \text{ mm}^2}{180 \text{ mm}} = 27,5 \text{ mm}$$

$$d_{ef} = 140 \text{ mm} + 2 * 27,5 \text{ mm} = 195,1 \text{ mm}$$

Rakennuksen U-arvon lasketaan 195,1 mm hirren paksuudella. Laskennallinen U-arvo saadaan Puuinfon laskenta työkalulla, johon syötetään rakennekerrokset ja niiden lämmönläpäisykertoimet, josta saadaan pintavastusten lisäyksellä

rakenteen U-arvo. Tämän rakenteen U-arvoksi tuli 0,56 (W/m²K) , kun käytetään lämmönjohtavuutena 0,12 (W/mK). Rakenteen lämmönläpäisykerroin on mitatun lämmönvastuksen ja pintavastusten summan käänteisarvo. Mitattuun lämmönvastukseen tulee lisätä rakenteen pintavastukset, koska lämpötila-anturit on asennettu mittaamaan pinnan lämpötilaa. Mittaustuloksista saadaan rakenteen U-arvoksi

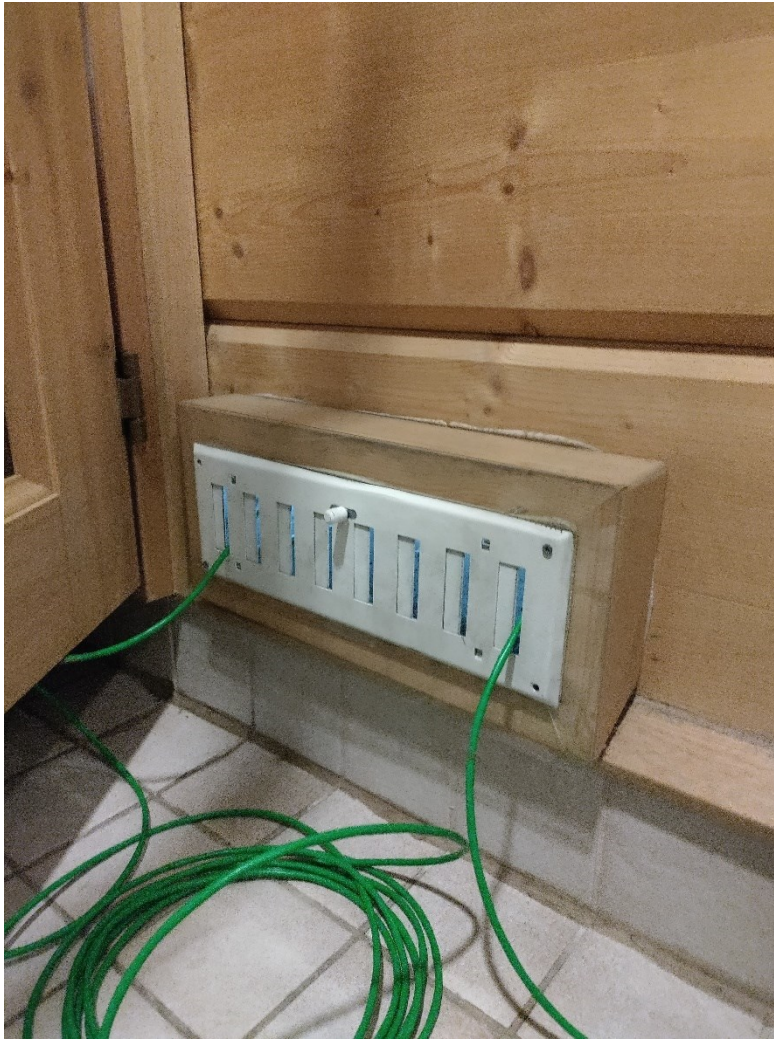
$$2,48 \left(\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right) + 0,04 \left(\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right) + 0,13 \left(\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right) = 2,65 (\text{m}^2\text{K}/\text{W})$$

$$\frac{1}{2,65 (\text{m}^2\text{K}/\text{W})} = 0,38 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right).$$

Mittauksen perusteella U-arvo on noin 32% parempi kuin laskettu arvo. Kaikki anturit oli mittauksessa asennettu hirren paksuimpaan kohtaa.

9.2 Lamellihirsi 180mm

Rakennus on ylläpito lämmityksellä oleva kesämökki. Mittausten aikana talon sisäilmaa ei jäädytetty tai lämmitetty . Ihmisiä ei myöskään liikkunut talon sisällä, mikä olisi voinut vaikuttaa mittausarvoihin. Tarkoituksena oli testata mittausjärjestelmää tilanteessa missä rakenteen yli vaikuttaa pieni ja jopa kääntyvä lämpövirta. Mökki sijaitsee aukealla paikalla, joka hankaloitti ulkopuolen antureiden asettelua, niin ettei suora auringon valo osuisi niihin. Mittalaitteisto ja anturit asennettiin rakennuksen koillisivulle, koska siellä oli raitisilmakanava saunalle, josta ulkolämpötila-antureiden johdot oli mahdollista tuoda seinän toiselle puolelle. Ikkunan välistä ei ollut mahdollista tuoda johtoja, koska mökillä ei käy säännöllisesti ihmisiä, jolloin avonainen ikkuna voisi olla riski. Kuvasta 11 näkyy ulkolämpötila-antureiden johtojen reititys rakennuksen ulkopuolelle.



Kuva 11. Ulkolämpötila-antureiden reititys raitisilmakanavan läpi.

9.2.1 Mittaus

Mittauksia suoritettiin pienimmän vaatimuksen mukaan kolme päivää. Kolmen päivän jälkeen mittausjärjestelmä ilmoitti, että kohdentuminen ei ole riittävä kummassakaan mittauspisteessä (kuva 12). Mittauksia olisi tullut jatkaa, jotta oltaisiin saatu järjestelmän vaatimat parametrit täytettyä. Seuraaviin mittauskohteisiin sovitus aikataulun takia, mittauksia ei pystytty jatkamaan. Tuloksia täytyy tulkita ja etsiä syy miksi kohdentuminen ei täytynyt.

Results		
	Location 1	Location 2
R-value [m ² ·K/W]	-0,43	-1,35
Experiment summary and quality checks		
	Location 1	Location 2
Time interval [h]	73,00	
ISO 9869:2014 data quality criteria: (section 7.1, page 9)		
- duration:	OK	OK
- convergence:	NOT OK	NOT OK
- self consistency:	OK	OK

Kuva 12. Lamellihirren mittauksen yhteenveto.

Lämmönvastukseksi työkalu ilmoittaa

-paikassa 1: -0,43 (m²K/W)

-paikassa 2: -1,35 (m²K/W).

Negatiivinen lämmönvastus kertoo lämpövirran olleen suurimman osan ajasta oletettua suuntaa vastaan. Anturit asennettiin olettaen lämpövirran kulkevan sisältä ulos. Mittaustuloksia tutkiessa näkyy lämpövirran olevan päivällä ulkoa sisälle ja yöllä sisältä ulos.

TRSYS20 laitteiston ohjeen mukaan mittausarvojen etumerkkejä voidaan muuttaa niin, että lämpövirran suunta olisi aina sama. Mittausarvojen etumerkkien jälkikäsitteilyn jälkeen mitatuiksi lämmönvastuksiksi tuli

-paikassa 1: 0,15 (m²K/W)

-paikassa 2: 0,40 (m²K/W).

Järjestelmä näyttää kohdentumisen ja yhteneväisyyden olevan riittämättömiä molemmissa paikoissa kuten kuvasta 13 nähdään.

Description	Symbol/Formula	Value location 1	Value location 2	Units
Default exp_id		26		
Exp_id		26		
Thermal resistance 1	$R(t_{final})$		0,15	0,40 (m ² ·K)/W
<u>Experiment duration assesment:</u>				
Data interval	t_{final}		72,50	h
Duration	$t_{final} > 72h?$	OK		
<u>Convergence assesment:</u>				
Index datapoint 24 h before last datapoint			292	
Thermal resistance 24 h before end	$R(t_{final} - 24h)$		-0,98	-0,71 (m ² ·K)/W
Change in last 24 h	$\Delta R/R$		760,6%	275 % -
Convergence	$\Delta R/R \leq 5\%?$	NOT OK	NOT OK	
<u>Temporal consistence assesment:</u>				
First 2/3 of data up to			48	h
Last 2/3 of data from			24,50	h
Index 1/3			150	
Index 2/3			291	
Resistance first INT(2/3*NUMBER_OF_DAYS)			-1,03	-0,77 (m ² ·K)/W
Resistance last INT(2/3*NUMBER_OF_DAYS)			0,14	0,40 (m ² ·K)/W
Difference			786,38 %	287,68 %
Consistent		NOT OK	NOT OK	

Kuva 13. Lamellihirren mittaustuloksen raportti näkymä.

9.2.2 Laskenta ja vertailu

180mm lamellihirren laskennallinen lämmönläpäisykerroin on 0,60 W/(m² K).

Mitattua arvoa ei saatu, koska mittausta suoritettiin liian lyhyen aikaa.

Rakenteen yli vaikuttava lämpövirta oli tässä tapauksessa niin pieni, että kolmen päivän mittaus ei ollut riittävän pitkä.

9.3 Purueristeinen rankarunko

Kohde on vanhempi talo, jossa on alun perin ollut pelkkä sahanpuru eristeenä. Taloa on lisälämmöneristetty sisältä sekä ulkoa kivivillalla. Kohde on jatkuvassa käytössä ja se sijaitsee hyvin tuulisessa paikassa järvenrannalla. Mittauksia varten talosta pystyttiin rauhoittamaan yksi huone suoritettavien mittausten ajaksi. Huone sijaitsee luoteen puoleisessa kulmassa taloa. Puut toivat varjoa iltä-auringon aikaa ulkolämpötila-antureiden kohtaan, joten auringon säteily vääristäisi mahdollisimman vähän ulkolämpötila-anturien lukemia. Talossa on ilmalämpöpumpulla hoidettu viillennys.

9.3.1 Mittaus

Ulkolämpötila-antureiden johdotukset vietiin tuuletusikkunan kautta ulos. Raollaan oleva ikkuna eristettiin pehmeällä eristeellä. Rakenteen ulkokuoren ja tuulensuojavillan välissä on tuulettuva rako. Rako on mittojensa puolesta hyvin tuulettuva. Ulkolämpötila-antureita ei voinut asentaa tuulensuojaa vasten, joten lämmönvastus voi vaihdella riippuen tuuletusraossa liikkuvan ilman määrästä. Mittausta suoritettiin 72 tuntia, jonka jälkeen järjestelmä näytti mittausten onnistuneen. Tuloksia tulkittaessa laskentatyökalu näyttää kohdentumisen olevan virheellinen (kuva 14).

Results		
	Location 1	Location 2
R-value [m²-K/W]	-0,42	-1,31
Experiment summary and quality checks		
	Location 1	Location 2
Time interval [h]	72,00	
ISO 9869:2014 data quality criteria: (section 7.1, page 9)		
- duration:	OK	OK
- convergence:	NOT OK	NOT OK
- self consistency:	OK	OK

Kuva 14. Purueristeisen rankarungon mittauksen yhteenveto.

Työkalun ilmoittamat lämmönvastukset ovat

-paikassa 1 -0,42 (m²K/W)

-paikassa 2 -1,31 (m²K/W).

Lämmönvastusarvojen ollessa negatiivisia voidaan päätellä, että lämpövirta on ollut lämpövuointureiden asennussuuntaa vastaan ainakin osan aikaa.

Mittaustuloksia tarkastellessa on huomattavissa, että lämpövirta kulkee lämpövuointuria vastaan, eli ulkoa sisälle. Tulosten etumerkkien korjauksen jälkeen saatiin lämmönvastuksen arvoiksi

-paikassa 1 4,11 (m²K/W)

-paikassa 2 4,04 (m²K/W).

9.3.2 Laskenta ja tulkinta

Laskennalliseksi U-arvoksi saatiin 0,21 W/(m² K). Mitattujen lämmönvastusten keskiarvosta 4,08 (m²K/W) saadaan rakenteen U-arvoksi

$$4,08 \left(\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right) + 0,04 \left(\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right) + 0,13 \left(\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right) = 4,25 (\text{m}^2\text{K}/\text{W})$$

$$\frac{1}{4,25 (\text{m}^2\text{K}/\text{W})} = 0,24 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right).$$

Mitattu lämmönjohtavuus on laskennallista 13% huonompi. Tässä kohteessa mittaukset näyttävät onnistuneen lukuun ottamatta lämpövuoanturien asennus suuntaa. Jälkikäsitteilyllä virheen pystyi kumminkin korjaamaan.

9.4 Metallinen ulkoverhous

Alkuperäisesti talon pääasiallinen eriste on ollut sahanpuru. Rakennusta on laajennettu ja samalla eristeet on vaihdettu kivivillaan. Laajennuksessa talon ulkoverhous on vaihdettu puusta aaltopeltiin. Peltiulkokuoren ja tuulensuojalevyn välissä on tuuletusrako, johon antureita yritettiin sijoittaa tuulensuojalevyä vasten, mutta se ei onnistunut vaakakoolauksen takia. Rakennus on jatkuvassa käytössä, joten mittauksia varten yksi kaakkoispuolella oleva huone varattiin mittauksia varten. Rakennuksessa on koneellinen ilmanvaihto, mutta ei viilennystä.

9.4.1 Mittaus

Sisälämpötila-anturit kiinnitettiin teipillä seinään lämpövuointureiden viereen. Ulkopuolen lämpötila-anturit vietiin tuuletusikkunan kautta ulos ja ikkunan raot eristettiin. Ulkolämpötila-anturit asetettiin poimupellin pintaan (kuva 15), vastaavaan kohtaan sisäpuolen lämpötila-antureiden kanssa.



Kuva 15. Ulkolämpötila-antureiden reititys.

Mittausta suoritettiin vähän yli 72 tuntia, jolloin järjestelmä ilmoitti mittauksen onnistuneen molemmissa mittauspaikoissa. Tulosten tarkastelussa analyysityökalu näyttää mittauksien epäonnistuneen kohdentumisen ja yhteneväisyyden osalta molemmissa paikoista (kuva 16).

Results		
	Location 1	Location 2
R-value [$\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$]	7,50	7,37
Experiment summary and quality checks		
	Location 1	Location 2
Time interval [h]	72,33	
ISO 9869:2014 data quality criteria: (section 7.1, page 9)		
- duration:	OK	OK
- convergence:	NOT OK	NOT OK
- self consistency:	NOT OK	NOT OK

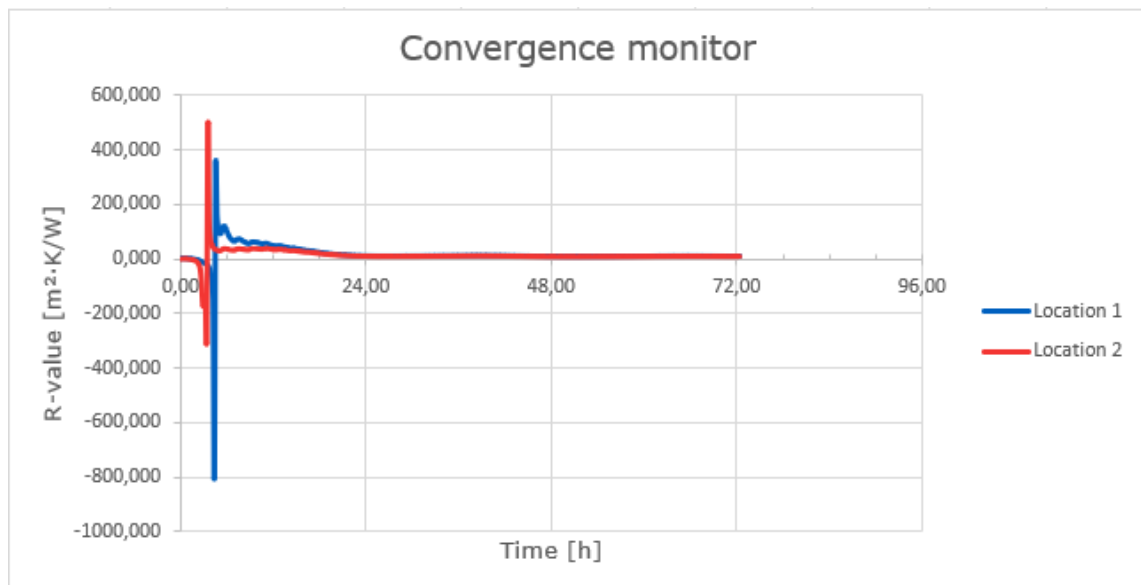
Kuva 16. Peltikuorisen rakenteen mittauksen yhteenveto.

Lämmönvastukseksi työkalu ilmoittaa

-paikassa 1: 7,50 ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$)

-paikassa 2: 7,37 ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$).

Kuvasta 17 nähdään kohdentumisen diagrammissa piikkejä lämmönvastusarvossa muutama tunti mittauksen aloituksen jälkeen.



Kuva 17. Mitattua lämmönvastusta metallisen ulkokuoren seinärakenteesta.

Mittaustuloksia tulkittaessa huomattiin lämpövirran olevan ensimmäisen tunnin ajan negatiivinen, vaikka lämpötila-anturit näyttävät sisälämpötilan olevan suurempi kuin ulkolämpötila. Kohdentumisen kuvaajassa (kuva 17) olevat lämmönvastusten huippuarvot johtuvat kumulatiivisen lämpövirran muutoksesta

negatiivisen puolelta positiiviselle. Kumulatiivista lämpötilaeroa jaettaessa pienellä nollan lähellä olevalla kumulatiivisella lämpövirralla, voi tuloksesta tulla valtavan suuri.

Etumerkkien muuttamisen jälkeen tulokset ovat sallituissa 5% rajoissa ja lämmönvastuksiksi tuli

-paikassa 1: 6,29 (m²K/W)

-paikassa 2: 6,13 (m²K/W).

9.4.2 Laskenta

Ulkovuorauksen ja tuulensuojalevyn välissä oleva tuulettuva rako otetaan laskennassa huomioon hyvin tuulettuvana. Laskennallinen U-arvo on 0,18 W/(m² K). Mitattujen lämmönvastusten keskiarvosta 6,21 (m²K/W) saadaan rakenteen mitatuksi U-arvoksi

$$6,21 \left(\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right) + 0,04 \left(\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right) + 0,13 \left(\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right) = 6,38(\text{m}^2\text{K}/\text{W})$$

$$\frac{1}{6,38 (\text{m}^2\text{K}/\text{W})} = 0,16 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right).$$

Rakenteen mitattu U-arvo on 11% laskennallista parempi. On mahdollista että tuulettuvassa raossa ei kierrä ilma oletetulla tavalla, eli rako voi olla tuulettumaton tai lievästi tuulettuva. Laskennallinen U-arvo olisi pienempi, jos tuuletusraon lämmönvastus otetaan huomioon.

9.5 Villaeristeinen rankarunko

Viimeinen kohde on hirsirunkoinen omakotitalo, johon on tehty elintasolaajennus. Talon ollessa jatkuvasti käytössä ei remontoitua hirsirungon kohdalta päästy mittaamaan lämmönvastusta. Mittaus suoritettiin

elintasolaajennuksen saunan seinästä, joka sijaitsee rakennuksen länsi puolella. Seinärakenne on puhallusvilla eristeinen rankarunko, puisella ulkoverhouksella. Mitattavaan seinärakenteeseen paistaa illalla aurinko, joka voi aiheuttaa nopeita lämpötilan nousuja ulkolämpötila-antureihin. Nämä lämpötilan vaihtelut on otettava huomioon mittauksen pituutta suunniteltaessa.

9.5.1 Mittaus

Anturit aseteltiin sisäseinälle paneelin päälle ja ulkolämpötila-anturit vietiin tuuletusikkunan kautta ulos. Ulkolämpötila-antureissa on mustat kutisteletkut anturin suojana, jotka lämpiävät paljon nopeammin suorassa auringonvalossa kuin ulkoverhous. Anturien nopeaa lämpiämistä pyrittiin pienentämään asettelemalla anturit ulkoverhouspaneelien ponttien väliin ja vetämällä teippi anturin yli, niin ettei teippi kumminkaan osu anturiin.

Mittausta suoritettiin vähän yli 78 tuntia, koska epäilynä oli auringonvalon tulevan aiheuttamaan heilahduksia mittauksiksi. TRSYS20- järjestelmä ilmoitti mittauksen onnistuneen 78 tunnin jälkeen, vaikka analyysityökalu näyttää kohdentumisen ja yhteneväisyyden olevan virheellinen molemmissa mittauspaikoissa (kuva 18).

Results		
	Location 1	Location 2
R-value [m ² -K/W]	6,08	3,44
Experiment summary and quality checks		
	Location 1	Location 2
Time interval [h]	78,50	
ISO 9869:2014 data quality criteria: (section 7.1, page 9)		
- duration:	OK	OK
- convergence:	NOT OK	NOT OK
- self consistency:	NOT OK	NOT OK

Kuva 18. Villaeristeisen rankarungon mittauksen yhteenveto.

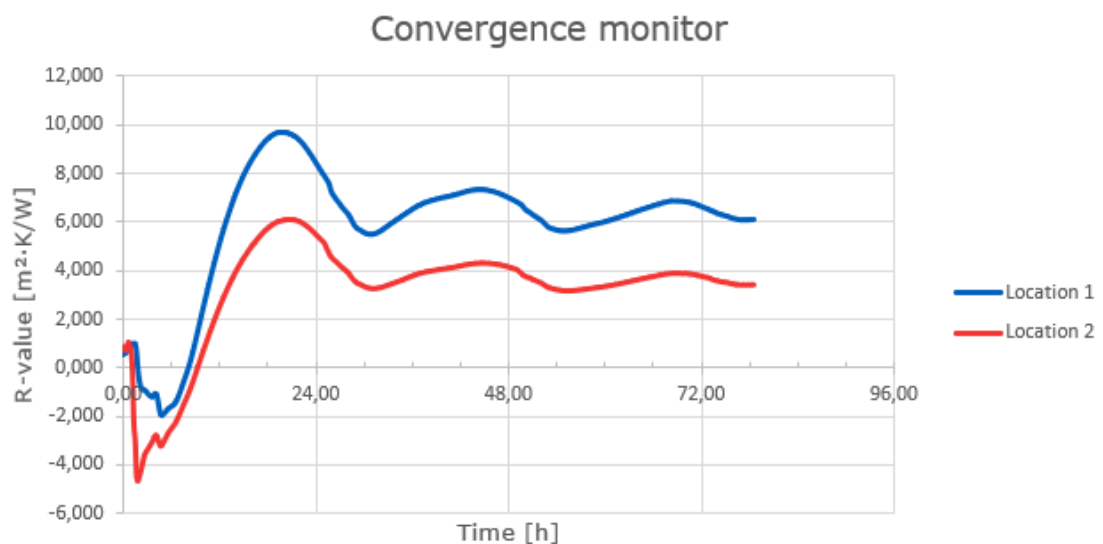
Lämmönvastusarvoiksi saatiin

paikassa 1: 6,08 W/(m² K)

paikassa 2: 3,44 W/(m² K).

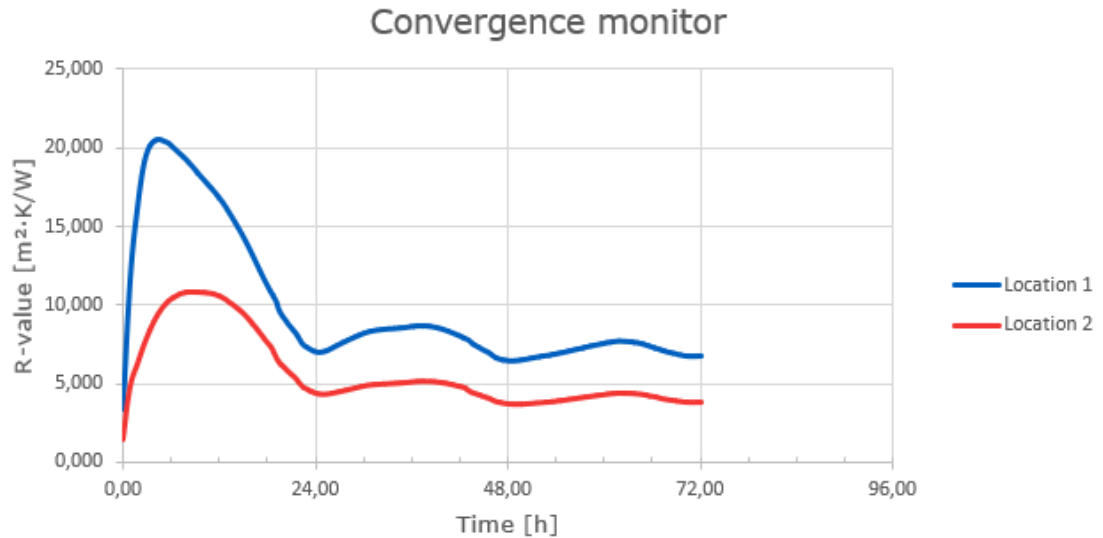
Paikkojen välillä on suuri ero lämmönvastuksessa, vaikka anturit sijaitsivat noin metrin päässä toisistaan. Mittaustuloksia tarkastellessa paikkojen välissä ei ole lämpötiloissa kovin suuria eroja, mutta paikan 2 lämpövuonturi näyttää kokoajan paljon suurempia lämmönvirtaus lukuja. Tässä mittauksessa ei käytetty lämpökameraa apuna, joten mahdollisuutena on kylmäsillan tai jonkun säteilylähteen aiheuttama ongelma.

Mittauksen alussa on ollut paljon heiluntaa lämmönvastusarvossa molemmissa mittapisteissä kuten kuvasta 19 nähdään.



Kuva 19. Villaeristeisen rankarungon mittaustulos.

Mittaus aloitettiin puolenpäivän aikaa, jolloin aurinko lämmitti paljon mitattavaa seinää. Tästä johtuen kumulatiivinen lämpötilaero meni negatiiviselle puolelle aiheuttaen mittauksen alussa epätarkkuutta. Mittausta tehtiin 78 tuntia, jolloin pystytään ottamaan takautuvasti mittauksen viimeiset 72 tunnin tiedot. Kuvassa 20 on esitetty viimeisen kolmen päivän tiedot, jotka ovat hyväksyttävissä rajoissa.



Kuva 20. Villaeristeisen rankarungon viimeisen 72 tunnin lämmönvastus kuvaaja.

Tulokseksi saatiin

paikassa 1: 6,73 W/(m² K)

paikassa 2: 3,84 W/(m² K).

Paikan 2 tulos on todennäköisesti jostain syystä väärin, mutta tarkempia syitä tähän heittoon ei aikataulullisesti pystytty lähteä selvittämään.

9.5.2 Laskenta

Mitattuja lämmönvastusten keskiarvo on 5,29 W/(m² K) jolloin U-arvo olisi

$$5,29 \left(\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right) + 0,04 \left(\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right) + 0,13 \left(\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right) = 5,46(\text{m}^2\text{K}/\text{W})$$

$$\frac{1}{5,46 (\text{m}^2\text{K}/\text{W})} = 0,18 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right).$$

Laskennallinen U-arvo on 0,14 W/(m² K), joka on mitattua keskiarvoa 22% parempi. Epäilynä on että paikan 2 mitattu lämmönvastus on virheellinen, joten jos laskenta suoritetaan vain paikan 1 arvon mukaan tulee mitatuksi U-arvoksi

$$6,73 \left(\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right) + 0,04 \left(\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right) + 0,13 \left(\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right) = 6,90 (\text{m}^2\text{K}/\text{W})$$

$$\frac{1}{6,90 (\text{m}^2\text{K}/\text{W})} = 0,14 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right).$$

Tällä lämmönvastusarvolla mitattu ja laskettu ovat lähes samat.

10 Pohdinta

Suomessa on paljon rakennuksia joiden energiatehokkuutta tulee parantaa vuoteen 2050 mennessä. Rakennuksen vaipan lämmönvastuksen kohottaminen vähentää rakennuksen energian käyttötarvetta. Korjausrakentamisen tarkoituksena on parantaa rakenteiden lämmönvastusta, jotta päästäisiin ympäristöministeriön asettamiin tavoitteisiin.

Lämpöenergian siirtyminen rakenteissa ei ole yksiselitteistä. Lämpö liikkuu monella eri tavalla, joten lämpövirran laskeminen tai mittaaminen on haastavaa. Materiaalien lämmönvastus vaihtelee olosuhteiden kuten lämmön, kosteuden ja säteilylähteiden mukaan. Rakentamisen laatu myös aiheuttaa oletettuun lämmönvastukseen heittoja, koska rakenteisiin voi jäädä eristämättömiä kohtia, kylmäsiltoja tai jopa aukkoja ulkoilmasta sisäilmaan. Laskennallisissa lämmönvastuksissa näitä otetaan huomioon korjauskertoimilla, jotta saataisiin rakenteeseen suurimman osan ajasta vaikuttava vastusarvo.

Tässä työssä läpi käydyt teoriat tukevat käytännön mittauksia. Mittalaitteisto on hyvin herkkä, koska se toimii valmistajan ilmoittamalla tavalla myös hyvin pienillä lämpövirroilla. Laitteiston käytöstä ei ole tarkempia ohjeita, eikä ISO 9869-1 standardissa käydä kuin yleisellä tasolla mahdollisia mittauksia haittaavia tekijöitä. Ensimmäiset mittaukset eivät onnistuneet täydellisesti, koska alkuun ei ollut riittävää ymmärrystä laitteiston herkkyydestä ja vaatimuksista. Mittauksia aloittaessa huomion kiinnittyi lämpövuoantureiden arvoihin. Lämpövuoanturit reagoivat, jos anturin läheisyydestä kulki ihminen tai

keinovalo osui anturiin. Näistä huomioista pystyi seuraaviin mittauksiin parantamaan anturien paikoitusta, jolloin mittauksetkin onnistuivat.

Onnistuneista mittaustuloksista johdetut U-arvot ovat lähellä laskennallisia arvoja. Tulee muistaa että mittauksia suoritettiin mahdollisimman lyhyt ajan jakso ja lämmönvastus tarkentuu pitempiaikaisilla mittauksilla. Lyhyestä mittausajasta johtuen tuloksia tuli käsitellä jälkikäteen jonkin verran. Mittalaitteisto voi tehdä luotettavia lämmönvastus mittauksia, jos pystytään järjestämään erittäin hyvät olosuhteet mitattavaan rakenteeseen. Hankalissa olosuhteissa laitteisto toimii myös, mutta mittauksen pituutta tulee lisätä.

Tutkimuksessa käytettävä mittalaitteiston valmistaja ilmoittaa ideaali olosuhteissa mittauksen epävarmuuden olevan $\pm 6\%$ (Hukseflux 2023, 32). ISO 9869-1 standardin mukaan mittauksen kokonaisepävarmuus voi olla 14-28% väliltä, jos otetaan kaikki mittaukseen liittyvät epävarmuuden huomioon (ISO 2014, 19). Osa mittauksista epäonnistui antureiden sijoittelun tai liian lyhyen mittausajan takia. Seinärakenteista joista saatiin onnistuneet mittaus tulokset, ovat ISO 9869-1 standardin mukaisen kokonaisepävarmuuden sisällä. Näitä mittauksia voidaan pitää luotettavina.

Johtopäätöksenä TRSYS20-mittalaitteistolla pystyy suorittamaan päteviä lämmönvastus mittauksia valmiista seinärakenteista. Rakennuksia on remontoitu ja aina ei ole kaikkia muutoksia dokumentoitu. Tällöin rakenteen U-arvon määrittäminen mittaamalla on perusteltua, vaikka se veisi vähän pidemmän ajan. Mittaaminen vaatii käyttökokemusta tai hyvän koulutuksen, jotta tulokset ovat luotettavia.

Lähteet

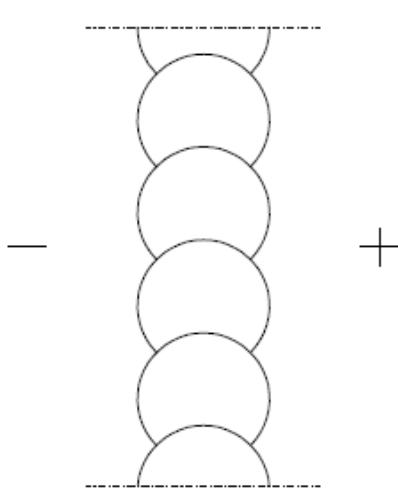
- Björkholtz, D. 1997. Rakennusfysiikka. Lämpö ja kosteus. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- Hukseflux. 2023. User manual TRSYS20. https://www.hukseflux.com/uploads/product-documents/TRSYS20_manual_v2301.pdf. 9.1.2025
- International standard. 2014. Thermal insulation – Building elements – In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance. Heat flow meter method. Sveitsi: The international organization for standardization.
- Puuinfo. 2011. Tekninen tiedote. Hirsiseinän tehollinen paksuus. <https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/07/Hirsisein%C3%A4n-U-arvo.pdf>. 29.4.2025
- Puuinfo. 2012. Mitoitustyökalu. Puurakenteen U-arvon määrittäminen. https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2023/09/Puurakenteen_U-arvo_versio_1.05.xls. 8.4.2025
- Rafnet. 2020. Lämpö. Rakennusfysiikkaa rakennusinsinööreille. https://tilatjaterveys.fi/documents/39510712/102937006/Rakennusfysiikan+oppi-materiaali+insinöörinkoulutukseen_Lampo.pdf. 8.1.2025
- RIL ry. 2014. RIL 255-1-2014. Rakennusfysiikka 1. Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry.
- Siikanen, U. 2014. Rakennusfysiikka. Perusteet ja sovelluksia. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- Suomen rakentamismääräyskokoelma. 2002. C4 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Ympäristöministeriön asetus lämmöneristyksestä. Helsinki: Ympäristöministeriö. <https://www.finlex.fi/data/normit/1931-C4s.pdf>. 8.1.2025
- Vinha, J. 2008. Rakennusfysiikan perussäännöt suunnittelussa ja rakentamisessa. Rakentajain kalenteri 2008. <https://tiedostot.rakennustieto.fi/rakentajain-kalenteri/RK080303.pdf> 9.1.2025
- Ympäristöministeriö. 2008. Tasauslaskentaopas 2007. Rakennuksen lämpöhäviön määräystenmukaisuuden osoittaminen. https://www.edilex.fi/data/rakentamismaaraykset/d3_2007_tasauslaskentaopas.pdf 06.01.2025
- Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. 2017. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171010>. 6.1.2025
- Ympäristöministeriö. 2020. Pitkän aikavälin korjausrakentamisen strategia 2020-2050. Ympäristöministeriö. https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Suomen-EPBD-2a-ilmoitus_final_10-03-2020-242AE19E_F497_4A38_8DF2_95556530BA53-156573.pdf/37a549e9-b330-5f8c-d863-2e51f2e8239a/Suomen-EPBD-2a-ilmoitus_final_10-03-2020-242AE19E_F497_4A38_8DF2_95556530BA53-156573.pdf 28.12.2024
- Ympäristöministeriö. 2013. Ympäristöministeriön asetus rakennuksen energiatehokkuuden parantamisesta korjaus- ja muutostöissä.

Ympäristöministeriö. https://www.finlex.fi/data/normit/40799/EU_27_2_2013YM_asetus_lopullinen_FIN.pdf.
28.12.2024

Ympäristöministeriö. 2024. Energiatehokkuus. Rakennusosien lämmönläpäisykertoimen laskenta. [https://ym.fi/documents/1410903/0/Rakennuksen%20U-arvo_laskenta_Energiatehokkuus%2020250311%20\(5\).pdf/26ff3a26-edfa-28b2-1b1a-e6fbc2b61d73/Rakennuksen%20U-arvo_laskenta_Energiatehokkuus%2020250311%20\(5\).pdf?t=1741779342107](https://ym.fi/documents/1410903/0/Rakennuksen%20U-arvo_laskenta_Energiatehokkuus%2020250311%20(5).pdf/26ff3a26-edfa-28b2-1b1a-e6fbc2b61d73/Rakennuksen%20U-arvo_laskenta_Energiatehokkuus%2020250311%20(5).pdf?t=1741779342107) 8.4.2025

Rakennekuva 225mm pyöröhirsi.

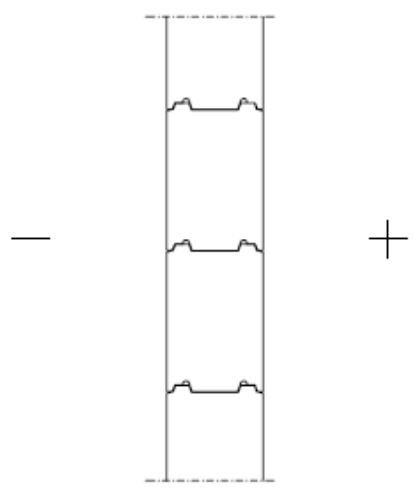
Rakennuskohde	Asuinrakennus, Hirsi	Sisältö	Ulkoseinä, Hirsi
Suunnittelija		Työ nro	
		Päiväys	



225 mm RAKENNE ULKOA SISÄLLE:
 Hirsi

Rakennekuva 180mm lamellihirsi.

Rakennuskohde Kesämökki, Hirsi	Sisältö Ulkoseinä, Hirsi	
Suunnittelija	Työ nro	
	Päiväys	

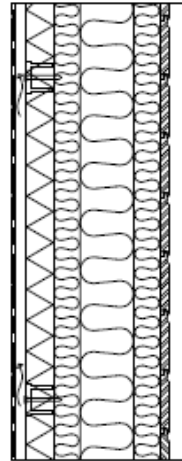


— +

180 mm RAKENNE ULKOA SISÄLLE:
Hirsi

Rakennekuva purueristeinen rankarunko.

Rakennuskohde Omakotitalo	Sisältö Ulkoseinä, puurunko purueriste	
Suunnittelija	Työ nro	
	Päiväys	

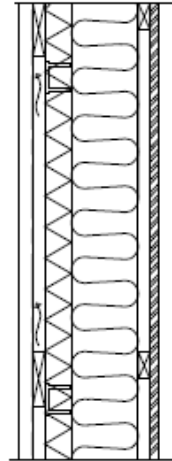


RAKENNE ULKOA SISÄLLE:

5 mm	Ulkoverhous kivilevy
25 mm	Tuuletusrako ja koolaus 25x100 k600
50 mm	Tuulensuojavilla Paroc
50 mm	Lämmöneriste Paroc kivillä ja koolaus 50x50 k600
1,5 mm	Oksapahvi
100 mm	Lämmöneriste sahanpuru ja kantava runko 50x100 k600
1 mm	Tervapaperi
50 mm	Lämmöneriste Paroc kivillä ja koolaus 50x50 k600
1 mm	Tuulensuojapaperi lasikuituvahvisteinen
14 mm	Paneeli

Rakennekuva metallinen ulkoverhous.

Rakennuskohde	Omakotitalo	Sisältö	Ulkoseinä, puurunko pelti ulkokuori
Suunnittelija		Työ nro	
		Päiväys	

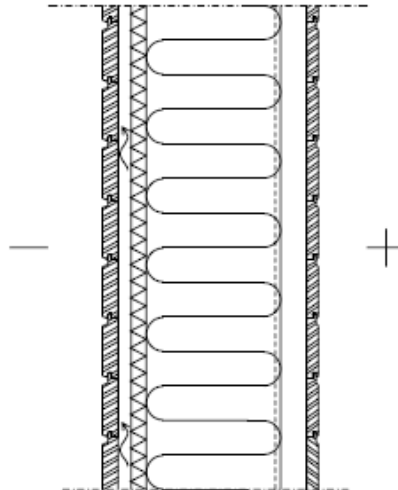


RAKENNE ULKOA SISÄLLE:

0.7 mm	Ulkoverhous poinupeltti
22 mm	Tuuletusrako ja koolaus 22x100 k600
50 mm	Tuulensuojavilla Paroc
125 mm	Lämmöneriste kivilla ja kantava runko 50x125 k600
1 mm	Höyrynsulkumuovi
22 mm	Koolaus 22x50 k600
15 mm	Paneeli

Rakennekuva villaeristeinen rankarunko.

Rakennuskohde	Omakotitalo, Sauna	Sisältö	Ulkoseinä, puurunko ja koolaus
Suunnittelija		Työ nro	
		Päiväys	



RAKENNE ULKOA SISÄLLE:

- 25 mm Ulkoerho
- 25 mm Tuuletusrako ja koolaus 25x100 k600
- 28 mm Tuulensuoja Runkoleijona
- 250 mm Lämmöneriste puhallusvilla ja kantava runko 50x250 k600
- Höyrnsulku alumiinipaperi
- 48 mm Koolaus 48x48 k600
- 22 mm Paneeli kuusi

U-arvo laskelma pyöröhirrestä.

Ohjelmaversio 1.03	
Suunniteluisto	Työn nro
Opinnäytetyö 2025	x
	Päiväys
	Tekijä
	Marko M.
Rakennuskohde	Sisätilä
Pyöröhirsi 225mm	U-arvon määrittäminen (SFS-EN ISO 6946)

Puurakenteinen ulkoseinä	d [mm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
Sisäpinta			0,1300
1 Hirsi	195,1	0,120	1,6258
Ulkopinta			0,0400

Rakenteen kokonaispaksuus **195 mm**

MUURAUSSITEET ERISTEEN LÄPI

Ei muuraussiteitä

OSA-ALUEIDEN PINTA-ALAOSSUDET

f_a	1,000	<i>Eriste</i>
f_b	0,000	<i>Pystykoolaus</i>
f_c	0,000	<i>Vaakakoolaus</i>
f_d	0,000	<i>Koolausristeys</i>

OSA-ALUEIDEN LÄMMÖNVASTUKSET

R_a	1,796	m ² K/W
R_b	0,000	m ² K/W
R_c	0,000	m ² K/W
R_d	0,000	m ² K/W

U-ARVO

R'_T	1,796	m ² K/W
R''_T	1,796	m ² K/W
U	0,557	W/m ² K
$\Delta U''$	0,000	W/m ² K
ΔU_g	0,000	W/m ² K
ΔU_r	0,000	W/m ² K

ULKOSEINÄN U-ARVO

$U_c = 0,5568$ W/m²K

VIRHEILMOITUKSET

U-arvo laskelma lamellihirrestä

Ohjelmaversio 1.03	
Suunnittelutoimisto	Työn nro
Opinnäytetyö 2025	X
	Päiväys
	Tekijä
	Marko M.
2 / 2	
Rakennuskohde	Sisätilä
180mm Liimahirsi	U-arvon määrittäminen (SFS-EN ISO 6946)

Puurakenteinen ulkoseinä	d [mm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
Sisäpinta			0,1300
1 Hirsi	180	0,120	1,5000
Ulkopinta			0,0400

Rakenteen kokonaispaksuus 180 mm

MUURAUSSITEET ERISTEEN LÄPI

Ei muuraussiteitä

OSA-ALUEIDEN PINTA-ALAOSUUDET

f_a	1,000	<i>Eriste</i>
f_b	0,000	<i>Pystykoolaus</i>
f_c	0,000	<i>Vaakakoolaus</i>
f_d	0,000	<i>Koolausristeys</i>

OSA-ALUEIDEN LÄMMÖNVASTUKSET

R_a	1,670	m ² K/W
R_b	0,000	m ² K/W
R_c	0,000	m ² K/W
R_d	0,000	m ² K/W

U-ARVO

R'_T	1,670	m ² K/W
R''_T	1,670	m ² K/W
U	0,599	W/m ² K
$\Delta U''$	0,000	W/m ² K
ΔU_g	0,000	W/m ² K
ΔU_f	0,000	W/m ² K

ULKOSEINÄN U-ARVO

$U_c = 0,5988 \text{ W/m}^2\text{K}$

VIRHEILMOITUKSET

U-arvo laskelma purueristeisestä rankarungosta

Ohjelmaversio 1.03	
Suunniteluotoimisto	Työn nro
Opinnäytetyö 2025	X
	Päiväys
	Marko M.
Rakennuskohde	Sisältö
Puurunko, villa ja sahanpuru eristys	U-arvon määrittäminen (SFS-EN ISO 6946)

Sivu
2 / 2

Puurakenteinen ulkoseinä	d [mm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	b [mm]	s [mm]
Sisäpinta			0,1300		
1 Puu	14	0,120	0,1167		
2 Ilman- ja höyrynsulku	0,2	0,330	0,0006		
3 Lämmöneriste (sisältää koolauksen)	50	0,036	1,1704	48	600
4 Ilman- ja höyrynsulku	0,2	0,330	0,0006		
5 Lämmöneriste (sisältää koolauksen)	101,5	0,120	0,8458	48	600
6 Lämmöneriste (sisältää koolauksen)	50	0,036	1,1704	48	600
7 Lämmöneriste	50	0,036	1,3889		
Ulkopinta			0,1300		

Rakenteen kokonaispaksuus 266 mm

MUURAUSSITEET ERISTEEN LÄPI

Ei muuraussiteitä

OSA-ALUEIDEN PINTA-ALAOSUUEDET

f_a	0,846	Eriste
f_b	0,074	Pystykoolaus
f_c	0,074	Vaakakoolaus
f_d	0,006	Koolausristeys

OSA-ALUEIDEN LÄMMÖNVASTUKSET

R_a	5,390	m ² K/W
R_b	4,418	m ² K/W
R_c	4,418	m ² K/W
R_d	3,448	m ² K/W

U-ARVO

R''_T	5,203	m ² K/W
R''_T	4,953	m ² K/W
U	0,197	W/m ² K
$\Delta U''$	0,010	W/m ² K
ΔU_g	0,009	W/m ² K
ΔU_f	0,000	W/m ² K

ULKOSEINÄN U-ARVO

$U_c = 0,2056 \text{ W/m}^2\text{K}$

VIRHEILMOITUKSET

U-arvo laskelma metallinen ulkokuori

Ohjelmaversio 1.03	
Suunnittelutoimisto	Työn nro
Opinnäytetyö 2025	x
	Päiväys
	x
	Tekijä
	Marko M.
Rakennuskohde	Sisästä
Peltinen ulkokuori	U-arvon määrittäminen (SFS-EN ISO 6946)

Puurakenteinen ulkoseinä	d [mm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	b [mm]	s [mm]
Sisäpinta			0,1300		
1 Puu	15	0,120	0,1250		
2 Lämmöneriste (sisältää koolauksen)	22	0,025	0,6748	48	600
3 Ilman- ja höyrynsulku	0,2	0,330	0,0006		
4 Lämmöneriste (sisältää koolauksen)	125	0,036	2,9280	48	600
5 Lämmöneriste	50	0,033	1,5152		
6 Lämmöneriste	12	0,170	0,0706		
Ulkopinta			0,1300		

Rakenteen kokonaispaksuus 224 mm

Ulkopuoli

↑

Sisäpuoli

MUURAUSSITEET ERISTEEN LÄPI

Ei muuraussiteitä

OSA-ALUEIDEN PINTA-ALAO SUUDET

f_a	0,846	Eriste
f_b	0,074	Pystykoolaus
f_c	0,074	Vaakakoolaus
f_d	0,006	Koolausristeys

OSA-ALUEIDEN LÄMMÖNVASTUKSET

R_a	6,324	m ² K/W
R_b	3,893	m ² K/W
R_c	5,827	m ² K/W
R_d	3,196	m ² K/W

U-ARVO

R'_T	5,958	m ² K/W
R''_T	5,572	m ² K/W
U	0,173	W/m ² K
$\Delta U''$	0,000	W/m ² K
ΔU_g	0,000	W/m ² K
ΔU_f	0,000	W/m ² K

ULKOSEINÄN U-ARVO

$U_c = 0,1735$ W/m²K

VIRHEILMOITUKSET

U-arvo laskelma villaaeristeinen rankarunko

Ohjelmaversio 1.03	
Suunnittelutoimisto	Työn nro
Opinnäytetyö 2025	x
	Päiväys
	Tekijä
	Marko M.
Rakennuskohde	Sisältö
Puhallusvilla + Puurunko	U-arvon määrittäminen (SFS-EN ISO 6946)

Puurakenteinen ulkoseinä	d [mm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	b [mm]	s [mm]
Sisäpinta			0,1300		
1 Puu	22	0,120	0,1833		
2 Lämmöneriste (sisältää koolauksen)	48	0,170	0,2892	48	600
3 Ilman- ja höyrönsulku	0,2	0,330	0,0008		
4 Lämmöneriste (sisältää koolauksen)	250	0,038	5,8104	48	600
5 Lämmöneriste	28	0,049	0,5714		
Ulkopinta			0,1300		

Rakenteen kokonaispaksuus 348 mm

Ulkopuoli

Sisäpuoli

MUURAUSSITEET ERISTEEN LÄPI

Ei muuraussiteitä

OSA-ALUEIDEN PINTA-ALAOSUUDET

f_a	0,920	Eriste
f_b	0,080	Pystykoolaus
f_c	0,000	Vaakakoolaus
f_d	0,000	Koolausristeys

OSA-ALUEIDEN LÄMMÖNVASTUKSET

R_a	7,877	m ² K/W
R_b	3,499	m ² K/W
R_c	0,000	m ² K/W
R_d	0,000	m ² K/W

U-ARVO

R''_T	7,160	m ² K/W
R''_T	6,915	m ² K/W
U	0,142	W/m ² K
$\Delta U''$	0,000	W/m ² K
ΔU_g	0,000	W/m ² K
ΔU_f	0,000	W/m ² K

ULKOSEINÄN U-ARVO

$U_c = 0,1421 \text{ W/m}^2\text{K}$

VIRHEILMOITUKSET