
U-arvon mittalaitteen kenttätestaukset



Ammattikorkeakoulun opinnäytetyö

Rakennustekniikan koulutusohjelma

Visamäki, kevät 2016

Mika Kivelä

Visamäki
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Rakennesuunnittelu

Tekijä	Mika Kivelä	Vuosi 2016
Työn nimi	U-arvon mittalaitteen kenttätestaukset	

TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyöni aiheena on suorittaa kehitysvaiheessa olevalle U-arvon mittaussitteella kenttätestejä. Mittalaite on Arcada-ammattikorkeakoulun kehittämä, eikä vastaavaa laitetta ole vielä markkinoilla. Työssä tutkitaan mittausten antamien tulosten vastaavuutta laskennallisiin arvoihin sekä arvioidaan mittaustyöllä saavutettavan datan määrää ja mittaukseen kuluva-aikaa. Kenttätestauksen tulokset palvelevat laitteen tuotteistamista sekä palvelukonseptin kehittämistä. Työn tilaaja on Paloniitty Oy.

Työn teoriataustana on käytetty rakennusfysiikan oppikirjoja sekä koulussa saatua opetusta sekä luentomateriaaleja. Tutkittujen rakenteiden U-arvo määrittämiseen käytettiin DOF-lämpö -ohjelmaa. Koska laitteen käytölle ei ole vielä olemassa standardia, ei mittaustyölle ole vielä virallista ohjeistusta. Mittaukset tehtiin laitteen kehittäjän ohjeita noudattaen.

Työn tuloksena saatiin selville että laskennalliset U-arvot saattavat poiketa paljonkin todellisista arvoista, suuntaan tai toiseen. Laite on ehdottomasti hyvä lisä rakennusten ominaisuuksien tutkimiseen. Laitteella saadaan nopeasti mitattua rakenteen todellinen lämmöneristyskyky laajalta alueelta. Laitteelta saatavan tiedon käsittelemistä on kehitettävä. Jotta laitetta voidaan tehokkaasti hyödyntää, on sen ympärille kehitettävä ohjelmisto, jolla mitattu data saadaan suoraan tietokoneelle käsiteltäväksi.

Avainsanat U-arvo, rakenteiden tutkiminen, lämmön johtuminen

Sivut 40 s. + liitteet 7 s.

Visamäki
Degree Programme in Construction Engineering
Structural Engineering

Author	Mika Kivelä	Year 2016
Subject of Bachelor's thesis	Field testing for a U-value gauge	

ABSTRACT

The aim of this Bachelor's thesis was to conduct field tests for a device that measures the actual U-value for a structure. This U-value meter is developed by the Arcada University of Applied Sciences, and there is no similar device on the market. The thesis was commissioned by Paloniitty Oy. The purpose of the testing was to study the need for and operability of the device in the field. The equivalence of the results obtained from the measurements to the calculated values were examined in the thesis. The amount of data achieved and the time spent on the measurements were also estimated. The results of field testing serve the commercialization of the device and the development of the service concept.

The theoretical background of the thesis consist of textbooks on building physics, tuition and lecture notes. To determine the U-values of the studied structure a DOF-Thermo –software was used. As there is no standard for the use of device, there are no official guidelines for measurements. The measurements were made in accordance with the instructions provided by the developer of the device.

As a result of the thesis, it was discovered that the calculated U-values may differ greatly from the actual values, to one direction or another. The device is definitely a good addition to examining properties of the buildings. The actual ability of thermal insulation of a structure can be quickly measured over a wide area by the device. Processing data obtained from the device needs to be improved. In order to utilize the device effectively software needs to be developed, so that the measured data can be obtained directly on computer for processing.

Keywords U-value, examination of the structures, heat conduction

Pages 40 p. + appendices 7 p.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	LÄMPÖ.....	1
2.1	Lämmön siirtyminen.....	2
2.1.1	Johtuminen.....	2
2.1.2	Säteily.....	2
2.1.3	Konvektio.....	3
3	U-ARVO.....	3
3.1	Energiankulutuksen laskeminen U-arvon avulla.....	3
3.1.1	Lämmitystarveluku.....	4
3.2	U-arvon laskeminen.....	4
3.2.1	Kylmäsiilat.....	5
3.2.2	Ilmarakojen huomiointi laskennassa.....	5
3.2.3	Yksiaineiset rakenteet.....	6
3.2.4	Homogeeniset kerrosrakenteet.....	7
3.2.5	Epähomogeeniset kerrosrakenteet.....	7
3.3	Haasteet U-arvon laskennassa.....	8
4	LAITE.....	8
5	TUTKIMUSMENETELMÄT.....	10
5.1	Tutkimuksen periaate.....	10
5.2	Mittaukset.....	10
5.2.1	Ennen mittauksia tehtävät toimenpiteet.....	10
5.2.2	Ikkunan mittauksen erityishuomiot.....	11
5.2.3	Mitattavat rakenteet.....	12
5.3	Tulosten vertaileminen.....	12
6	MITTAUKSET.....	13
6.1	Mittaus 1.....	13
6.1.1	Rakenteet.....	13
6.1.2	Laskennalliset arvot.....	13
6.1.3	Laitteella mitatut arvot.....	14
6.1.4	Johtopäätökset.....	15
6.2	Mittaus 2.....	16
6.2.1	Rakenteet.....	16
6.2.2	Laskennalliset arvot.....	17
6.2.3	Laitteella mitatut arvot.....	17
6.2.4	Johtopäätökset.....	18
6.3	Mittaus 3.....	20
6.3.1	Rakenteet.....	20
6.3.2	Laskennalliset arvot.....	21
6.3.3	Laitteella mitatut arvot.....	21
6.3.4	Johtopäätökset.....	22
6.4	Mittaus 4.....	23
6.4.1	Rakenteet.....	24
6.4.2	Laskennalliset arvot.....	24

6.4.3	Laitteella mitatut arvot	24
6.4.4	Johtopäätökset	24
6.5	Mittaus 5.....	26
6.5.1	Rakenteet	26
6.5.2	Laskennalliset arvot.....	27
6.5.3	Laitteella mitatut arvot	27
6.5.4	Johtopäätökset	27
6.6	Mittaus 6.....	29
6.6.1	Rakenteet	29
6.6.2	Laskennalliset arvot.....	29
6.6.3	Laitteella mitatut arvot	30
6.6.4	Johtopäätökset	30
6.7	Mittaus 7.....	31
6.7.1	Rakenteet	32
6.7.2	Laskennalliset arvot.....	32
6.7.3	Mitatut arvot	32
6.7.4	Johtopäätökset	32
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	33
7.1	Laite.....	33
7.2	Tulosten korrelaatio laskennallisiin arvoihin	33
7.2.1	Kerrokselliset rakenteet	35
7.2.2	Yksiaineiset rakenteet.....	36
7.3	Mittauksen vaatima aika.....	37
8	KEHITYSEHDOTUKSET.....	37
8.1	Laite.....	37
8.2	Tiedon hyödyntäminen.....	38
	LÄHTEET	39

Liite 1	Mittauspöytäkirjojen yhteenveto, Nykyaikainen hirsirakennus
Liite 2	Mittauspöytäkirjojen yhteenveto, Nykyaikainen OKT
Liite 3	Mittauspöytäkirjojen yhteenveto, Nykyaikainen toimitilarakennus
Liite 4	Mittauspöytäkirjojen yhteenveto, 50-luvun Massiivitiilirakennus
Liite 5	Mittauspöytäkirjojen yhteenveto, 70-luvun OKT
Liite 6	Mittauspöytäkirjojen yhteenveto, ”Rintamamies-talo”
Liite 7	Mittauspöytäkirjojen yhteenveto, Moderni tuotantorakennus

1 JOHDANTO

Suomen rakennuskannasta 29,7 % on rakennettu vuosina 1960 - 1979. Tämä rakennuskanta on saavuttamassa peruskorjausikää, ja korjausrakentaminen tulee tulevana vuosina kasvamaan entisestään. Jo nyt korjausrakentamisen arvo on noin 6 % Suomen bruttokansantuotteesta. (Tilastoja rakennuskannasta. n.d. rakennusperinto.fi)

Kun rakennuksia saneerataan, on niiden energiatehokkuutta parannettava, jos se on teknisesti ja taloudellisesti järkevää. Jotta voidaan tehdä realistisia suunnitelmia energian säästämiseksi ja investointien takaisinmaksuajkojen laskelmia, on tunnettava rakennuksen nykyiset ominaisuudet tarkasti. Jos laskelmat tehdään perustuen pelkästään laskennallisiin arvoihin ja olettamuksiin, voivat laskelmat vääristyä suurestikin.

Tähän tarpeeseen Arcada-ammattikorkeakoulu on kehittänyt laitteen, joka mittaa rakenteen lämmönläpäisykerroimen, eli U-arvon tarkasti. Laite on kehitysvaiheessa, mutta on palkittu jo kansainvälisessä Building Research Establishment:n järjestämässä kilpailussa. Tämän työn aiheena on suorittaa laitteella kenttätestejä, joissa selvitetään mitattujen U-arvojen korrelaatiota laskennallisiin arvoihin, sekä laitteen hyödynnettävyyttä kentällä. Laite ei ole vielä kaupallinen. Yksi työn tavoitteista on antaa tukea ja materiaalia jatkokehitykselle ja hankkia tietoa markkinatarpeesta.

Tutkimusmenetelmänä on suorittaa laitteella mittauksia laajalla skaalalla eri aikakausia ja rakennustapoja edustavia rakennuksia ja rakenteita. Mittauksia suoritetaan 7 eri kohteessa, ja mittauksia tehdään yhteensä hieman yli sata. Saadusta datasta tutkitaan, onko mitattujen tulosten ja laskennallisten tulosten välillä korrelaatiota. Arvioitavia asioita on myös mittausten onnistuminen käytännössä sekä mittauksiin kulunut aika.

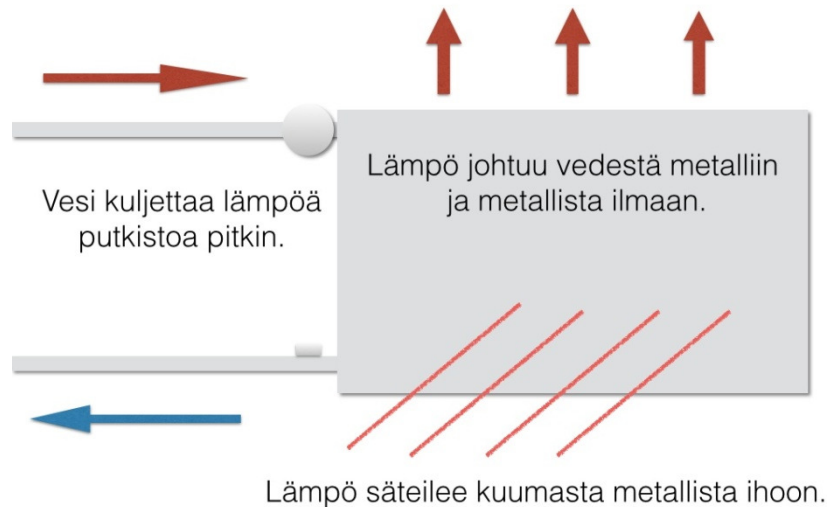
Aiheessa minua kiinnosti erityisesti työn käytännönläheisyys sekä konkreettinen hyöty laitteen kehitystyössä. Rakennusfysiikka ja erilaisten rakenteiden toiminta on kiinnostanut minua jo ennen insinööriopiskelujani. Tulevaisuudessa tulen työskentelemään korjausrakentamisen parissa, ja uskon että opinnäytetyön tekemisessä kartuttamani kokemus tulee varmasti olemaan arvokasta.

2 LÄMPÖ

Lämpö on aineen sisäistä molekyylien tai atomien liike-energiaa. Lämpötilan noustessa molekyylien ja atomien liike kasvaa. Aineen olomuoto on riippuvainen lämpötilasta, eli atomien tai molekyylien liikkeestä. Kiinteässä aineessa ne värähtelevät, mutta pysyvät toisiinsa nähden paikallaan. Nesteessä atomit ja molekyylit liikkuvat toisiinsa nähden, mutta aine säilyttää muotonsa. Kaasuksi muuttuessaan aineen molekyylit ja atomit ovat täysin vapaita liikkumaan. Absoluuttisessa nollassa (-273,15°C) atomit ja molekyylit pysyvät täysin paikallaan.

2.1 Lämmön siirtyminen

Lämpö voi siirtyä kolmella tavalla: johtumalla (konduktio), säteilemällä (emissio) tai konvektiolla (virtaus). Säteily on ainut lämmön siirtymistapa, joka ei tarvitse väliainetta. (Björkholtz 1997, s. 12).



Kuva 1. Lämmönsiirtymisen muodot. (Lämpöilmiöitä n.d., peda.net)

2.1.1 Johtuminen

Johtumisessa lämpöenergia, eli molekyylien liike-energia siirtyy molekyylisestä toiseen. Johtuminen on ainoa lämmönsiirtymismuoto kiinteässä, läpinäkymättömässä aineessa. Johtuminen aiheutuu aineen tai rakenteen yli vallitsevasta lämpötilaerosta, joka pyrkii termodynamiikan toisen lain mukaan tasaantumaan.

Siirtymistä kutsutaan lämmön virtaukseksi. Materiaalille ominainen λ -arvo ($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$) kuvaa kuinka hyvin materiaali johtaa lämpöä. Mitä pienempi arvo, sitä parempi lämmöneriste materiaali on. Lämmön johtuessa, lämpöenergia ei siirry, vaan johtuu aineen läpi. (Seppänen 1995, s. 57).

Tässä tutkimuksessa tutkitaan rakenteiden kykyä estää lämmön siirtymisen johtumalla.

2.1.2 Säteily

Lämpö siirtyy säteilemällä sähkömagneettisen aaltoliikkeen välityksellä valon nopeudella. Esimerkki lämmönsäteilystä on nuotion ääressä istuvan henkilön nuotion tulesta siirtyvä lämpö. Kaikki aine säteilee, eli emittoi lämpöenergiaa ympärilleen, pois lukien kappaleet, joiden lämpötila on alle 0°K . (Björkholtz, 1997).

Kun säteily kohtaa kappaleen pinnan, osa säteilyn lämpöenergiasta absorboituu, osa heijastuu takasin ja osa menee läpi. Jokaisella aineella on näitä osuuksia kuvaavat kertoimet. α on absorptiosuhde, ρ on heijastussuhde ja τ on läpäisyysuhde. Kertoimien summa on $\alpha + \rho + \tau = 1$. Kertoimet ovat riippuvaisia lämpötilasta, kappaleen ominaisuuksista, säteilyn tulo- ja lähtökulmista ja säteilyn aallon pituudesta. Esimerkiksi lasin läpäisykerroin τ on lyhytaaltoiselle näkyvälle aallonpituudelle 0,9 ja sen sijaan pitkäaaltoiselle lämpösäteilylle 0,1.

2.1.3 Konvektio

Konvektiossa lämpö siirtyy välittäjäaineen, kaasun tai nesteen, virtauksen mukana. Kun välittäjäaineen ja sen viereisen kiinteän aineen välillä on lämpötilaero, siirtyy lämpöenergia kuumemmasta aineesta kylmempään. Välittäjäaineen ja kiinteän aineen rajapinnassa nopeus on nolla, ja lämpöenergia siirtyy ohuen rajakerroksen läpi johtumalla. (Seppänen 1995, s. 61).

Konvektio voi olla luonnollista tai pakotettua. Pakotetussa konvektiossa välittäjäaineen liike on ulkopuolisen voiman aiheuttamaa. Esimerkki tästä on kiertovesipumpun aiheuttama nesteen liike lämmitysverkostossa. Luonnollinen konvektio johtuu lämpötilaerojen aiheuttamista tiheyseroista.

Rakennuksissa ilmavuotojen aiheuttaman konvektio mukana voi siirtyä huomattavat määrät lämpöenergiaa. Lisäksi rakennuksen sisälle otettava vastaava ilmamäärä on lämmitettävä huonelämpöiseksi, mihin kuluu taas huomattava määrä energiaa. (Björkholtz 1997, s. 13).

3 U-ARVO

U-arvo on rakenteen lämmönläpäisykerroin. Se kuvaa, kuinka monta wattia rakenteen läpi johtuu 1m^2 alalta, kun rakenteen eripuolilla lämpötilaero on yhden lämpötilayksikön suuruinen. Mitä pienempi U-arvo, sitä parempi eristävyys rakenteella on. U-arvo saadaan rakenteen kokonaislämmönvastuksen käänteislukuna. Vanhemmassa kirjallisuudessa U-arvosta on käytetty nimitystä K-arvo. (Björkholtz 1997, s. 14).

3.1 Energiankulutuksen laskeminen U-arvon avulla

U-arvoa käytetään laskettaessa kuinka paljon energiaa kuluu rakenneosien läpi johtumalla. Lähtötiedoiksi tarvitaan rakenneosan ala, rakennuksen sijaintipaikkakunnan lämmitystarveluku ja rakenteen U-arvo.

$$Q_{\text{joht.}} = U \times A \times K_d \times 24 \div 1000$$

- $Q_{\text{joht.}}$ = rakenneosan läpijohtuva kokonaisenergia
- U = rakenneosan U-arvo
- A = rakenneosan pinta-ala
- K_d = lämmitystarveluku

- 24 ja 1000 = kertoimet, joilla arvo saadaan kaupalliseen kWh-yksikköön (Korkeamäki, 2010).

3.1.1 Lämmitystarveluku

Lämmitystarveluku, entinen astepäiväluku, saadaan laskemalla lämmityskaudelta päivittäisen ulkolämpötilan ja keskimääräisen sisälämpötilan erotukset yhteen. Laskennassa sisälämpötilaksi oletetaan 17°C, koska lopun lämmön oletetaan tulevan rakennuksen muusta lämpökuormasta, eli rakennuksen sisällä käytettävistä laitteista ja rakennuksen sisällä olevista ihmisistä. Lämmityskaudeksi lasketaan päivät, joiden keskilämpötila on keväällä alle 10°C ja syksyllä alle 12°C.

Ilmatieteenlaitos tarjoaa lämmitystarveluvut kuukauden tarkkuudella ja vuosittaiset luvut. Ilmatieteenlaitokselta saa 16 vertailupaikkakunnan lämmitystarveluvut, ja tilauksesta se voidaan laskea myös muille paikkakunnille. (Lämmitystarveluku eli astepäiväluku n.d.).

3.2 U-arvon laskeminen

U-arvo on rakenteen kokonaislämmönvastuksen R_t käänteisluku, lisätynä kylmäsiltojen aiheuttamilla pistemäisillä tai viivamaisilla lisäkonduktansseilla. Näitä on esimerkiksi seinärakenteessa metalliset muuraussiteet tai puurakenteisen seinän runkotolpat.

2.2.2

Lämmönläpäisykerroin (U) lasketaan kaavalla (1).

$$U = 1 / R_T \quad (1)$$

R_T rakennusosan kokonaislämmönvastus ympäristöstä ympäristöön.

Kuva 2. U-arvon kaava. (RAK MK C4 2003, s.5)

Rakenteen kokonaislämmönvastus R_t saadaan laskemalla yhteen eri rakenne kerrosten lämmönvastus R , sisä- ja ulkopintojen pintavastukset ja mahdollisten ilmarakojen lämmönvastukset. Pintavastusten arvot saadaan kirjallisuudesta, ja pintavastuksen arvoon vaikuttaa onko kyse ulko- vai sisäpinnasta, ja onko lämpövirta pystysuuntaan vai vaakasuuntaan. Jos rakenne on vino, esimerkiksi katto, voidaan arvo interpoloida vaakasuoran ja pystysuoran arvon väliltä. Ilmarakojen lämmönvastusarvot löytyvät rakennusmääräys kokoelman osasta C4. Jos rakenteessa on hyvin tuulettuva ilmarako, ei sen ulkopuolisia rakenteita saa ottaa huomioon laskennassa. (Paloniitty, luentomateriaalit 2011).

Pintavastus m ² K/W	Lämpövirran suunta		
	Ylös- päin	Vaaka- suoraan	Alas- päin
sisäpuolen pintavastus (Rsi)	0,10	0,13	0,17
ulkopuolen pintavastus (Rse)	0,04	0,04	0,04

Kuva 3. Pintavastusten arvot.(Siikanen 2014, s.46)

3.2.1 Kylmäsilat

Kylmäsilaksi nimitetään rakenteen osaa, jonka lämmöneristävyyks on viisi kertaa huonompi kuin sen viereisillä osilla. Rakenteessa säännöllisesti toistuvat ja sille ominaiset kylmäsilat on otettava huomioon U-arvoa määrittäessä. Näitä ovat esimerkiksi seinärakenteessa runkotolpat ja muuraussiteet. Yksittäisiä rakenteeseen aiheutuneita kylmäsiltoja ei tarvitse huomioida. Tällaisia ovat esimerkiksi ilmanvaihtokanavat, katoksen kiinnitys runkoon tai muu yksittäinen osa.

Pistemäisille kylmäsiltoille kuten muuraussiteille on kirjallisuudesta saatavilla suoraan arvot, jotka voidaan lisätä laskettuun U-arvoon. Viivamaisien kylmäsiltojen kuten runkotolppien vaikutus pitää laskea.

(RAK MK C4 2003, s.6)

$$\Delta U_{\Psi X} = \sum \Psi_k (l_k / A) + \sum X_j (n_j / A) \quad (5)$$

Ψ_k rakennusosassa olevien keskenään samanlaisten viivamaisien kylmäsiltojen k viivamainen lisäkonduktanssi, W/(m · K)

X_j rakennusosassa olevien keskenään samanlaisten pistemäisten kylmäsiltojen j aiheuttama pistemäinen lisäkonduktanssi, W/K

l_k samanlaisten viivamaisien kylmäsiltojen yhteispituus rakennusosassa, m

n_j samanlaisten pistemäisten kylmäsiltojen lukumäärä rakennusosassa

A rakennusosan pinta-ala, m²

Kuva 4. Viivamaisen kylmäsilan lisäkonduktanssin laskentakaava (RAK MK C4 2003, s.6)

3.2.2 Ilmarakojen huomiointi laskennassa

U-arvon laskennan kannalta rakenteessa voi olla tuulettumattomia, lievästi tuulettuvia ja hyvin tuulettuvia ilmarakoja. Tuulettumaton ilmarako on rakennusosassa oleva suljettu ilmarako. Ilmaraosta saa olla yhteiskooltaan korkeinaan 5cm²/m² reiät ulkoilmaan. Reiät eivät saa kuitenkaan sijaita siten, että ilmavirta pääsisi kulkemaan rakennusosan puolelta toiselle. Tuulettumattomalle ilmaraolle saadaan taulukosta lämmönvastusarvo. Arvo on

riippuvainen ilmaraon paksuudesta, raon pintojen emissiivisyydestä sekä lämpövirran suunnasta. Lievästi ja hyvin tuulettuvissa ilmaraoissa tuuletettava ilmavirta kulkee rakenneosan puolelta toiselle. Lievästi tuulettuvan ilmaraon aukot ulkoilmaan ovat kooltaan $5-15\text{cm}^2/\text{m}^2$. Hyvin tuulettuvassa ilmaraossa aukot ovat tätä suurempia. Lievästi tuulettuvalle ilmaraolle saa laskea puolet tuulettumattoman ilmaraon taulukkoarvosta. Hyvin tuulettuvalle ilmaraolle saa laskea sisäpinnan pintavastuksen arvoisen lämmönvastuksen.

(Rak Mk C4 2003, s. 16)

Rajoittavien pintojen yhdistetty emissiviteetti	Ilmaraon paksuus (d_p) mm	Tuulettumattoman ilmakerroksen lämmönvastus (R_{gu}) $\text{m}^2 \text{ K/W}$		
		Lämpövirran suunta		
		Ylöspäin	Vaakasuoraan	Alaspäin
yleinen tapaus	5	0,11	0,11	0,11
ei heijastavia pintoja $\varepsilon > 0,8$	10	0,15	0,15	0,15
	15	0,16	0,17	0,17
	20	0,16	0,18	0,18
	50	0,16	0,18	0,21
	100	0,16	0,18	0,22
	300	0,16	0,18	0,23
	toinen pinta heijastava $\varepsilon < 0,2$	5	0,17	0,17
10	0,29	0,29	0,29	
15	0,34	0,38	0,38	
20	0,34	0,44	0,44	
50	0,34	0,44	0,67	
100	0,34	0,44	0,75	
300	0,34	0,44	0,83	

Kuva 5. Tuulettumattoman ilmaraon lämmönvastusarvot. (Siikanen 2014, s.47)

3.2.3 Yksiaineiset rakenteet

Yksiaineinen rakenne on rakenne, mikä koostuu vain yhdestä ainekerroksesta. Tällainen rakenne on esimerkiksi kaasubetoniharkoista tehty seinä. U-arvo saadaan laskemalla rakenteen lämmönvastus R ja pintavastukset R_{si} ja R_{se} yhteen, ja ottamalla tästä arvosta käänteisluku.

$$R_t = R_{si} + R + R_{se}$$

Yksittäisen rakennekerroksen lämmönvastus R lasketaan jakamalla rakenteen paksuus metreinä aineen normaalilla lämmönjohtavuusarvolla, λ_n . Normaalissa lämmönjohtavuusarvossa on huomioitu aineen kosteuden tai pienen ilmavirran aiheuttamat lisät. λ_n -arvot CE-hyväksytyille rakennusmateriaaleille saadaan kirjallisuudesta, esimerkiksi Rak MK C4:stä, tai materiaalivalmistajan tyyppihyväksyntä todistuksesta.

(Paloniitty, luentomateriaalit 2011)

Rakenteen lämmönvastus R lasketaan kaavalla:

$$R = \frac{m}{\lambda_n}$$

jossa:

- m=rakenteen paksuus metreinä
- λ_n =aineen lämmönjohtavuusarvo W/mk

3.2.4 Homogeeniset kerrosrakenteet

Homogeeninen kerrosrakenne on rakenne, joka koostuu useammasta eri aineesta muodostetusta kerroksesta, ja kerrokset ovat poikkileikkauksen läpi tasapaksuisia. Esimerkiksi sandwich-betonielementti ulkoseinä on tällainen rakenne.

Tällaisen rakenteen kokonaislämmönvastus R_t saadaan laskemalla yhteen rakenteen sisä- ja ulkopintojen pintavastukset ja jokaisen rakennekerroksen lämmönvastus R . Yhden rakennekerroksen R lasketaan kuten yksiaineisen rakenteen lämmönvastus

$$R_t = R_{si} + R_1 + R_2 + R_n + R_{se}$$

3.2.5 Epähomogeeniset kerrosrakenteet

Rakenteessa, jonka rakennekerrokset ovat epähomogeenisiä, U-arvo voidaan laskea yläraja-alaraja menetelmällä. Tällainen rakenne on esimerkiksi sandwich-betonielementti, jonka jommassakummassa betonikuoressa on vahvennus eristetilaa kohti. Menetelmällä voidaan laskea myös puurunkoisen seinän U-arvo, jos runkotolppien kylmäsiltaa ei laskea viivamaisena lisäkonduktanssina.

Menetelmä perustuu sähköanalogiaan Ohmin lakia mukaillen. Menetelmässä lasketaan eri ainekerroksille lämmönvastukset ja kokonaislämmönvastus saadaan laskemalla rakenteen lämmönvastukset yhteen sen mukaan ovatko ne rinnan vai yhdessä, kuten vastukset sähköpiirissä.

Laskennassa tehdään seuraavat oletukset:

- Lämmönjohtumista tarkastellaan jatkuvuustilassa
- Materiaalien lämmönjohtavuudet pysyvät muuttumattomina
- Lämmönsiirtyminen säteilemällä on merkityksettömän vähäistä

Ensin määritellään alarajaratkaisu rakenteen lämmöneristävyydelle. Jokaiselle rakennekerrokselle lasketaan lämmönvastus. Koko poikkileikkauksen läpi kulkevien homogeenisten kerrosten vastukset lasketaan yhteen kuten sarjaan kytketyt vastukset. Rakenteen epähomogeenisten osien rakennekerrosten lämmönvastukset lasketaan yhteen kuten rinnan kytketyt sähkövastukset. Kokonaislämmönvastus saadaan laskemalla rakenteen kaikki lämmönvastukset yhteen.

Yläajaratkaisu määritellään laskemalla jokaiselle toisistaan poikkeavalle leikkauskohdalle lämmönvastusarvo. Nämä saadut arvot lasketaan yhteenä kuten rinnan kytketyt vastukset.

Lopuksi lasketaan alarajaratkaisun mukainen U-arvo sekä yläajaratkaisun mukainen U-arvo. Näistä arvoista lasketaan painotettu keskiarvo, mikä on rakenteen laskennallinen lämmönläpäisykerroin.
(Teikari & Keränen n.d. s. 5-8)

3.3 Haasteet U-arvon laskennassa

Laskennallisesti saatu U-arvo on tarkka ja luotettava arvo, jos mitkään olosuhteet tai muut tekijät ei muutu rakenteen ympärillä, eikä laskennassa ole jouduttu tekemään yhtään oletusta. Käytännössä rakenteen toiminnan ympärillä on paljon inhimillisiä ja muuttuvia tekijöitä, jotka vaikuttavat rakenteen toimimiseen, ja laskennassa joudutaan aina tekemään oletuksia.

Inhimillisiä tekijöitä on esimerkiksi rakenteen eristäjä. Jos rakennustyömaalla tai elementtitehtaalla eristäjä asentaa villalevyn epätäydellisesti rakenteeseen, jää tyhjän tilaan ilmatasku, ja rakenne ei toimi samalla tavalla kuin laskennassa. Tuulensuojalevyjen väliin jäänyt rako tai teippaamatta jäänyt sauma aiheuttaa konvektiota eristetilaan ja lämpötila eristetilassa laskee. Myös käytettävien materiaalien laatu ja kunto vaikuttaa rakenteen eristävyteen. Asennettu eriste saattaa olla kokonaan eri, kuin mitä on suunnitelmissa. Huolimattomasti asennettu höyrynsulku rakenteen sisäpinnassa aiheuttaa ilmapuodon rakenteen läpi, ja kostea sisäilma tiivistyessään eristeeseen kastellee eristeen, mikä heikentää eristeen kykyä estää lämpövirran johtuminen.

Asennus epätarkkuuksien ja muiden eristeen ominaisuuksia heikentävien ilmiöiden takia laskennassa käytetään aineen normaalista lämmönjohtavuutta, eli λ_n -arvoa. λ_n -arvo on kertoimilla pienennetty arvo aineen laboratoriossa saaduista ominaisuuksista. Laskennassa nämä epävarmuustekijät ovat tietynlaisia oletuksia, eikä voi odottaa että nämä oletukset toimisivat täydellisesti joka tilanteessa.

Laskennassa ei huomioida rakenteita jotka ovat tuulettuvan ilmaraon ulkopuolella. Kuitenkin esimerkiksi tiilivuoraus varsinkin kevät ja syksy aikaan lämmittää ilmarakoa auringonsäteilystä varaamallaan energialla. Sen johdosta todellinen lämpötilaero rakenteen yli on pienempi, ja siitä johtuen myös lämpövirta on pienempi. Toisaalta tuulen ollessa sopiva, saattaa tuuli aiheuttaa hyvin nopeaa ilman liikettä ilmaraossa, ja pakkasen purevuuden johdosta laskea rakenteen pintalämpötilaa merkittävästi, mikä taas johtaa suurempaan lämpövirtaan rakenteen läpi. Ilmapuodot ilmarakoihin voivat vaikuttaa monella tavalla, riippuen ovatko ilmaraoit viereisiin rakenneseisiin nähden yli- vai alipaineisia tai onko ilmarako eristeen sisä- vai ulkopuolella.

4 LAITE

Yksinkertaisesti laite mittaa millä teholla sen on lämmitettävä rakennetta, jotta sen lämpötila-anturi saavuttaa saman lämpötilan kuin laitteen ulkopuolella oleva referenssianturi.



Kuva 6. Mittauslaite (Kuva: Mika Kivelä)

- 1. Referenssianturi
- 2. Näyttö, mikä kertoo mittauksen lopuksi mittaukseen kuluneen ajan, lämmitystehon ja anturien lämpötilan
- 3. Virtakytkin

Laitteen runko on eristetty tehokkaalla eristeellä. Laitteen taustapuolella on koko laitteen alalla lämpövastus ja sen keskellä lämpötila-anturi. Kun laite asetetaan mitattavaa rakennetta vasten, laitteen runkoeriste eristää lämpötila-anturin ja mitattavan kohteen huoneilmasta, ja rakenteen yli vallitseva lämpötilaero alkaa laskea mitattavan kohdan pintalämpötilaa. Laitteen havaitessa lämpötilan laskemisen, laite alkaa lämmittää mitattavaa kohtaa lämpövastuksella. Lämmitystä jatkuu niin kauan, että laitteen lämpötila-anturi ja referenssianturi saavuttavat tasapainotilan lämpötilan suhteen. Tähän tilaan vaadittu lämmitystehon avulla voidaan laskea rakenteen todellinen U-arvo sijoittamalla mitatut arvot U-arvon kaavaan.

$$U = \frac{w}{\Delta_t \times A}$$

- w =rakenteen läpi virtaava lämpö
- Δ_t =rakenteen yli vallitseva lämpötilaero
- A =mitattava pinta-ala

Koska laite mittaa U-arvon rakenteen pinnasta, on mitattuun U-arvoon lisättävä vielä sisäpinnan pintavastus R_{si} , jotta saadaan todellinen U-arvo. R_{si} lsiäämiseksi arvoon, täytyy ensin laskea mitatun U-arvon edellyttämän lämmönvastus, eli U-arvo muutetaan käännteisluvukseen. Näin saatuun kokonaislämmönvastus arvoon lisätään mitatun lämpövirran suunnan mukainen R_{si} . Tämä kokonaislämmönvastuksen arvo muutetaan U-arvoksi ottamalla siitä käännteisluku.

Laitteen toimintaperiaate edellyttää, että lämpövirta mitattavan rakenteen läpi on vähintään $2W/m^2$. Tämä vastaa kahden lämpöasteen lämpötilaeroa rakenteella, jonka U-arvo on 1. Tämän hetken vaatimukset täyttävässä seinässä (U-arvo 0.17) se tarkoittaa n. $10,5\text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilaeroa rakenteen yli. (Paronen, 2016)

5 TUTKIMUSMENETELMÄT

5.1 Tutkimuksen periaate

Työn periaatteena on mitata eri rakenteita laitteella, ja verrata tuloksia laskennallisiin arvoihin. Tulosten perusteella voidaan arvioida, vastaavatko laskennalliset arvot myös todellisia. Mittausten tarkoituksena on myös tutkia, onko samassa rakenteessa muutoksia eri kohdissa, ja selvittää niiden syitä.

5.2 Mittaustapahtuma

Koska laite on vielä kehitysvaiheessa, ei mittaustapahtumalle ole vielä standardisoituja mittaushjeita. Tämän työn mittauksissa on noudatettu laitteen kehittäjän antamia mittaushjeita. Laitteen mittaus- ja dokumentointikäytännöt tullevat noudattelemaan lämpökuvauksen ohjeita.

Mittaus on yksinkertainen ja nopeahko tapahtuma. Laite kiinnitetään mitattavaan rakenteeseen ja kytketään päälle. Mittauksen valmistumisen laite ilmaisee kirkkaalla LED-valolla. Valon palaessa, laitteen näytöltä luetaan mitattu data, eli mitattavan kohdan pintalämpötila, lämmitykseen käytetty teho ja mittaukseen kulunut aika.

Mittauksen aikana on otettava huomioon ympäristössä vallitsevat olosuhteet. Suorassa auringonpaisteessa mittaamista tulee välttää. Parhaat tulokset saadaan, kun mittaukset suoritetaan aamulla ennen auringon nousua tai auringon laskun jälkeen. Pakkasella tuulen nopeus vaikuttaa pakkasen purrevuuteen ja voi laskea merkittävästi mitattavan rakenteen pintalämpötilaa. Tästä syystä kovalla tuulella mittaamista tulee välttää.

Mittausta suorittaessa on kuitenkin oltava huolellinen ja otettava muutama asia huomioon, että tuloksista saadaan tarkkoja ja toistettavia. (Paronen, 2016)

5.2.1 Ennen mittausta tehtävät toimenpiteet

Ennen mittausta voidaan selvittää mitattavan rakenteen laskennallinen U-arvo. Tätä varten pitää selvittää rakenteen eri kerrokset, niiden materiaali ja kerrospaksuudet. Helpoiten tämä selviää, jos mitattavasta rakenteesta on saatavilla leikkauspiirustus. Tietojen perusteella tehdään DOF-Lämpö ohjelmalla rakenteesta malli, ja ohjelma laskee rakenteelle U-arvon.

Rakenteen yli vallitseva lämpötilaero on selvitettävä. Laite antaa mittauksen yhteydessä sisäpuolen pintalämpötilan. Rakenteen ulkopuolelta lämpötila on mitattava riittävän tarkalla lämpötilamittarilla. Lämpötila ero saadaan vähentämällä sisäpinnan lämpötilasta ulkotilan lämpötila. Jos on syytä epäillä että ulkopinnan lämpötila poikkeaa ulkoilman lämpötilasta, on rakenteesta mitattava pintalämpötila esimerkiksi lämpökameralla tai infrapunamittarilla, ja käytettävä ulkopinnan pintalämpötilaa lämpötila-

eron laskemiseen. Myös sisätilan ilman lämpötila on hyvä mitata ja kirjata ylös dokumentteihin myöhempää tarkastelua varten.

Ennen mittausta on mitattava kohta todettava tarpeeksi tasaiseksi laitteelle. Jos pinta on liian epätasainen, pääse laitteen ja rakenteen väliin ilmaa, mikä muuttaa mittaustuloksen virheelliseksi. Esimerkiksi telamaalattuseinä on tarpeeksi tasainen, mutta ruiskurapattua, ns. ”röpöpintaa” ei voi toistaiseksi mitata laitteella.

(Paronen, 2016)

5.2.2 Ikkunan mittauksen erityishuomiot

Ikkunan U-arvoa mitattaessa on otettava huomioon muutamia muita mitauksista poikkeavia tekijöitä. Ikkunan alapuolella on usein lämpöpatteri, joka aiheuttaa epätasalämpöistä ilmavirtaa ikkunan pintaa pitkin. Ilmavirta aiheuttaa referenssianturiin lämpötilamuutosta, ja pitkittää mittausta ja saattaa vääristää lopputulosta. Jotta mittaus saadaan mahdollisimman nopeasti ja tarkasti tehtyä, tulee ilmavirtaus estää laittamalla esimerkiksi pahvin pala patterin yläpuolelle mittarin kohdalle. Lisäksi referenssianturin alapuolelle on hyvä tehdä teipistä pieni ilmanohjain estämään mikrovirtauksia.

Ikkunan sisäpuiteen tiiveys on huomioitava mitatessa. Jos sisäpuite vuotaa lämpimämpää sisäilmaa ikkunoiden väliin, ei sisä- ja ulkopuolen lämpötilojen avulla laskettu lämpötilaero ole todellinen, ja laskelmat antavat väärän tuloksen.

Kokemusten perusteella ikkunan korkeuden suhteen keskilinjalta mitatut tulokset ovat olleet tarkimpia.

Ikkunaa mitatessa on otettava huomioon auringon säteily. Ennen mittausta ikkunalta mitataan auringon säteilyteho mittarilla (W/m^2), ja tämä teho lisätään laitteen antamaan lämmitystehtoon.

(Paronen, 2016).



Kuva 7. Ikkunan mittaus valmis (Kuva: Mika Kivelä)

5.2.3 Mitattavat rakenteet

Mitattavaksi kohteiksi sovittiin tilaajan kanssa sisällytettäväksi eri aikakausien rakenteita ja jokaisesta kohteesta eri rakenteita mahdollisuuksien mukaan.

Mittauskohteet:

- Nykyaikainen hirsirakennus
 - ulkoseinä, yläpohja, alapohja, ikkuna $U=0.85$
- Nykyaikainen OKT
 - ulkoseinä, yläpohja, ikkuna, ovi
- Nykyaikainen toimitilarakennus
 - ulkoseinä, Ikkuna, lasiseinä
- 50-luvun massiivitiilirakennus
 - ulkoseinä, Ikkuna
- 70-luvun omakotitalo
 - ulkoseinä, ikkuna ja yläpohja
- Rintamamiestalo (Jälleenrakentamiskauden tyyppitalo)
 - ulkoseinä, yläpohja, alapohja
- Moderni tuotantorakennus
 - ulkoseinä

Jotta tuloksista saadaan luotettavia, mittausotannaksi määriteltiin vähintään 5 mittausta jokaisesta rakenteesta.

5.3 Tulosten vertaileminen

Mittarilla saatuja arvoja verrataan matemaattisella laskennalla saatuihin tuloksiin. Jotta laskennalliset tulokset ovat toistettavia ja luotettavia, käytetään laskentaan DOF-lämpö – nimistä tietokone ohjelmaa. Ikkunoissa ja ovissa käytetään valmistajien ilmoittamia arvoja vertailukohtina.

DOF-lämpö on D.o.f tech Oy:n kehittämä ohjelma, jolla voidaan tarkastella erilaisten kerrosrakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä käyttäytymistä. Ohjelma laskee rakenteen lämpö- ja kosteuskäyrät, kondensaatiomäärät, U-arvon sekä energiankulutuksen. Ohjelmalla voi tutkia seinä, katto tai alapohjarakenteiden toimintaa.

Rakenne syötetään ohjelmalle kerroksittain. Jokaiselle kerrokselle määritellään paksuus, materiaali ja mahdolliset kylmäsillat. Ohjelman omassa materiaalikirjastossa on tavallisimmin käytetyt materiaalit valmiina oikeiden arvojen kanssa. Lisäksi useilta materiaalivalmistajilta saa ohjelmaan sopivat materiaalikirjastot. Kirjastoon voi myös tallentaa omia materiaaleja, jos tarvittavaa materiaalia tietoineen ei kirjastosta löydy. Kun rakenteen kaikki kerrokset on syötetty ohjelmalle, saadaan tulokset halutulle tarkasteluhetkelle. (Dof-lämpö, n.d.)

Ohjelma on yksinkertainen käyttää, mutta vaatii käyttäjältään tietämystä teoriasta laskennan takana, ja määräyksistä, mitä tulee ottaa huomioon laskennassa, esimerkiksi kylmäsiltojen ja ilmarakojen osalta.

6 MITTAUKSET

6.1 Mittaus 1

Ensimmäinen mittaus suoritettiin Hauholla sijaitsevassa 2015 valmistuneessa hirsirunkoisessa rakennuksessa. Kokonaisuuteen kuuluu päärakenus, kaksi nukkuma-aittaa sekä rantasauna. Mittaukset tehtiin ikkunoista, ulkoseinistä, alapohjasta ja yläpohjasta. Kaikki mitattavat rakenteen olivat päärakennuksesta, paitsi yksi ulkoseinän mittaus rantasaunan seinästä.

6.1.1 Rakenteet

Mittauskohteessa ulkoseinä rakenteet ovat 210mm paksua massiivi hirttä. Saunarakennuksen hirsiseinä on 135mm paksu. Ulkoseinissä ei ole muita rakennekerroksia.

Ikkunat ovat Lammin ikkuna Oy:n valmistamia kiinteitä lämpölasikkunoita. Ikkunat ovat puukarmisia ja aukeamattomia. Lasielementit koostuvat kahdesta lasista, joiden välissä on ilmatila, joka on täytetty jalokaasulla.

Alapohja on pilariperustettu palkkirakenteinen alapohja. Lattian pintamateriaalina on 30mm paksu ponttilauta, jonka alla on 50 mm tuulettumaton ilmarako. Ilmarako on ulkoseiniin asti auki. Lämmöneristeenä on 300mm xps styrofoamia. Eristeet ovat tiivistetty lattiapalkkeihin uretaanivaahdolla.

Yläpohja on palkein toteutettu harjakatto. Kattopalkkien välissä on 300mm paksuinen styrofoam xps eriste. Styrofoam on tiivistetty palkkeihin uretaanivaahdolla. Eristeen yläpuolella on tuulettuva ilmarako, joten sen yläpuolisia rakenteita ei huomioida laskennassa

6.1.2 Laskennalliset arvot

Ikkunoille valmistajan antama U-arvo on lasin osalle 0,85. Alapohjarakenteen laskennallinen U-arvo on 0,13. Yläpohjarakenteen laskennallinen u-arvo on 0,14. Vaikka ylä- ja alapohjassa on sama määrä samaa eristettä, on niiden eristävydessä pieni ero alapohjan hyväksi. Tämä johtuu eri suuntaan suuntautuvista lämpövirroista, mikä vaikuttaa pintavastusarvoihin. Lisäksi alapohjarakenteen tuulettumaton ilmaraon eristävyys huomioidaan laskennassa. Seinän U-arvoksi laskennallisesti saatiin 0,52. Saunarakennuksen ohuemmalle seinälle arvo on 0,77.

6.1.3 Laitteella mitatut arvot

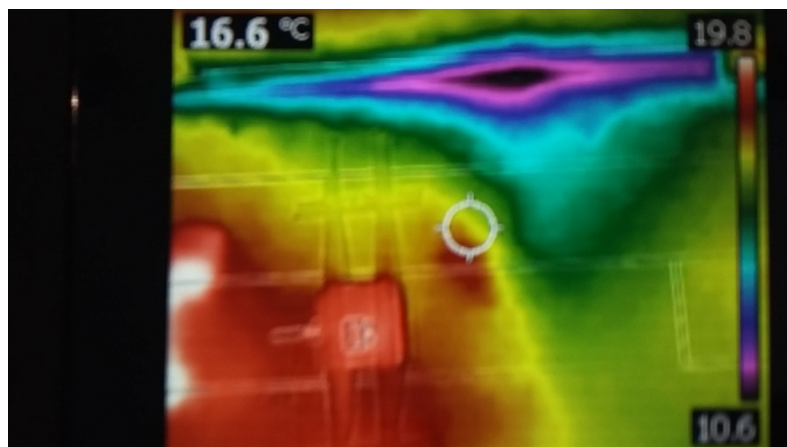
Mittausten tarkat arvot löytyvät raportin liitteenä olevasta mittauspöytäkirjojen yhteenvedosta.(LIITE 1)

Ikkunoiden mittauksessa neljä mitattua arvoa olivat 7-16 % paremmat kuin valmistajan ilmoittama arvo. Yksi mittaus oli taas 5 % huonompi. Huonoimman tuloksen antanut mittaus tehtiin aivan ikkunan alareunasta.



Kuva 8. Rättärinrannan ikkunamittaus (Kuva: Mika Kivelä)

Alapohjan mittaustuloksista kolme olivat 31–69 % heikommät kuin laskennallisesti saadut arvot. Yksi mittaustulos oli 23 % parempi ja yksi 169 % heikompä kuin laskennallinen arvo.



Kuva 9. Rättärinrannan AP3 mittauskohta.(Kuva: Mika Kivelä)

Ulkoseinien osalta mittaustulokset olivat noin 20 % paremmät kuin laskennalliset arvot. Yksi mittaus oli 2 % parempi. Nämä tulokset vastaavat hyvin teoriaa, ja pieni tulosten heittely johtunee siitä, että puu ei ole täysin homogeeninen.

Yläpohjan mittaustuloksissa hajonta oli suurin. Kolme mitatuista arvoista oli 31–46 % paremmat kuin laskennalliset arvot, ja kaksi 46 ja 92 % huonommat. Heikoimmat tulokset saatiin mittauksista, mitkä tehtiin lähimpänä räystääslinjaa.

6.1.4 Johtopäätökset

Laitteella tehdyissä mittauksissa saatiin olettamuksia vahvistavia tuloksia. Ulkoseinien mittaukset osoittivat todeksi olettamuksen, että hirren lämmöneristyskyky ei ole täysin tasainen läpi rakenteen. Jos seinän eristävyyttä haluttaisiin parantaa, voitaisiin mittarilla tutkia mitkä seinät tai seinän osat eristävät heikoimmin, ja keskittyä niihin. Tosin, jos seinän materiaaliksi valitaan hirsi, on hyväksyttävä, että sen läpi johtuu enemmän lämpöä, kuin esimerkiksi lähes koko alaltaan lämmöneristeestä koostuva pystyrunkoseinä.

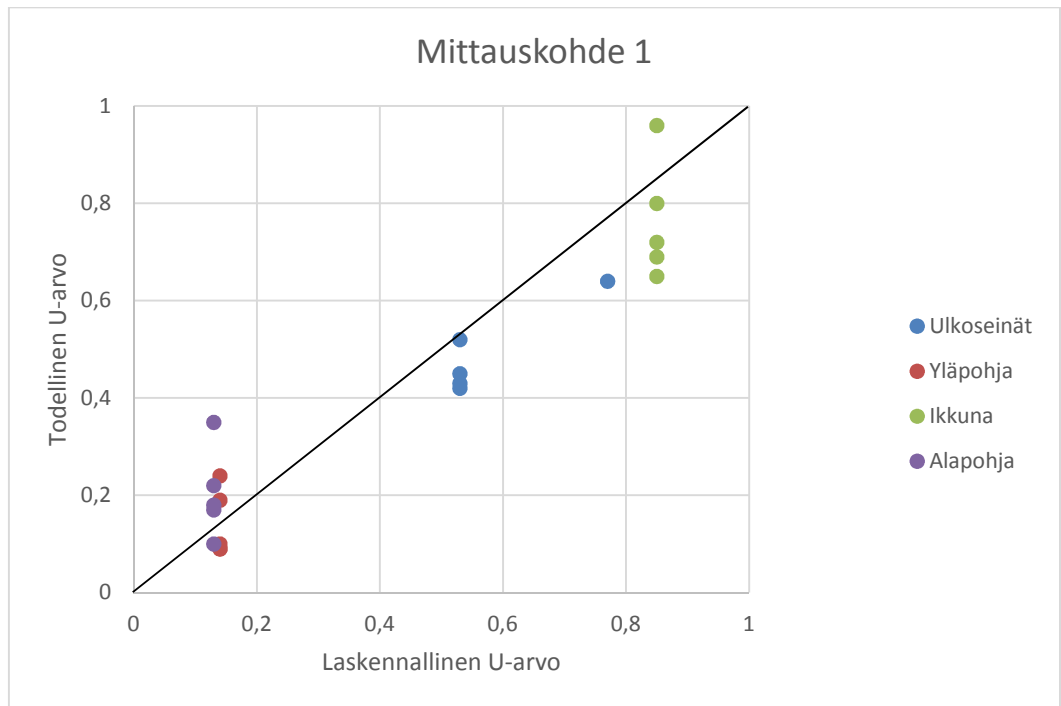
Alapohjan mittaukset osoittivat, että ilmaraon toiminta eristeenä ei siedä ollenkaan ilmavuotoa, ja että sen toiminta on riippuvainen ympäröivistä rakenteista. Huonoimman tuloksen antaneen mittauskohdan lähellä lienee ilmavuoto eristeen ohi. Tämä näkyy kohdalta otetussa lämpökamerakuvasa. Oletuksena on, että eristeen tiivistys on epäonnistunut, ja eristeen yläpuolella olevaan ilmarakoon pääsee kylmää ulkoilmaa.

Muiden tuloksien heikkoutta voidaan selittää sillä, että ilmarako on avoina ulkoseiniin asti. Heikommin eristävien ulkoseinien läpi johtuu ilmaraossa olevan ilman lämpöenergiaa, ilma viilenee. Tätä olettamusta tukee se, että paras mittaustulos saatiin pisteestä, joka oli lähimpänä rakennuksen keskilinjaa.

Mittauksen avulla voidaan osoittaa että ilmaraossa olisi hyvä olla eriste ulkoseinää vasten. Ulkoseinän reunaa kiertävä eristekaista toisi todennäköisesti suuremman hyödyn kuin koko lattian alan eristepaksuuden kasvataminen, jos ilmarako edelleen jatkuisi ulkoseinään asti.

Kattorakenteessa ilmaraot kulkevat yhtenäisinä lappeelta lappeelle, ja harjalla ei ole rakoa josta ilma pääsisi pihalle. Mittauspäivänä sää oli aivan tyyni. Olettamuksena voidaan todeta, että rakennuksen sisältä tuleva lämpövirta lämmittää ilmarakoa, ja tyynellä kelillä ilma ei vaihdu ilmaraossa. Lämmin ilma pakkaantuu ylöspäin kohti harjaa, nostaa ilmaraon lämpötilaa ja pienentää näin yläpohjan johtuvaa lämpövirtaa. Lähempänä räystästä ilmarako luovuttanee kuitenkin lämpöä ulkoilmaan, lämpötilaerojen pyrkiessä tasaantumaan lämpöisestä kylmään päin.

Mahdollinen syy ikkunoista tehtyjen mittausten tulosten hajontaan on lämpölasin lasipintojen välissä olevan kaasun kerrostuminen. Raskaampi ja paremmin lämpöä johtava ilma painuu alas, kun taas kevyemmät ja paremmin eristävät jalokaasut nousevat ylös. Tätä teoriaa tukee se, että parhaat tulokset saatiin korkeimmalta mitatusta pisteestä. Kuitenkin tuloksista laskettu keskiarvo on parempi kuin valmistajan antama arvo.



Kuva 10. Mitattujen U-arvojen korrelaatio laskennallisiin U-arvoihin.

Kaaviossa piste kuvaa yksittäisen mittauksen tulosta. Jos mitattu U-arvo on sama kuin laskennallinen U-arvo, osuu piste apuviivalle. Kaaviosta voidaan nähdä kuinka suuri hajonta eri rakenteiden keskinäisillä todellisilla U-arvoilla on. Pienin hajonta on ulkoseiniä tuloksissa. Ulkoseinät ovat muista rakenteista poiketen täysin yksiäineisiä ja ilmaraottomia.

6.2 Mittaus 2

Toinen mittaus suoritettiin Nastolassa sijaitsevassa omakotitalossa. Talo on valmistunut vuonna 2014, joten se täyttää tämän päivän rakennusmääräyksien asettamat vaatimukset. Rakennuksen rakenneratkaisut ja eriste-paksuudet ovat tyypillisiä tämän päivän pientalolle. Kohteessa mitattiin lämmöneristävyysarvot ulkoseinille, ikkunoille, oville ja yläpohjalle.

6.2.1 Rakenteet

Ulkoseinät ovat pystyrunkarunkoisia, villaeristettyjä seiniä. Pystyrunko on 198 mm vahvuinen, ja runkotolppien välissä 200 mm paksu lasivillaeriste. Rungon ulkopuolella on tuulensuojalevynä 12 mm paksu huokoinen puukuitulevy. Tuulensuojalevyn ulkopuolella on tuulettuva ilmarako, joten sen ulkopuolisia rakenteita ei oteta huomioon laskennassa. Rungon sisäpuolella on 0,2 mm paksu polyeteenikalvo höyrinsulkuna ja 48 mm paksu vaakakoolaus ja lisäeristys. Sisäverhouksena on 13 mm kipsilevy.

Ikkunat ja ovet ovat Lammin ikkuna Oy:n valmistamia. Ikkunat ovat MSE-AL-ikkunoita, eli kaksipuitteisia kolmilasisia sisäänpäin aukeavia ikkunoita. Ulommassa puitteessa on yksinkertainen lasi ja sisemmässä puitteessa kaksilasinen umpiolasielementti. Ikkunatyyppejä on nykyisin ta-

vallisin Suomessa käytetty ikkunatyyppe. Karmit ja sisempi puite on puuta, ulompi puite on alumiinia. Myös karmi on suojattu ulkoapäin säärasi-
tuksilta alumiinilla.

Talon ovet ovat lasiaukollisia ulko-ovia. Mittaukset tehtiin ovien um-
piosasta.

Talo on 1 ½ -kerroksinen, ja yläkerta on toteutettu kehäristikoidilla. Yläpoh-
jan lämmöneristys on tehty vinoilta osin palavillalla kehäristikoiden väliin.
Eristepaksuus on 400 mm. Eristeen yläpuolella 12 mm paksu huokoinen
puukuitulevy tuulensuojalevynä. Puukuitulevyn yläpuolella on tuulettuva
ilmarako, joten sen yläpuolisia vesikattorakenteita ei huomioida U-arvon
laskennassa.

6.2.2 Laskennalliset arvot

Ulkoseinien laskennallinen U-arvo on 0,15. Ikkunoiden U-arvoksi valmis-
taja ilmoitti 1 ja ovien umpiosan osalta 0,8. Yläpohjan laskennallinen U-
arvo on 0,09. Nämä ovat nykyaikaiselle pientalolle tyypillisiä arvoja. Näil-
lä arvoilla energiankulutusta ei tarvitse lämpöhäviöidentitasauslaskennassa
kompensoida muilla järjestelmillä, esimerkiksi poikkeuksellisen tehok-
kaalla ilmanvaihdon lämmöntalteenotolla. (Ihanajärvi, 2013)

6.2.3 Laitteella mitatut arvot

Mittausten tarkat arvot löytyvät raportin liitteenä olevasta mittauspöytäkir-
jojen yhteenvedosta. (LIITE 2)

Ikkunoista tehdyissä mittauksissa tulokset olivat 33 – 41 % paremmat kuin
valmistaja lupaamat arvot. Kaikki mittaukset tehtiin eri ikkunoista, ja kor-
keussuunnassa noin keskilinjalta, mistä edellisten mittausten perusteella
saadaan keskimääräiset tulokset.



Kuva 11. Ikkunoiden mittaus 2. mittauskohteessa (Kuva: Mika Kivelä)

Ulko-ovien mittaus tehtiin kolmesta eri ovesta ja viidestä pisteestä. Kai-
kissa ovissa on ikkuna, mutta mittaukset tehtiin ovien umpiosasta. Kaikki
mitatut U-arvot olivat valmistajan ilmoittamaa arvoa 10 – 61 % paremmat.

Paras ja huonoin tulos mitattiin samasta ovesta ja oven rakennetta avaamatta on mahdotonta varmasti sanoa mikä aiheutti näin ison poikkeaman.

Ulkoseinästä mitattiin 4 mittausta, kaikki pohjoista kohti olevalta seinältä. Mittaustulokset mittauskohdissa 1-3 antoi 27 – 33 % laskennallista arvoa heikomman tuloksen ja mittauskohdassa 4 mittaustulos oli 53 % parempi kuin laskennallinen arvo. Mitään oleellista poikkeamaa rakenteessa ei tuolla kohdalla ole. Mittauskohta tutkittiin rakenneilmaisimella, eikä kohdalla ole kiinnikkeitä tai sähkökaapeleita mitkä voisivat vaikuttaa tulokseen.



Kuva 12. Ulkoseinän mittaukset 2. mittauskohteessa (Kuva: Mika Kivelä)

Yläpohjamittaukset tehtiin muita mittauksia myöhempänä ajankohtana, koska alkuperäisenä mittauspäivänä sää lauhtui, ja mittauksista saadut tulokset eivät välttämättä olisi olleet täysin luotettavia. Mittauksen aikaan ulkolämpötila oli 9,5 astetta pakkasen puolella. Mittauksia tehtiin molemmilta lappeilta ja yksi mittaus harjan kohdalta katon suoralta osalta.

Kaksi mittausta, jotka tehtiin tienpuoleiselta, eli länteen, osoittavalta lappeelta, antoivat laskennallista arvoa 22 ja 56 % heikommät tulokset. Toisen puolen lappeelta saatiin tulos $U=0,22$, joka on yli kaksinkertainen laskennalliseen arvoon. Mittaus harjan kohdalta, katon suoralla osalla, tuotti ainoan laskennallisen arvon mukaisen tuloksen, $U=0,09$.

6.2.4 Johtopäätökset

Ulkoseinien mittaus osoittaa hyvin, kuinka paljon U-arvo voi todellisuudessa vaihdella samassa rakenteessa. Jos tällaisessa kohteessa oltaisiin tekemässä energiasaneerausta, olisi suunnitelmien pohjaksi hyvä mitata seinärakenteet esimerkiksi 1m^2 välein. Näin voitaisiin tosiperäisesti miettiä, onko järkevää lisäeristää koko seinärakennetta vai määrättyjä osia siitä, vai onko järkevämpää saavuttaa energiansäästö muilla optimoinneilla. Tarkka määrittäminen koko seinärakenteen lämmöneristyskyvystä antaa mahdollisuuden miettiä saneerauksen taloudellista näkökulmaa ja laskea takaisinmaksuaikaa.

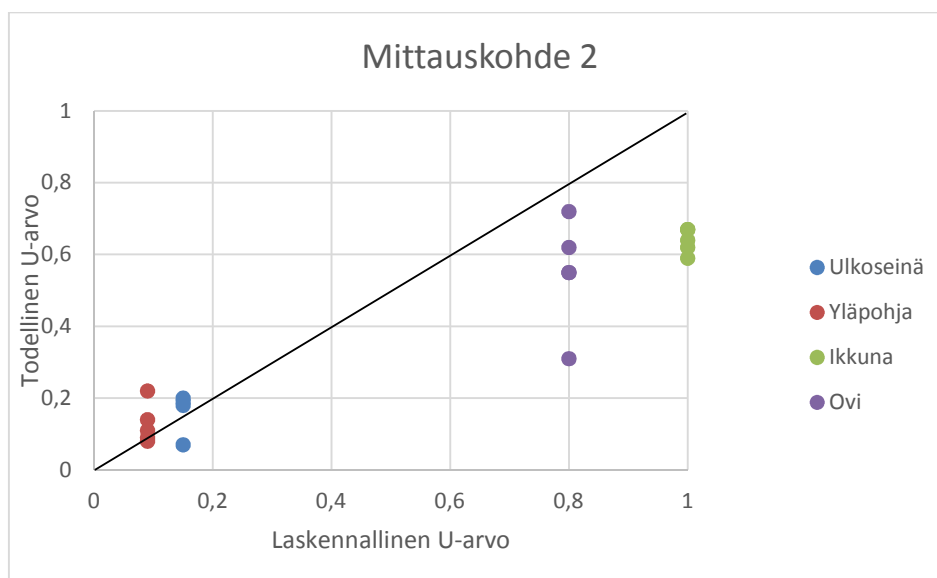
Ikkunoiden mittaus osoittaa ainakin uusien ikkunoiden olevan jopa energiatehokkaampia kuin valmistaja lupaa. Merkittävämpi lämpöhukka, kuin

lasin läpi johtuva lämpövirta, syntyy esimerkiksi jos ikkunoiden tiivistys runkoon on puutteellinen aiheuttaen ilmavuotoa. Jos ikkunoiden uusimista mietittäisiin 20 – 30 vuoden päästä, mittauksella olisi helppo tutkia, onko lasielementti yhtä eristävä kuin uutena, ja saataisiinko energiasäästö esimerkiksi uusimalla puitteiden tiivistystä karmiin tai karmin tiivistystä runkoon.

Ovien mittaukset osoittavat samaa kuin ikkunoiden mittaukset. Ovien lämmöneristävyysarvot alittavat valmistajan ilmoittamat arvot kirkkaasti. Oven umpiosien eristeen ominaisuuksien heikkeneminen pitkänkään ajan kuluessa vaikuttaa epätodennäköiseltä, joten niiden vaihtaminen pelkästään energiansäästö syistä vaatisi uusilta ovilta todella mullistavaa kehitystä lämmöneristävyydessä. Nykytietämyksellä mieleen tulisi vain tyhjiöeristeet. Lisäksi ovien pinta-alan suhteellinen osuus koko rakennuksen vaipasta on hyvin pieni joten kokonaistaloudellista hyötyä ovien uusimisella tuskin saisi. Ovissakin ennemmin tulee kysymykseen tiiveyden hyvänä pysyminen tiivisteiden ikääntyessä.

Yläpohjamittauksista kolme tuottivat laskennallisia arvoja heikommat tulokset. Tuloksia arvioidessa mitattuja arvoja heikentää vielä se, että ne on mitattu kohdasta, jossa on pelkästään eristettä. Laskennallisessa arvossa U-arvoa heikentävänä tekijänä on laskettu vielä kattokannattajien aiheuttaman kylmäsiilat. Harjan kohdalta, eli sisäkaton suoralta osalta, tehty mitaus tuotti ainoan laskennallista arvoa paremman tuloksen. Tällä kohdalla on muusta rakenteesta poiketen paneelin yläpuolella sähköasennusten takia korkeampi, 70 mm tuulettumaton ilmarako.

Mahdollisena syynä heikoille tuloksille voidaan pitää eristeen sisäistä konvektiota. Tämä tarkoittaa ilmiötä, missä eristeen sisällä tapahtuu ilmavirtausta eristeen sitoman ilman lämpötilaeron takia. Koska pääosa rakenteen yli tapahtuvasta lämpötilamuutoksesta, tapahtuu eristeen matkalla, on sen sisäpinnan lähellä oleva ilma ja ulkopinnan lähellä olevassa ilman lämpötiloissa suuri ero. Lämmin sisäpinnan lähellä oleva ilma pyrkii pienemmän tiheyden johdosta nousemaan ylöspäin, ja ulkopinnan lähellä oleva tiheämpi, kylmä ilma ”valuu” alaspäin. Ilmiö tapahtuu toistuvasti eristeen sisällä ja lisää lämpöenergian johtumista rakenteen läpi. Ilmiö huomioidaan rakennusaineiden λ_n -arvoa määrittellessä, mutta mittausten tulokset antavat aiheita mietintään, huomioidaanko ilmiötä yläpohjarakenteissa tarpeeksi.



Kuva 13. 2. Mittauskohde 2:n mitattujen U-arvojen korrelaatio laskennallisiin U-arvoihin.

Kaaviossa piste kuvaa yksittäisen mittauksen tulosta. Jos mitattu U-arvo on sama kuin laskennallinen U-arvo, osuu piste apuviivalle.

6.3 Mittaus 3

Kolmas mittaus suoritettiin 2006 valmistuneessa toimitilarakennuksessa. Rakennuksen runkojärjestelmä on pilari-palki-laatta – järjestelmä. Rakennuksen ulkoseinät muodostuvat pääosin eristerapatuista nauhaelementeistä ja ikkunauhoista. Rakennuksessa on myös kolme koko rakennuksen korkuista alumiinirunkoista lasiseinää. Kohde edustaa hyvin tyypillistä nykyaikaista toimitilarakennusta, tyypillisine rakenneratkaisuihin. Rakennuksessa mitattiin ulkoseinien, ikkunoiden ja lasiseinien eristävyttä. (Tynkkynen, 2016)

6.3.1 Rakenteet

Mitatut ulkoseinät olivat eristerapattuja nauhaelementtejä. Elementti koostuu 120 mm paksusta teräsbetoni sisäkuoresta, 160 mm paksusta mineraalivillaeristeestä ja eristeen pintaan tehdystä n. 25 mm paksusta kolmikerosrappauksesta.

Ikkunat ovat MSE-AL-ikkunoita, eli kaksipuitteisia kolmilasisia sisäänpäin aukeavia ikkunoita. Ulommassa puitteessa on yksinkertainen lasi ja sisemmässä puitteessa kaksilasin umpiolasielementti. Karmit ja sisempi puite on puuta, ulompi puite on alumiinia. Myös karmi on suojattu ulkopäin sääräsitusilta alumiinilla.

Lasiseinä koostuu alumiinisesta rungosta, johon lasielementit ovat kiinnitetty. Ikkunat ovat kiinteitä kolmilasisia lämpölasielementtejä. Rungossa

on lasielementit koko rakennuksen korkeudella, paitsi välipohjien kohdalla on umpielementit.

6.3.2 Laskennalliset arvot

Ikkunoiden ja lasiseinien lämmöneristävyys arvot sain HAMK:n rakennusmestarilta Janne Tynkkyseltä sähköpostitse. Tynkkynen kertoi Ikkunoiden U-arvoksi $U=1,3$ ja lasiseinän $U=1,4$.

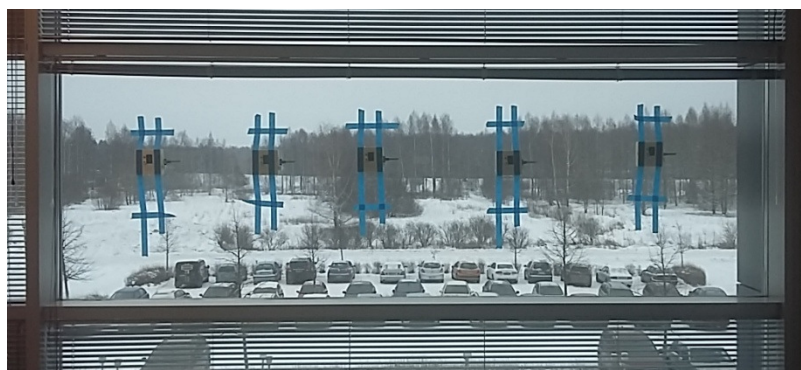
Nauhaelementtien U-arvoksi laskennallisesti saatiin $U=0,21$. Kaikki arvot ovat aikakaudelleen tyypillisiä ja määräykset täyttäviä arvoja. (Tynkkynen, sähköposti 15.2.2016)

6.3.3 Laitteella mitatut arvot

Mittausten tarkat arvot löytyvät raportin liitteenä olevasta mittauspöytäkirjojen yhteenvedosta. (LIITE 3)

Ikkunoita mitattiin kahtena eri päivänä, mittauskohtia muodostui yhteensä 8. Kaikki mittauskohdat ovat kahdessa vierekkäisessä ikkunassa. Useammalla mittauksella tavoiteltiin tulosten toistettavuutta. Toisena mittauspäivänä auringon säteily oli jo huomattavaa, vaikka mitattiin varjon puolelta, lumesta heijastunut säteily oli 15 W/m^2 . Sälekaihtimet suljettuna sisäpuolella havaittu säteily oli vain $0,7 \text{ W/m}^2$. Mittauksissa testattiin myös laskennan paikkansa pitävyyttä, mittaamalla samoista kohdista eri olosuhteiden vallitessa.

Kaikki tulokset olivat selvästi, 35 – 53 %, alle laskennallisen arvon. Tulokset noudattivat samaa linjaa kuin aiemmissa mittauksissa, mitä korkeammalla lasissa mittauskohta oli, sitä paremman arvon mittaus antoi. Tulosten keskinäinen hajonta oli 0,17 yksikköä, mikä on noin 15 % ikkunan U-arvosta.



Kuva 14. Lasiseinän mittaukset Visamäki C-Talo (Kuva: Mika Kivelä)

Lasiseinästä saatiin 4 mittaustulosta. 5. mittauskohta oli myös mittauksessa, mutta auringon nousu pitkitti tuloksen saamista ja mittaus täytyi lopettaa ennen tuloksen saamista. Saaduista tuloksista kolme oli 39 – 46 % paremmat kuin teoreettinen arvo. Yksi tuloksista oli 10 % parempi.

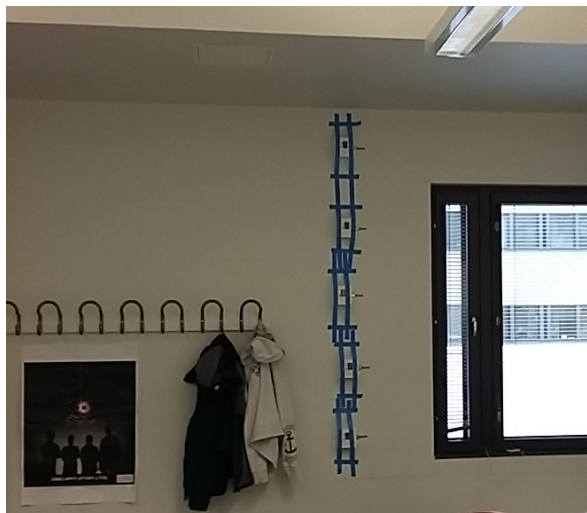
Ulkoseinästä mitattiin 5 mittausta, kaikki samasta seinästä. Mittauskohdan seinä osoitti lounaaseen. Kaikki mittauskohdat antoivat laskennallista arvoa huonomman tuloksen. Paras tulos oli 19 % huonompi ja huonoin 195 % huonompi kuin laskennallinen arvo.

6.3.4 Johtopäätökset

Myös tässä kohteessa ikkunoiden U-arvot mitaten antavat paremmat arvot kuin valmistajan ilmoittaa. Prosentuaalisesti alitus on samaa luokkaa kuin edellisen kohteen ikkunoiden mittauksissa. Voitaneen todeta, että lähes kymmenen vuotta vanhat umpiolasielementit ovat säilyttäneet eristysominaisuutensa.

Ikkunamittausten tuloksissa huomion arvoista on se, että mittaustulokset ovat hyvin toistettavissa, ja laskentamenetelmät ovat paikkansa pitäviä. Auringonsäteilyn tehon vaihtelu ikkunan mittauksissa ei muuta tulosta. Kun mittauskohta on sama, saadaan siitä sama tulos vaikka olosuhteet ympärillä muuttuu.

Lasiseinän ikkunaelementtien mittaustuloksista voidaan päätellä hyvin samankaltaiset johtopäätökset. Lasielementit eristävät jopa paremmin kuin niiden voisi laskennallisesti odottaa. Varsinkin lasiseinissä, joiden pinta-ala on hyvin huomattava, tämä vaikuttaa jo koko rakennuksen laskennalliseen energian kulutukseen. Tämän kaltaisissa julkisissa rakennuksissa, asialla voi olla suurikin painoarvo, kun rakennukselle haetaan ympäristöluokitusta, kuten LEED, BREEAM tms. Esimerkiksi kauppakeskuksissa tai toimistorakennuksissa, luokitukset ovat tänä päivänä hyvin tärkeitä. Kiinteistöjen myymisessä tai tilojen vuokraamisessa voi olla ehtona, että rakennuksella on oltava tietyn tasoinen ympäristöluokitus. Varsinkin kansainvälisillä toimijoilla nämä ovat hyvin tärkeitä.

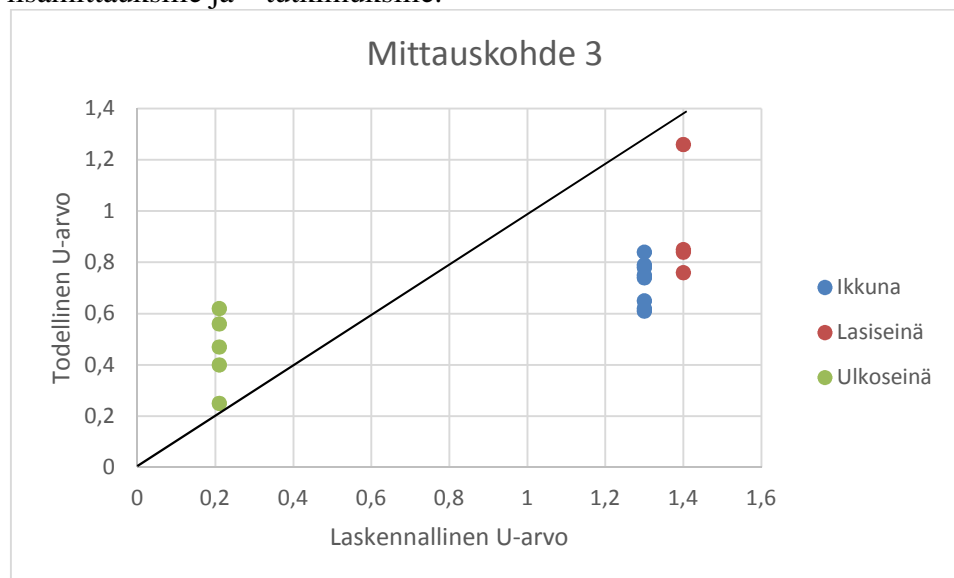


Kuva 15. Visamäki C-talon seinän mittaukset. (Kuva: Mika Kivelä)

Ulkoseinän heikoille mittaustuloksille ei löydy varmaa selitystä. Koska mittauspisteet olivat samassa pystysuorassa linjassa, yksi mahdollinen selitys on, että mittauspisteiden kohdalla on linja elementin pistoansaita. Pistoansaat ovat metallinen osa, joka yhdistää eristerappauksen rappausver-

kon sisäkuoren betoniin. Ansaat huomioidaan laskennallisessa arvossa pis-temäisenä kylmäsiirtana. Mittauskohdat tutkattiin rakenneilmallisimella, mutta koska ansaat ovat metallisia, ei niitä voi erottaa sisäkuoren raudoi-tuksista.

Toinen mahdollinen selitys huonoille arvoille olisi eristeen ominaisuuksi-en totaalinen huononeminen, esimerkiksi kastumisen ja jäätyneen johdos-ta. Tämä olisi mahdollista jos rakenteessa olisi ilmavuoto, ja kostea si-säilma pääsisi tunkeutumaan rakenteen sisälle. Kostea sisäilma tiivistyisi rakenteessa pintaan, joka on kylmempi kuin sisäilman kastepiste, joko eristeen sisälle, tai ulkokuoren pintaan. Toinen mahdollinen ilmiön synty-mistapa olisi ulkopuolisen kosteusrasituksen tunkeutuminen rakenteeseen. Seinän ulkopuolella on alemman kerroksen tasakatto. Katolla voi seistä ajoittain vettä, joka voi tunkeutua rakenteeseen, ja johtua seinään. Mitta-uskohta on myös lähellä rakennuksen sisänurkkaa. Tästä johtuen sateella, sopivan suuntaisen tuulen osuessa samaan aikaan, voi sadevesi löytää rei-tin rakenteeseen. Mittaukset antavat ehdottomasti aiheita seinärakenteen lisämittauksille ja – tutkimuksille.



Kuva 16. 3. Mittauskohteen mitattujen U-arvojen korrelaatio laskennallisiin U-arvoihin.

Kaaviossa piste kuvaa yksittäisen mittauksen tulosta. Jos mitattu U-arvo on sama kuin laskennallinen U-arvo, osuu piste apuviivalle. Tuloksista yksikään ei vastaa laskennallista U-arvoa, ja hajonta saman rakenteen todellisten U-arvojen välillä on suuri.

6.4 Mittaus 4

Neljäs mittaus suoritettiin 1950-luvulla rakennetussa massiivitiilirunkoi- sessa rakennuksessa. Rakennuksesta mitattiin ulkoseiniä ja ikkunoiden lämmöneristävyttä.

6.4.1 Rakenteet

Rakennuksen ulkoseinät ovat massiivisia umpimuurattuja seiniä. 1900-luvun alusta 1950-luvun puoleenväliin asti oli tyypillistä useampikerroksisissa rakennuksissa runkona käyttää tiilimuurattuja kantavia ulkoseiniä. Ulkoseinämuurit olivat tyypillisesti puolentoista tai kahden kiven paksuisia. Mittauskohteessa ulkoseinä on puolentoista kiven vahvuinen. Seinän ulkopinta on rapattu ja sisäpinta tasoitettu ja tapetoitu. (Tiili – ekologinen ja energiatehokas ulkoseinärakenne. n.d.)

Ikkunat rakennuksessa ovat MS-ikkunoita, eli kaksi puitteisia ja kaksilasisia ikkunoita joiden molemmat puitteet aukeavat sisälle päin. Molemmissa puitteissa on yksinkertaiset, 4 mm paksut tasolasit. MS-ikkunat olivat yleisin ikkuna tyyppi aina 1970-luvulle asti. Tänä päivänä ikkuna tyyppi tunnetaan ”mökki-ikkunana”, eli niitä käytetään lähinnä lämmittämättömissä kesäasuttavissa rakennuksissa.

6.4.2 Laskennalliset arvot

MS-ikkunoille käytetään laskennassa kirjallisuudesta saatavaa arvoa $U=2.7$. Tätä arvoa voidaan käyttää jos vanhalle kohteelle tehdään energiatodistusta tai lämmöntasauslaskelmaa rakennuslupahakemukseen, joten käytän sitä vertailuarvona. (Ikkunan korjaus, 2013)

Ulkoseinän U-arvoksi DOF-lämpö ohjelmalla saatiin $U=1,1$. Tämä vastaa muiden tutkimusten arvoja massiivitiiliseinille.

6.4.3 Laitteella mitatut arvot

Mittausten tarkat arvot löytyvät raportin liitteenä olevasta mittauspöytäkirjojen yhteenvedosta. (LIITE 4)

Ikkunoista mitattiin yhden ikkunan kolmesta lasista viisi mittausta. Lummesta heijastuneen auringon säteilyn takia mittaukset tehtiin sälekaihtimet kiinnitettyinä. Kaikki tulokset olivat alle vertailuarvon, keskimäärin 30 %. Jälkeenpäin tämä mittaustapa todettiin virheelliseksi, sillä kaihdin sitoo lämpöä, ja siten alentaa lämpövuotoa.

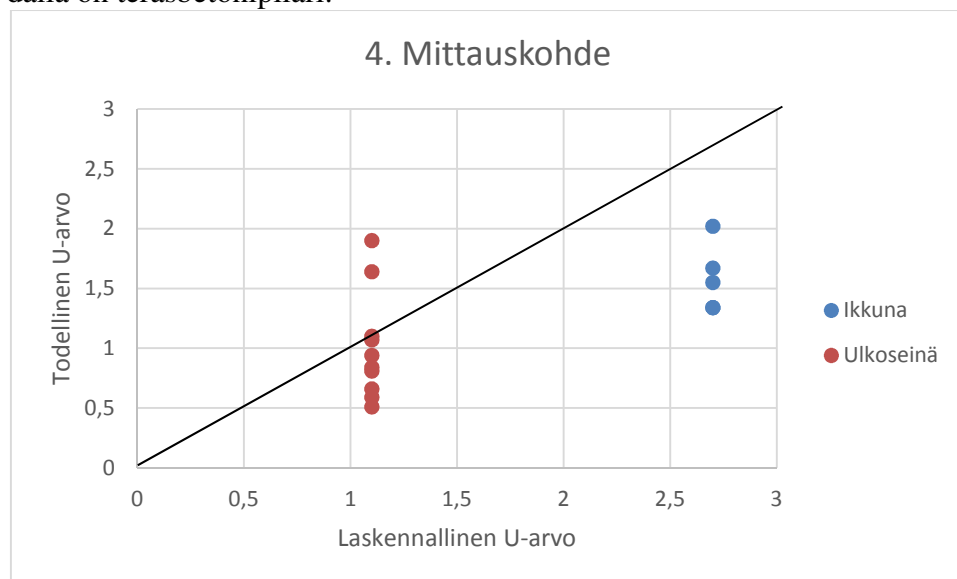
Ulkoseinien mittauksista saatiin hyvin vaihtelevia arvoja. Kaikki mitatut arvot olivat alle laskennallisen arvon. Matalin arvo oli $U=0,35$, 68 % alle laskennallisen arvon ja korkein $U=1,08$, 2 % alle laskennallisen arvon. Äärimmäiset arvot pois luettuna, mitattujen arvojen hajonta oli 0,2 yksikköä.

6.4.4 Johtopäätökset

Ikkunoiden mittaukset osoittivat todeksi sen, että vanhojen kaksilasisten ikkunoiden läpi johtuu huomattava määrä lämpöenergiaa. Vaikka mitatut tulokset ovat vertailuarvoja parempia, ovat tulokset kuitenkin jopa 3 kertaa

huonommat kuin nykyaikaisilla MSE-AL-ikkunoilla. Varsinkin rakennuksessa, jossa on huomattavan paljon ikkunapinta-alaa, kuten mitattava kohde, tarkoittaa tämä suurta vuosittaista lämpöhukkaa. Lisäksi ikkunoiden alhainen pintalämpötila aiheuttaa ikkunan läheisyydessä vedon tunnetta ihmisille, mikä saattaa johtaa huoneilman lämpötilan nostamiseen. Kyseisiä ikkunoita on ikänsä aikana huollettu, muun muassa tiivisteitä uusimalla, joten huomattavaa ilmavuotoa ikkunoissa ei havaittu. Kyseisessä kohteessa olisi kannattavaa vähintäänkin laskea ikkunoiden uusimisella saavutettava energiasäästön määrä, ja olisiko saneeraus kannattavaa. Rakennuksen ikkunat ovat jo teknisenkäyttöikänsä päässä, ja vaatisivat huoltotoimenpiteitä joka tapauksessa.

Seinän mittaukset osoittautuivat haasteellisiksi. Koska ensimmäisen mittauskerran tulosten hajonta oli erittäin suurta, päätin uusii mittauksen, samasta tilasta ja lähes samoista mittauskohdista. Mittauskohtia oli kahdessa pystylinjassa. Toinen linjoista oli kahden ikkunan välissä ja toinen oli lähellä huoneen nurkkaa. Molemmilla mittauskerroilla ikkunoiden välissä olevalta pystylinjalta saadut mittaustulokset olivat 2 - 3 kertaisia toisen linjan tuloksiin nähden. Näin voidaan olettaa että ikkunoiden välissä on huomattavasti heikommin lämpöä eristävä rakenne. Todennäköisesti kohdalla on teräsbetonipilari.



Kuva 17. 4. Mittauskohteen mitattujen U-arvojen korrelaatio laskennallisiin U-arvoihin.

Kaaviossa piste kuvaa yksittäisen mittauksen tulosta. Jos mitattu U-arvo on sama kuin laskennallinen U-arvo, osuu piste apuviivalle. Kaaviosta voidaan havaita tulosten suuri keskinäinen hajonta. Ulkoseinän tulokset poikkeavat muista mitatuista yksiaineisista rakenteista suurella hajonnallaan. Ikkunoiden U-arvojen hajonta on samaa luokkaa kuin muilla mitatuissa MS-ikkunoilla.

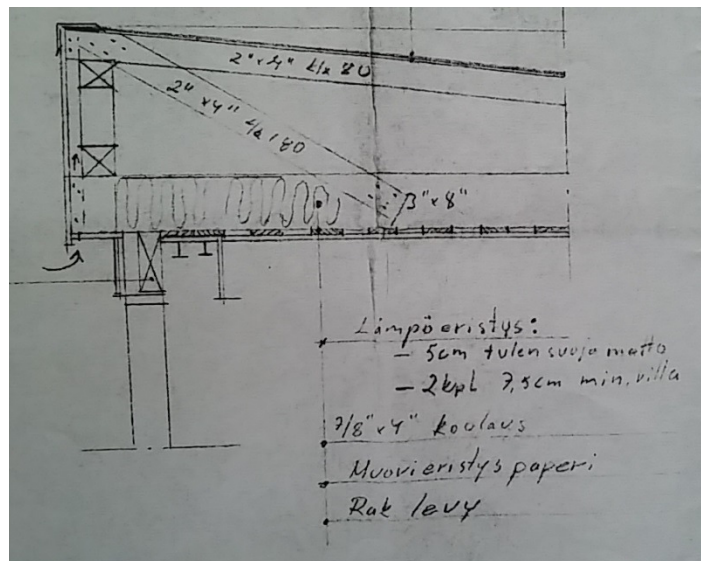
6.5 Mittaus 5

Viidentenä mittauskohteena oli vuonna 1970 rakennettu omakotitalo, joka sijaitsee Lahdessa. Talo edustaa 70 -luvun rakennustyyliä, sisältäen kaikki ajalle tyypilliset riskirakenteet, tasakatosta piilosokkeliin ja suoraan anturan päältä lähtevistä kantavista väliseinistä kapilaarikatkottomaan alapohjaan. Tosin vesikatto on muutettu 90 -luvulla harjakattoiseksi. Muutos on tehty asentamalla naulalevyristikot vanhan vesikatteen päälle. Vanhat rakenteet eristeineen on jätetty paikalleen, eikä lisäerityksiä ole tehty, joten laskennalliseen lämmöneristävyyteen muutos ei ole vaikuttanut, Kohteessa mitattiin arvot ulkoseinille, yläpohjalle ja ikkunoille.

6.5.1 Rakenteet

Mitatut seinärakenteet olivat puurunkoisia, mineraalivilla eristettyjä ja seinissä on tiilimuurattu julkisivu. Sisäpintana seinissä on lastulevy, jonka alla on eristyspaperi ilmansulkuna. Runko on 125 mm paksu ja rungon sisällä on mineraalivillaeristeet. Rungon ulkopuolella on vinolaudoitus ja tuulettuva ilmarako ja julkisivumuuraus.

Yläpohjan rakenne sisältä ulospäin on haltex-kattolevy, eristyspaperi, 22x100 mm koolaus, kattopalkit, joiden välissä 150 mm mineraalivillaa ja 50 mm tuulensuojamatto. Näiden yläpuolella on tuulettuva ilmarako ja vanhan vesikatteen kattotuolit ja vesikattorakenteet sekä uudet kattorakenteet.



Kuva 18. 5. Mittauskohteen yläpohjan rakenne. (Kuva: Mika Kivelä)

Rakennuksen ikkunat ovat MS-ikkunoita, eli kaksipuitteisia ja kaksilasisia sisäänpäin aukeavia ikkunoita. Molemmissa puitteissa on yksinkertainen 4 mm tasolasi.

6.5.2 Laskennalliset arvot

Kuten aikaisemmassa kohteessa, käytetään tässäkin Ms-ikkunoille vertailuarvoa $U=2,7$

Ulkoseinä U-arvoksi saatiin laskennallisesti $U=0,35$ ja yläpohjalle $U=0,23$. Arvot ovat aikakaudelleen tyypillisiä, ja täyttävät aikansa rakennusmääräykset. Rakennusmateriaalit ovat kehittyneet 40 vuodessa, joten samoilla eristevahvuuksilla ja -tyypeillä, saataisiin eristävämät rakenteet. Myös työtavat, ja etenkin rakenteiden liittymäkohtien detailit ovat kehittyneet varsinkin ilmanpitävyyden osalta.

6.5.3 Laitteella mitatut arvot

Mittausten tarkat arvot löytyvät raportin liitteenä olevasta mittauspöytäkirjojen yhteenvedosta. (LIITE 5)

Ikkunoista mitattiin viisi mittausta kolmesta eri ikkunasta. Ikkunoista kaksi oli itää kohti ja yksi länteen. Kaikki tuloksista olivat vertailuarvoa alhaisempia. Korkein mitattu U-arvo oli 10 % alempi kuin laskennallinen arvo, ja matalin oli 61 % alle vertailuarvon.

Yläpohja mittauksien tulokset vaihtelivat paljon, kahden huonoimman tuloksen ollessa 35 % laskennallista arvoa korkeampia, ja parhaan tuloksen ollessa 26 % laskennallista arvoa alempi. Tulosten keskiarvo oli 12 % korkeampi kuin laskennallinen arvo. Mittauspisteitä oli kahdessa eri huoneessa ja kaikki mittauspisteet olivat vähintään kahden metrin päässä toisistaan.

Ulkoseinä mittaukset tehtiin samasta seinästä, kahdessa eri huoneessa. Mittauksia oli yhteensä viisi. Kaikki tulokset olivat reilusti alle laskennallisen U-arvon. Matalin tulos, $U=0,11$, on 69 % alle laskennallisen arvon, ja korkeinkin mittaus arvo 20 %. Tulosten keskiarvo on 39 % alle laskennallisen arvon.

6.5.4 Johtopäätökset

Ikkunoiden mittaustulokset antoivat vastaavanlaisia tuloksia kuin edellisessä mittaushuoneessa samantyyppiset ikkunat. Tulokset ovat hyvin samankaltaisia kuin 4. mittaushuoneen MS-ikkunoista. Tässä kohteessa ei ikkunapinta-alaa ole suhteellisesti yhtä paljon, mutta ikkunoiden lämmöneristävyyden ero ympäröiviin rakenteisiin on suurempi, joten ikkunoiden läpijohtuvan lämpöhäviön osuus koko rakennuksen lämpöhäviöstä on suuri. Myös tässä kohteessa ikkunoiden uusimisesta olisi suositeltavaa tehdä vähintään hankesuunnitelma, ja tutkia saisiko energiansäästöillä kalettua investoinnin kustannukset.

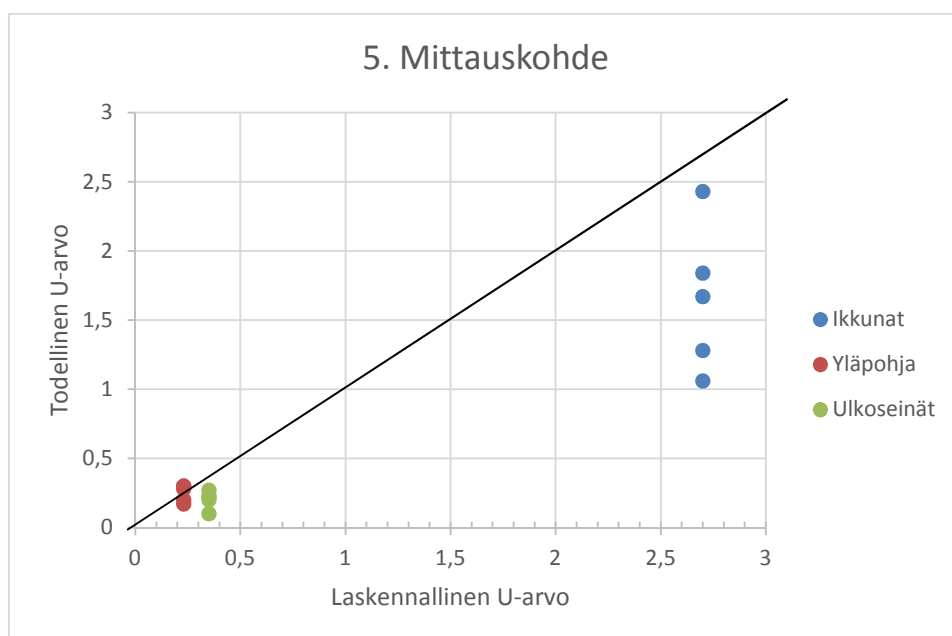
Yläpohjan mittaustulokset olivat hieman yllättävät. Ennen mittausta olisi voinut olettaa että tuloksissa olisi päästy vähintään laskennallisiin arvoihin.

hin. Mahdollisena syynä huonoihin tuloksiin epäilen eristystöiden huolimattomia työsuorituksia. Jos eristeet on asennettu huonosti, on eristelevyjen väliin voinut jäädä ilmarakoja, mitkä heikentäisivät rakenteen eristävyttä. Lisäksi ajan tapana on ollut käyttää eristelevyistä myös hyvin pienet palat, jotta materiaalin hukkaprocentti on ollut mahdollisimman pieni. Tästä johtuen rakenteessa on paljon saumoja jotka toimivat kylmäsiltaan rakenteen läpi. Talon muita rakenteita auki nähneenä, pidän tätä hyvin mahdollisena syynä heikoille tuloksille.

Jos rakennukseen suunniteltaisiin yläpohjan lisäeristystä, aiheuttaisi todellista paremmat laskennalliset arvot sen, että lisäeristyksen tuomat säästöt laskettaisiin todellista pienemmiksi ja investoinnin takaisinmaksuaika liian pitkäksi. Nämä seikat saattaisivat saada kiinteistön omistajan luopumaan investoinnista, minkä todelliset hyödyt olisivat suuremmat.

Ulkoseinien hyvien tuloksien syynä voi todennäköisesti pitää julkisivumuurausta ja tuulettuvaa ilmarakoa. Näitä rakenteita ei huomioida U-arvon laskennassa mitenkään. Kuitenkin rakenteen massiivisuus varaa auringon säteilemää lämpöenergiaa sekä seinärakenteen läpijohtuvaa sisäilman lämpöenergiaa. Kun muuraus varaa lämpöenergiaa auringon säteilystä, ja lämmittää ilmaraon lämpötilaa ulkoilmaa lämpimämmäksi, pienenee rakenteen läpi johtuva lämpövirta rakenteosan yli vallitsevan lämpötilaeron pienentyessä. On tutkittu ilmaraossa olevan ilman olevan lämmityskaudella 1 - 2 astetta lämpimämpi kuin ulkoilma. Uudisrakennuksen koko elinkaaren kustannuksia arvioidessa tällä tavoin saavutettava energiasäästö on jo huomattava.

(Tiili-ekologinen ja energiatehokas ulkoseinärakenne. n.d.)



Kuva 19. 5. Mittauskohteen mitattujen U-arvojen korrelaatio laskennallisiin U-arvoihin.

Kaaviossa piste kuvaa yksittäisen mittauksen tulosta. Jos mitattu U-arvo on sama kuin laskennallinen U-arvo, osuu piste apuviivalle.

6.6 Mittaus 6

Kuudes mittaus suoritettiin Lahden Ahtialassa sijaitsevassa niin sanotussa rintamamiestalossa. Rakennus on rakennettu 1950 - luvulla, ja edustaa jälleerakentamiskauden rakennustapaa. Rakennus on pääosin rakenteiden ja eristyksen osalta alkuperäiskuntoinen. Taloon on kuitenkin rakennettu laajennusosa, missä sijaitsee pesutilat. Kaikki mittaukset suoritettiin alkupe- räisen osan puolella. Taloon ei ole tehty lisäeristyksiä pintaremonttien yhteydessä. Ainoastaan katon saneerauksen yhteydessä yläpohjan eristeet on uusittu. Talosta mitattiin U-arvot ulkoseinille, alapohjalle ja yläpohjalle. Kaikki yläpohjan mittaukset tehtiin vinolta katon osalta.

6.6.1 Rakenteet

Ulkoseinät ovat purueristeisiä pystyrakaseiniä. Kantavana rakenteena on 50 x 100 mm rankarunko. Runkotolppien välissä on eristeen purua. Rakenne sisältä ulospäin on sisäverhouslevy, umpilaudoitus, tervapaperi, pystyrunko ja eriste, tervapaperi, umpilaudoitus, julkisivupanelointi.

Alapohja on ns. rossipohja. Lattia on kannatettu 50 x 200 mm puupalkein ja sen alla on tuulettuva ryömintätila. Alapohjassakin on eristeenä purua. Alapohja on tuulettu sokkelin läpi menevillä tuuletusaukoilla. Rakenne sisältä ulospäin on laminaatti, 22 mm lastulevy, tervapaperi, lattiapalkit ja eriste, tervapaperi, umpilaudoitus, tuulettuva ryömintätila.

Talon yläpohja on rakennusajalleen tyypillisesti jyrkkä harjakatto, joka on toteutettu 200 x 50 mm kattopalkein, jotka ovat kannatettu ulkoseiniltä ja noin lappeen kolmannespisteessä olevalla palkkilinjalla. Taloon on edellisen omistajan toimesta tehty yläpohjan saneeraus, minkä yhteydessä taloon on tehty nykyaikainen vesikaterakenne aluskatteineen ja eristeet vaihdettu purusta lasivillaan. Rakenne sisältä ulospäin sisäverhous paneeli, 22 x 100 mm koolaus ja tuulettumaton ilmarako, höyrynsulkumuovi, kattopalkit ja eristeet, huokoinen puukuitulevy 12 mm, tuulettuva ilmarako 22 mm ja vesikate rakenteet.

6.6.2 Laskennalliset arvot

U-arvo ulkoseinälle on $U=0,57$. Koska koko rakenne on puuta ja puupohjaisia aineita, on lämpötilan muutos rakenteen yli hyvin lineaarinen. Rakenteen U-arvo vastaa saman paksuisen hirsiseinän eristävyyttä.

Alapohjan laskennallinen U-arvo on $U=0,4$. Voimassa olevan rakennusmääräyskokoelman osan C3 mukainen vertailuarvo tuulettuvaan ryömintätilaan rajoittuvalle alapohjalle on $U=0,17$, eli tutkitun rakenteen läpi johtuu lähes 2,5 kertainen määrä lämpöenergiaa.

Yläpohjan laskennallinen U-arvo on $U=0,23$.

6.6.3 Laitteella mitatut arvot

Mittausten tarkat arvot löytyvät raportin liitteenä olevasta mittauspöytäkirjojen yhteenvedosta. (LIITE 6)

Ulkoseinän mittaukset tehtiin kahdessa eri tilassa, kolmella eri seinällä. Yksi mittaus tehtiin keskeltä seinää ja muut mittaukset ikkunoiden alapuolelta. Ajatuksena oli tutkia, ovatko purut painuneet ikkunoiden alla, johtaen huonompaan U-arvoon alueella. Mitatuista arvoista toiseksi heikoin tulos keskeltä seinää tehdystä mittauksesta. Tulos oli 12 % laskennallista arvoa korkeampi. Mitatuista tuloksista kaksi oli laskennallista arvoa parempia, toinen 12 % ja toinen 23 %. Kaksi muuta mitattua U-arvoa olivat 9 % ja 39 % laskennallista U-arvoa heikompia.

Alapohjan mitatut arvot olivat kaikki yli 50 % laskennallista arvoa parempia. Tuloksista 4 oli 0,01 yksikön sisällä, ja viideskin poikkesi muista tuloksista vain 0,06 yksikköä.

Yläpohjan mittauksista kolme antoi laskennallista arvoa paremman tuloksen ja yksi mittaus laskennallista arvoa vastaavan tuloksen ja viides mitattu U-arvo oli laskennallista arvoa heikompi. Laskennallisen arvon alittaneet tuloksien hajonta oli 0,05 yksikköä ja neljäs tulos poikkesi näistä 0,1 yksikön. Huonoin mitattu U-arvo oli noin kaksinkertainen parhaimpiin arvoihin nähden. Paras tulos oli 43 % laskennallista arvoa parempi, muut laskennallisen arvon alittaneet tulokset olivat 22 % ja 35 % alle laskennallisen arvon ja huonoin tulos 35 % korkeampia kuin laskennallinen arvo.

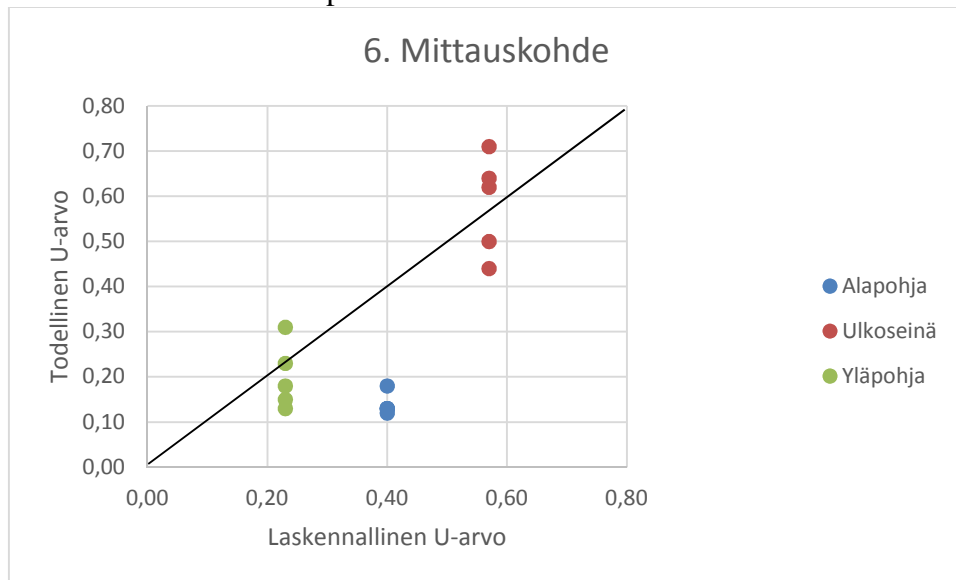
6.6.4 Johtopäätökset

Ulkoseinien mittaukset antoivat alinta ja ylintä arvoa lukuun ottamatta hyvin lähelle laskennallista arvoa olevat tulokset. Vaikka rakenne on kerrosrakenne, on sen kaikki kerrokset puuta, tai puupohjaisia tuotteita, joten lämpötilanmuutos läpi rakenteen on lähes lineaarinen. Laskennassa epävarmuustekijän tuo se, että purueristeelle ei ole vakiota λ_n -arvoa. Purun lämmöneristyskykyyn vaikuttaa suurelta osin, kuinka tiukkaan puru on pakkautunut. Kyseisen rakenteen U-arvo muuttuu välillä $U=0,51 - 0,65$, purun λ -arvoa muuttamalla välillä $0,12 - 0,08$. Vuotuista seinien läpi johtuvaa lämpöhäviötä laskiessa tämä tarkoittaa lähes 30 % eroa vuosittaisessa lämpöhäviössä. Juuri tämän kaltaisessa tilanteessa, kun oletuksella on suuri osuus laskennallisessa arvossa, laitteen tarjoama mahdollisuus tutkia rakenteen todellinen lämmöneristyskyky on loistava.

Alapohjan mitaustulokset olivat yllättävimmät. Yksi epävarmuustekijä mitattujen U-arvojen laskennassa on, sillä ryömintätilan lämpötilaa ei päästy mittaamaan kuin noin metrin etäisyydeltä sokkelista. Rakennuksen keskialueella lämpötila on saattanut olla hieman korkeampi. Suurta virhetä lämpötilaerossa en usko olevan, sillä rakennuksen kaikki tuuletusaukot ryömintätilaan oli auki, eikä sokkelia vasten ollut työnnetty lumikinosta eristeeksi, kuten tämän tyyppisissä rakennuksissa on tapana. Jotta alapohjan U-arvo olisi ollut lähellä laskennallista arvoa, olisi ryömintätilan lämpötilan pitänyt olla yli 11 astetta korkeampi kuin ulkoilman lämpötilan.

Mitään yksiselitteistä ja varmaa syytä alapohjan hyvälle tuloksille ei löytynyt.

Yläpohjan mittauksissa huonoimman tuloksen antaneen mittauksen epäilen epäonnistuneen. Syynä epäilyyn on sen huomattavasti muista poikkeava tulos, sekä se, että laite oli mittauksessa sijoitettu aivan kattopaneelin ponttiuran viereen. Laitteen taustan lämpövastuksen ensimmäinen vastuslanka on saattanut olla uran päällä, ja osa laitteen lämmitystehosta on karannut huoneilmaan. Laskennallisen arvon alittaneisiin tuloksiin on todennäköisesti vaikuttanut katon päällä oleva lumi lisäeristeenä. Vesikatteen päälle oleva lumi eristää ilmaraon ulkoilmasta ja yläpohjan läpi johtuva lämpövirta lämmittää ilmarakoa. Näin ollen lämpötila ero rakenteen yli on pienempi, ja siitä johtuen myös lämpövirta on pienempi. Mittaus, joka antoi laskennallista arvoa vastaavan tuloksen, tehtiin lähimpänä räystästä. Kuten aikaisemmissakin mittauksissa, voidaan todeta räystäään lähellä ilmaraossa vallitsevan lämpötilan olevan sama kuin ulkoilman.



Kuva 20. 6. Mittauskohteen mitattujen U-arvojen korrelaatio laskennallisiin U-arvoihin.

Kaaviossa piste kuvaa yksittäisen mittauksen tulosta. Jos mitattu U-arvo on sama kuin laskennallinen U-arvo, osuu piste apuviivalle.

6.7 Mittaus 7

Viimeinen mittaus suoritettiin 2015 valmistuneessa tuotantorakennuksessa. Rakennus oli valmistuessaan energiankäytön osalta ainutlaatuinen koko maailmassa. Halli on rakennettu lähes nollaenergiarahalliksi. Tavoitteena on ollut luoda mahdollisimman taloudellinen rakennus koko rakennuksen elinkaaren aiheuttamat kustannukset huomioon ottaen. Tämä tarkoittaa todella runsasta uusiutuvien energiamuotojen käyttöä, kuten maalämmön ja auringon säteilytehon hyödyntämistä lämmityksessä ja sähköntuottamisessa. Matalat käyttökustannukset on saavutettu kaikkien ominaisuuksien optimoinnilla, ei niinkään paksuilla ja erityisen hyvin eristetyillä rakenteilla. Hallista mitattiin ulkoseinän U-arvo.

6.7.1 Rakenteet

Ulkoseinät on toteutettu Ruukin SPA 230 E sandwich-paneeleilla. Paneeli on pinnoitettu sisä- ja ulkopuolelta pellillä ja ydin on 230 mm paksu mineraalivilla.

6.7.2 Laskennalliset arvot

Valmistajan ilmoittama U-arvo paneeleille on $U=0.19$.

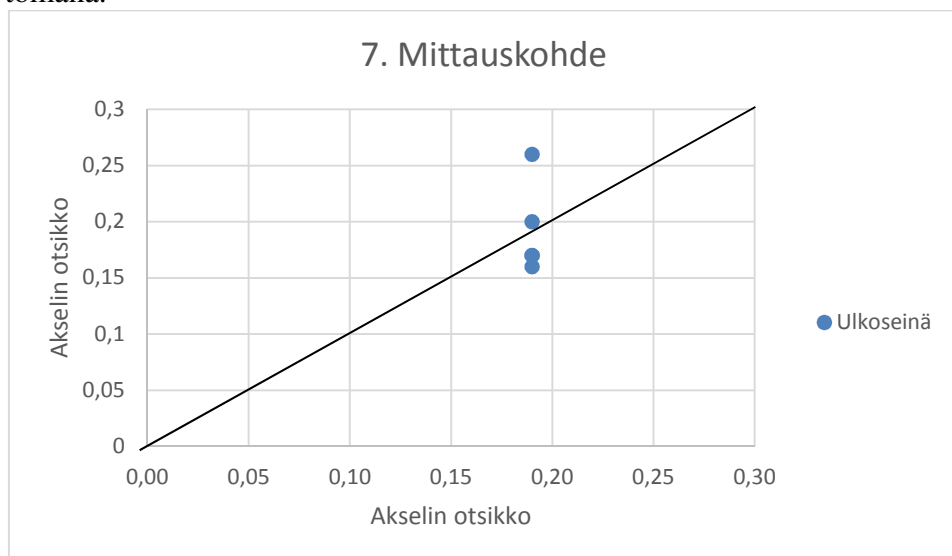
6.7.3 Mitatut arvot

Mittausten tarkat arvot löytyvät raportin liitteenä olevasta mittauspöytäkirjojen yhteenvedosta. (LIITE 7)

Kolme mittausta viidestä antoi laskennallista arvoa paremman tuloksen. Näiden mittausten tulokset olivat $U=0,16 - 0,18$, eli 5 - 11 % alle laskennallisen arvon. Yhden mittauksen tulos $U=0,2$ on 5 % korkeampi kuin laskennallinen arvo. Viidennen mittauksen tulos poikkesi muista arvoista, ollessaan 37 % korkeampi kuin laskennallinen arvo.

6.7.4 Johtopäätökset

Mitatuista arvoista 4 oli 0,02 yksikön hajonnan sisällä laskennallisesta arvosta. Yhden mittauksen poikkeama muista mittauksista saattaa selittyä haastavilla mittausolosuhteilla. Hallissa oli mittauksen aikana normaalit toiminnot käynnissä, ja hallin isot nosto-ovet olivat mittauksen aikana ajoittain auki, johtuen trukki liikenteestä. Näistä havainnoista voimme päätellä että mitattavana rakenteena lähes yksiaineinen ilmaraoton rakenne antaa hyvin tarkasti samoja arvoja niin laskennallisesti kuin mitattunakin. Mittausolosuhteet tulisi saada pidettyä koko mittauksen ajan muuttumattomana.



Kuva 21. 7. Mittauskohteen mitattujen U-arvojen korrelaatio laskennallisiin U-arvoihin.

Kaaviossa piste kuvaa yksittäisen mittauksen tulosta. Jos mitattu U-arvo on sama kuin laskennallinen U-arvo, osuu piste apuviivalle. Mitatuista rakenteista 7. mittauskohteen seinän todellisten U-arvojen hajonta toisistaan sekä poikkeama laskennallisesta U-arvosta oli pienintä.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

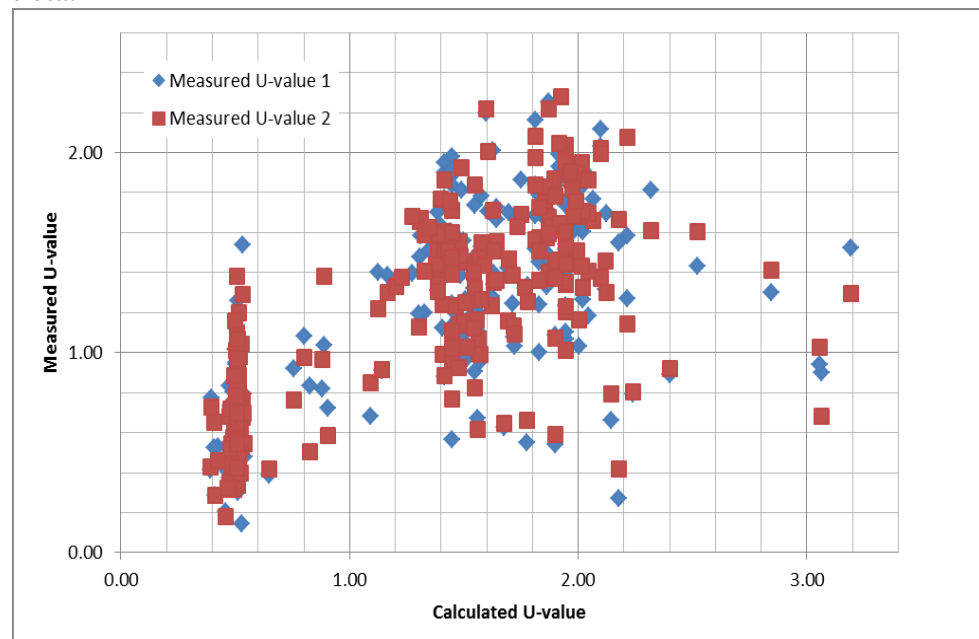
7.1 Laite

Laitteen tarkkuus on todistettu jo aiemmin laboratoriotesteissä, ja näillä kenttätestauksilla todistettiin laitteen olevat käytännöllinen myös kentällä. Laitteessa on vielä puutteita ja käytännön työtä häiritseviä ominaisuuksia, mutta ovat ne hyväksyttäviä ottaen huomioon laitteen kehityksen ja tuotetuistuksen keskeneräisyyden. Laitteen kehitysehdotuksista kerrotaan tarkemmin luvussa 8.1.

Tämän tutkimuksen perusteella laitteelle on ehdottomasti tarvetta rakenteiden lämmöneristyskykyä tarkasteltaessa.

7.2 Tulosten korrelaatio laskennallisiin arvoihin

Vastaavalla laitteella BRE:n (Building Research Establishment) tekemissä kenttätesteissä mitattiin erilaisten tiilirakenteiden U-arvoja. Testien mitattujen U-arvojen ja laskennallisten U-arvojen välillä ei havaittu korrelaatiota.

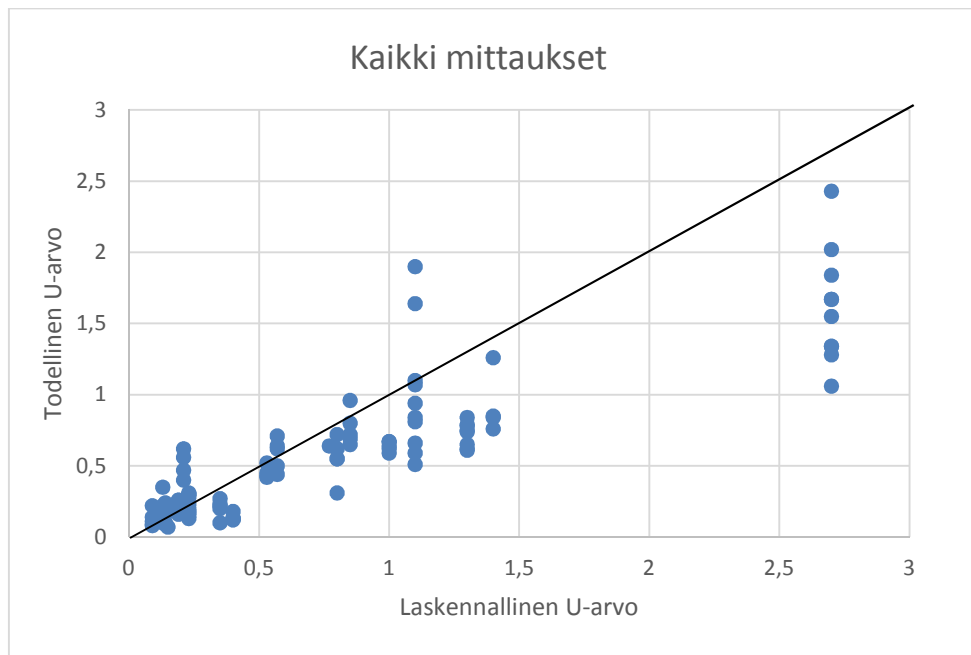


Kuva 22. BRE:n kenttätestien mitattujen U-arvojen korrelaatio laskennallisiin U-arvoihin. (Kuva: Paronen 2016)

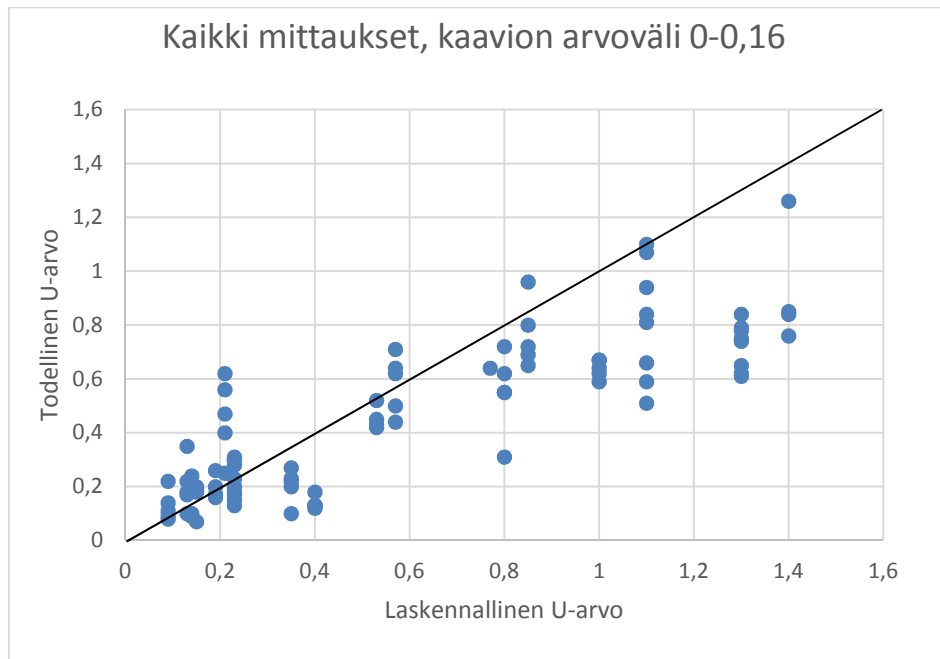
Kenttätestausten 106 mittauksessa vain 4 todellinen U-arvo oli sama kuin laskennallinen U-arvo. Pääosin mitatut arvot olivat laskennallisia arvoja

matalampia. Mittauksissa havaittiin suuriakin poikkeamia laskennallisiin arvoihin. Samasta rakenteesta mitatut U-arvojen keskinäinen hajontakin oli suurta.

Tulosten poikkeamat laskennallisista arvoista sekä samassa rakenteessa tehtyjen mittausten tulosten suuri hajonta osoittaa, että on tarpeen tutkia rakenteen todellinen lämmöneristyskyky, jos suunnitellaan rakenteen energiatehokkuuden parantamista tai tutkitaan sen vaurioita. Laitteella on mielestäni ehdottomasti kaupallista potentiaalia ja tarvetta rakennusten tutkimuksissa. Laitteella mitattuihin faktoihin perustuvat laskelmat ovat hankesuunnitteluvaiheessa ehdottomasti uskottavampia kuin pelkästään teoreettiset laskelmat.



Kuva 23. Kaavio mitattujen U-tulosten korrelaatiosta laskennallisiin U-arvoihin

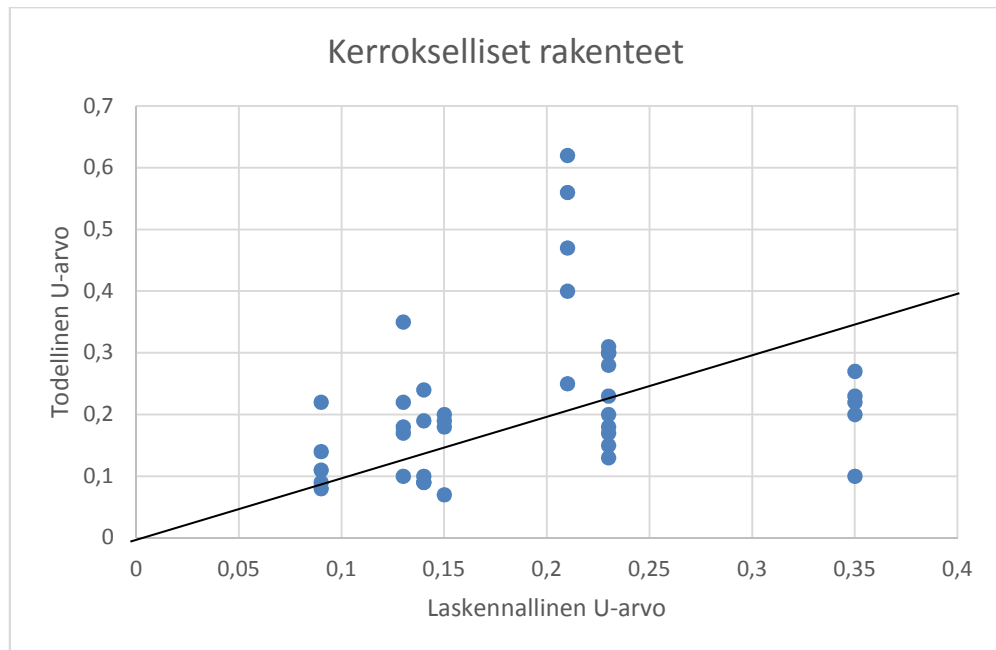


Kuva 24. Kaavio mitattujen tulosten korrelaatiosta laskennallisiin U-arvoihin, kaavion osa 0-1,6

Kaaviossa piste kuvaa yksittäisen mittauksen tulosta. Jos mitattu U-arvo on sama kuin laskennallinen U-arvo, osuu piste apuviivalle.

7.2.1 Kerrokselliset rakenteet

Rakenteet joissa oli kerrosten välissä ilmarakoja lähempänä lämmintä pintaa, antoivat lähes poikkeuksetta laskennallista arvoa korkeampia mittaus-tuloksia. Sen sijaan rakenteet, joissa on ilmarako rakenteen eristävän osan kylmemmällä puolella, antoivat laskennallisia arvoja parempia tuloksia. Tuulettuvien ilmarakojen ulkopuolella olevat rakenteet, joita ei laskennassa huomioida, oletettavasti vaikuttivat myös tuloksiin. Esimerkiksi ulkoseinissä tuulettuvan ilmaraon ulkopuolella olevat pintarakenteet paransivat rakenteet lämmöneristävyyttä, vaikka niitä ei laskennallista U-arvoa määrittäessä oteta huomioon.

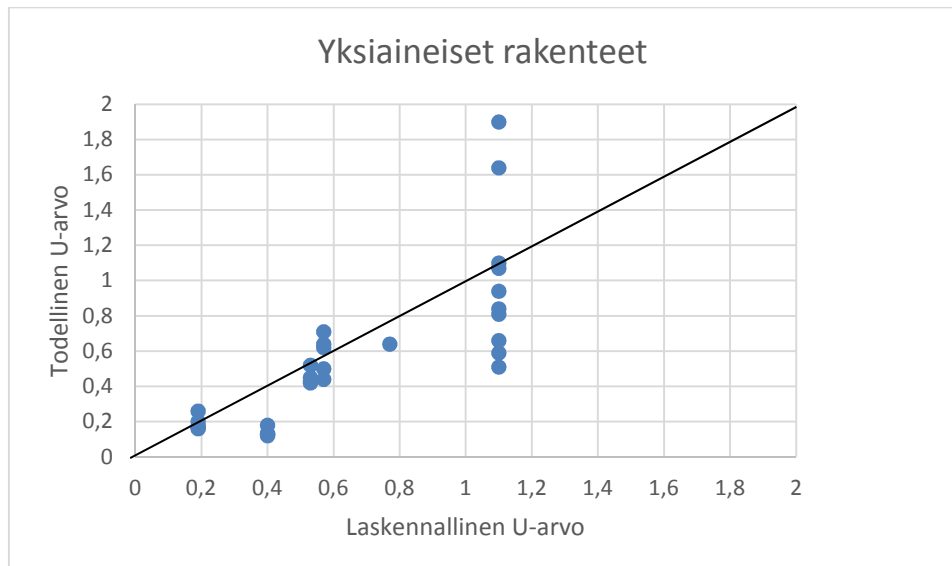


Kuva 25. Kaavio kerroksellisten rakenteiden todellisten U-arvojen korrelaatiosta laskennallisiin arvoihin.

Kaaviosta voidaan havaita mitattujen kerroksellisten rakenteiden U-arvojen keskinäinen hajonta.

7.2.2 Yksiaineiset rakenteet

Samasta rakenteesta mitattujen U-arvojen hajonta oli pienintä rakenteissa, jotka olivat lähes tai kokonaan yksiaineisia. Mitatuista rakenteista hirsiseinän, purueristetyin seinän sekä sandwich-paneeli seinän mittaustulosten keskinäinen hajonta sekä poikkeama laskennallisesta arvosta olivat pienimmät. Purueristeinen puurakenteisen alapohjan todellisten U-arvojen hajonta oli pientä, mutta ero laskennalliseen arvoon oli huomattava. Massiivi tiilirakenteisen ulkoseinän mitattujen U-arvojen hajonta, ja poikkeama laskennalliseen arvoon oli suuri.



Kuva 26. Kaavio yksiaineisten rakenteiden todellisten U-arvojen korrelaatiosta laskennalliseen U-arvoon.

7.3 Mittauksen vaatima aika

Yhteen mittaukseen kulunut aika oli noin tunti. Tilanteissa, joissa rakenteen läpi johtui vain vähän lämpöä, mittaukset olivat nopeimpia. Hitaimpia mittaukset olivat ikkunoista, auringon säteilytehon vaihtelevuudesta johtuen. Mittausta hidastaa jos olosuhteet mitattavassa kohteessa muuttuu mittauksen aikana. Ilman virtaukset muuttavat referenssianturin mittaamaa lämpötilaa, ja pitkittävät mittausta.

Yhden työpäivän aikana sai mitattua neljä tai viisi mittausta jos mitattavia kohtia ei tarvitse erityisesti tutkia. Viidellä mittalaitteella tämä tarkoittaa yhteensä 20 - 25 mittaustulosta.

Mittauspöytäkirjat saa täytettyä mittausten aikana sekä suoritettua muun dokumentoinnin, eli tulosten kirjaamisen manuaalisesti ylös, valokuvauksen, säätötilan dokumentoimisen yms. Raportointiin ja johtopäätösten tekoon voi laskea kuluvan toisen työpäivän.

8 KEHITYSEHDOTUKSET

8.1 Laite

Noin 100 mittausta laitteella suoritettua mittausta toi esille muutamia kehitys kohtia laitteelle. Laite kiinnitetään mitattavaan rakenteeseen teipillä, ja varsinkin yläpohjamittauksissa laitteen ja rakenteen väli on hankala saada täysin tiiviiksi. Tätä voisi parantaa tiiviste laiteen taustan reunoilla. Tiivis-

te voisi myös mahdollistaa epätasaisempien pintojen mittauksen. Tämä on mielestäni tärkeä kehityksen kohde, sillä jos laitteen ja mitattavan rakenteen välissä on yhtään ilmaa, vaikuttaa se heti mittaustulokseen.

Jos laitteessa on jatkossakin näyttö, olisi se hyvä olla taustavalaistu. Nyt vähänkään hämärässä on tiedot hankalasti luettavissa näytöltä. Näyttö voisi olla myös 90° kierretty. Kun laite asetetaan mittaukseen ohjeiden mukaisesti siten, että referenssianturi on laitteen sivulla, on näyttöä luettava poikittain.

Eri rakenteiden mittauksista ikkunoiden mittaaminen on ollut haastavinta. Auringonsäteily, ja varsinkin säteilyn voimakkuuden vaihtelu tuotti haasteita. Äkillinen auringon säteilyn muutos aiheuttaa sen, että laitteen mittausanturin lämpötila nousee referenssianturin lämpötilaa korkeammaksi. Tällöin laite katkaisee vastuksen lämmityksen, ja odottaa että mittausanturin lämpötila laskee jälleen referenssianturin lämpötilan alapuolelle, ja aloittaa uudelleen lämmityksen. Ilmiö toistuu niin monta kertaa että laite saa anturien lämpötilat tasapainoon ja antaa tuloksen. Mittaus kuitenkin pitkittyy tästä huomattavasti, pisimmillään mittaus kesti lähes kolminkertaisen ajan, ja muutaman kerran lopetin mittauksen ennen tuloksen saamista. Tammi- helmikuun vaihteessa aamut ovat vielä niin pimeitä, että auringon säteily tuottanut ongelmia, mutta jo helmikuun loppupuolella aamupäivienkin säteilyteho vaikutti mittauksiin. Varjonpuoleltakin mitatessa lumesta heijastunut säteily aiheutti saman ilmiön. Tähän olisi hyvä keksiiä ratkaisu, muutoin laitteen käyttö ikkunoiden mittauksessa on hankalaa, ja mahdollinen työskentelyaika vuodessa jää vähäiseksi. Ehdotukseni on kehittää ikkunan ulkopuolelle kiinnitettävä varjostin, tai kalvo, joka päästää mahdollisimman vähän auringon säteilyä läpi.

Laitteen kiinnitystapaa olisi mielestäni hyvä miettiä. Teippi kiinnitys on hyvä, koska se on nopea ja yksinkertainen, mutta aroille pinnoille, kuten tapetille vahinkoa aiheuttava. Yhdessä mittauskohteessa laitetta irrottaessa tapetin pinta vaurioitui.

8.2 Tiedon hyödyntäminen

Laitteen mittaustulokset luetaan manuaalisesti laitteen näytöltä. Mittausdatasta saadaan laitteen käyttämä lämmitysteho ja rakenteen pintalämpötila, joiden avulla saadaan laskettua rakenteen U-arvo. Lisäksi jos tulokset halutaan dokumentoida, on ne kirjoitettava käsin ylös. Tiedon käytettävyyden kannalta olisi helpompaa, jos tieto saataisiin langattomasti siirrettyä joko mobiililaitteelle tai tietokoneelle ohjelmistolle joka käsittelisi tiedon. Ohjelmistolle käsin syötettäviä tietoja olisi vain ulkolämpötila ja auringonsäteilyteho. ohjelmisto laskisi rakenteen U-arvon, yhdistäisi samasta rakenteesta mitatut tulokset ja laskisi matalimmat ja korkeimmat tulokset sekä keskiarvon. Jos rakenteesta annettaisiin kokonaispinta-ala ja sijainti paikkakunta, voisi ohjelmisto laskea vuosittaisen energian kulutuksen. Ohjelmisto myös loisi mittauspöytäkirjat ja yhteenvetoraportit mittauksista. Näin tieto saataisiin selkeään helposti hyödynnettävään muotoon sekä olisi helposti tallennettavissa ja raportoitavissa eteenpäin.

LÄHTEET

Björkholtz, D, 1997, Lämpö ja kosteus rakennusfysiikka, Helsinki: Rakennustieto Oy

Dof-lämpö, ohjekirja, n.d. Dof-tech Oy. Luettu 17.2.2016
<http://www.doftech.fi/www/files/DOF-lampo.pdf>

Ihanajärvi, K. 2013. Uudisrakentamisen energiamääräykset ja E-luvun laskenta. Hämeen ammattikorkeakoulu. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö.

Ikkunan korjaus. 1.2.2013. Oulun rakennusvalvonta. Luettu 1.3.2016.
http://www.energiakorjaus.info/pages/kortit/Pientalo_4_Ikkunakorjaus_2013_02_01.pdf

Korkeamäki, T, 2010, Rakennusten energiankäyttöön liittyviä tarkasteluja, Luentomateriaali HAMK. 27.11.2010

Lämmitystarveluku eli astepäiväluku. n.d. Ilmatieteen laitos. Viitattu 10.02.2016.

http://ilmatieteenlaitos.fi/lammitystarveluvut?p_auth=AxAeO42m&p_p_id=WebProxyPortlet_WAR_WebProxyPortlet_INSTANCE_ZZq1&p_p_lifecycle=1&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-2&p_p_col_count=3&_WebProxyPortlet_WAR_WebProxyPortlet_INSTANCE_ZZq1_edu.wisc.my.webproxy.URL=http%3A%2F%2Fcdn.fmi.fi%2Flegacy-fmi-fi-content%2Fproducts%2Fheating-degree-days%2Findex.php

Lämpöilmiöitä. n.d. peda.net. Viitattu 12.2.2016
<https://peda.net/kontiolahti/ahokkalan-koulu/el12/fyke/vk12/1%C3%A4mp%C3%B6-luonnos/ll/l/mkvllkstnolvklppvlj>

Paloniitty, S. 2011. 2. Lämpö. Rakennusfysiikan luentomateriaali HAMK. 2011

Paronen, M. 2016 Head of Department, Department of Energy and Materials Technology, Arcada, Palaveri 20.1.2016

Rak Mk C4, 2003. Lämmöneristys. Ohjeet 2003, Helsinki: Ympäristöministeriö. Viitattu 10.2.2016 <http://www.finlex.fi/data/normit/1931-C4s.pdf>

Seppänen, O, 1995, Rakennusten lämmitys, Jyväskylä: Suomen LVI-yhdistysten liitto ry

Siikanen, U, 2014, Rakennusfysiikka Perusteet ja sovelluksia, Tampere: Rakennustieto Oy

Teikari, M. & Keränen, H. n.d. Ulkoseinän lämpöhäviöiden määrittäminen. Viitattu 15.3.2016
<https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK010704.pdf>

Tiili-ekologinen ja energiatehokas ulkoseinärakenne. n.d. rakennustieto.fi. Viitattu 10.3.2016.
http://www.rakennustieto.fi/lehdet/ry/index/lehti/P_181.html

Tilastoja rakennuskannasta. n.d. rakennusperinto.fi, viitattu 14.3.2016
http://www.rakennusperinto.fi/kulttuuriymparisto/aikakaudet/fi_FI/tilastoj_a_rakennuskannasta/

Tynkkynen, J. 15.2.2016. Visamäki C-rakennuksen ja Ohutlevykeskuksen rakenteet. Vastaanottaja Mika Kivelä. Sähköpostiviesti. Viitattu 26.02.2015

MITTAUSPÖYTÄKIRJOJEN YHTEENVETO, NYKYAIKAINEN OKT

Nykyaikainen OKT, yhteenveto

MITTAAJA: Mika Kivelä

PVM: 29.01.2016

	Laskennallinen	Mitattu		Kommentti
	U-arvo	U-arvo	Ero %	
Ikkuna 1	1,00	0,65	-35 %	
Ikkuna 2	1,00	0,73	-27 %	
Ikkuna 3	1,00	0,74	-26 %	
Ikkuna 4	1,00	0,70	-30 %	
Ikkuna 5	1,00	0,67	-33 %	Oven ikkuna

	Laskennallinen	Mitattu		Kommentti
	U-arvo	U-arvo	Ero %	
Ulko-ovi 1	0,80	0,32	-60 %	
Ulko-ovi 2	0,80	0,80	0 %	
Ulko-ovi 3	0,80	0,67	-16 %	
Ulko-ovi 4	0,80	0,59	-26 %	
Ulko-ovi 5	0,80	0,60	-25 %	

	Laskennallinen	Mitattu		Kommentti
	U-arvo	U-arvo	Ero %	
YP1	0,11	0,14	27 %	
YP2	0,11	0,14	27 %	
YP3	0,11	0,14	27 %	
YP4	0,11	0,09	-18 %	
YP5	0,11	0,23	109 %	

	Laskennallinen	Mitattu		Kommentti
	U-arvo	U-arvo	Ero %	
US1	0,17	0,21	24 %	
US2	0,17	0,19	12 %	
US3	0,17	0,19	12 %	
US4	0,17	0,07	-59 %	

KOMMENTIT:

MITTAUSPÖYTÄKIRJOJEN YHTEENVETO, NYKYAIKAINEN
TOIMITILARAKENNUS

Nykyaikainen toimitilarakennus, yhteenveto

MITTAAJA: Mika Kivelä

PVM: 23. ja 25.02.2016

	Laskennallinen	Mitattu		Kommentti
	U-arvo	U-arvo	Ero %	
Ikkuna 1	1,30	0,67	-48 %	
Ikkuna 2	1,30	0,67	-48 %	
Ikkuna 3	1,30	0,82	-37 %	
Ikkuna 4	1,30	0,72	-45 %	
Ikkuna 5	1,30	0,88	-32 %	kohtuullinen auringon heijastus lumesta
Ikkuna 6	1,30	0,87	-33 %	kohtuullinen auringon heijastus lumesta
Ikkuna 7	1,30	0,83	-36 %	
Ikkuna 8	1,30	0,94	-28 %	

	Laskennallinen	Mitattu		Kommentti
	U-arvo	U-arvo	Ero %	
Laseinä1	1,40	1,51	8 %	
Laseinä2	1,40	0,95	-32 %	
Laseinä3	1,40	0,84	-40 %	
Laseinä4	1,40	0,95	-32 %	

	Laskennallinen	Mitattu		Kommentti
	U-arvo	U-arvo	Ero %	
US1	0,21	0,43	105 %	Seinä mittausten huonot tulokset antavat
US2	0,21	0,26	24 %	aihetta lisätutkimuksille.
US3	0,21	0,61	190 %	
US4	0,21	0,50	138 %	
US5	0,21	0,68	224 %	

KOMMENTIT:

MITTAUSPÖYTÄKIRJOJEN YHTEENVETO, 50-LUVUN
MASSIIVITIILIRAKENNUS

50-Luvun massiivitiilirunkorakenus yhteenveto

MITTAAJA: Mika KiveläPVM: 2.3.2016

	Laskennallinen	Mitattu		Kommentti
	U-arvo	U-arvo	Ero %	
Ikkuna 1	2,70	1,55	-43 %	
Ikkuna 2	2,70	2,00	-26 %	
Ikkuna 3	2,70	1,84	-32 %	
Ikkuna 4	2,70	1,55	-43 %	
Ikkuna 5	2,70	2,54	-6 %	

	Laskennallinen	Mitattu		Kommentti
	U-arvo	U-arvo	Ero %	
US1 (Pilari)	1,10	1,28	16 %	
US2 (Pilari)	1,10	1,25	14 %	
US3	1,10	0,35	-68 %	
US4	1,10	0,64	-42 %	
US5	1,10	1,08	-2 %	
US6	1,10	0,72	-35 %	
US7	1,10	0,91	-17 %	
US8	1,10	0,95	-14 %	
US9 (Pilari)	1,10	2,53	130 %	
US10 (Pilari)	1,10	2,08	89 %	

KOMMENTIT:

MITTAUSPÖYTÄKIRJOJEN YHTEENVETO, 70-LUVUN OKT

70-luvun OKT, yhteenveto

MITTAAJA: Mika KiveläPVM: 1.3.2016

	Laskennallinen	Mitattu		Kommentti
	U-arvo	U-arvo	Ero %	
Ikkuna 1	2,70	3,54	31 %	Mittaus todennäköisesti epäonnistunut
Ikkuna 2	2,70	2,14	-21 %	
Ikkuna 3	2,70	2,41	-11 %	
Ikkuna 4	2,70	1,53	-43 %	
Ikkuna 5	2,70	1,22	-55 %	

	Laskennallinen	Mitattu		Kommentti
	U-arvo	U-arvo	Ero %	
YP1	0,23	0,21	-9 %	
YP2	0,23	0,29	26 %	
YP3	0,23	0,31	35 %	
YP4	0,23	0,31	35 %	
YP5	0,23	0,17	-26 %	

	Laskennallinen	Mitattu		Kommentti
	U-arvo	U-arvo	Ero %	
US1	0,35	0,21	-40 %	
US2	0,35	0,28	-20 %	
US3	0,35	0,11	-69 %	
US4	0,35	0,24	-31 %	
US5	0,35	0,23	-34 %	

KOMMENTIT:

MITTAUSPÖYTÄKIRJOJEN YHTEENVETO, ”RINTAMAMIES-TALO”

"Rintamamies-talo", yhteenveto

MITTAAJA: Mika Kivelä

PVM: 11.03.2016

	Laskennallinen	Mitattu		Kommentti
	U-arvo	U-arvo	Ero %	
AP1	0,38	0,13	-66 %	
AP2	0,38	0,13	-66 %	
AP3	0,38	0,19	-50 %	
AP4	0,38	0,14	-63 %	
AP5	0,38	0,13	-66 %	

	Laskennallinen	Mitattu		Kommentti
	U-arvo	U-arvo	Ero %	
YP1	0,24	0,15	-38 %	
YP2	0,24	0,18	-25 %	
YP3	0,24	0,32	33 %	Mittaus todennäköisesti epäonnistunut
YP4	0,24	0,14	-42 %	
YP5	0,24	0,24	0 %	

	Laskennallinen	Mitattu		Kommentti
	U-arvo	U-arvo	Ero %	
US1	0,65	0,70	8 %	
US2	0,65	0,67	3 %	
US3	0,65	0,79	22 %	
US4	0,65	0,54	-17 %	
US5	0,65	0,69	6 %	

KOMMENTIT:

MITTAUSPÖYTÄKIRJOJEN YHTEENVETO, MODERNI
TUOTANTORAKENNUS

Moderni tuotantorakennus, yhteenveto

MITTAAJA: Mika KiveläPVM: 14.03.2016

	Laskennallinen	Mitattu		Kommentti
	U-arvo	U-arvo	Ero %	
Ulkoseinä 1	0,19	0,18	-5 %	
Ulkoseinä 2	0,19	0,26	37 %	
Ulkoseinä 3	0,19	0,18	-5 %	
Ulkoseinä 4	0,19	0,17	-11 %	
Ulkoseinä 5	0,19	0,21	11 %	

KOMMENTIT:
