

Akseli Romppainen

**YLÄPOHJAKORJAUKSIEN VAIKUTUKSET ENERGIATEHOK-
KUUTEEN**

YLÄPOHJAKORJAUKSIEN VAIKUTUKSET ERENGIATEHOK- KUUTEEN

Akseli Romppainen
Opinnäytetyö
Kevät 2020
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma, tuotantotekniikka

Tekijä: Akseli Romppainen
Opinnäytetyön nimi suomeksi: Yläpohjakorjauksien vaikutukset energiatehokkuuteen
Opinnäytetyön nimi englanniksi:
Työn ohjaaja: Kimmo Illikainen
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2020
Sivumäärä: 48 + 6 liitettä

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia yläpohjaan tehtävien korjauksien vaikutuksia energiakulutukseen vuonna 1976 valmistuneeseen puurakenteiseen omakotitaloon. Tarkoituksena oli saada selvyys eristeiden vaihdon ja ilmavuotokohtien tukkimisen hyödyistä.

Yläpohjan kuntoa ja vuotoja tutkittiin lämpökamerakuvauksen ja tiiveysmittauksen avulla. Rakennetta ja sen toimintaa tutkittiin Comsol Multiphysics –simulointiohjelmalla. Lämpöhäviölaskelmissa apuna käytettiin MathCad Prime –laskentaohjelmaa. Remontin vaikutuksia lämmitysenergian tarpeeseen ja ilmatiiviyteen tutkittiin mittaamalla rakennuksen ilmanvuotoluku ennen ja jälkeen remontin sekä teoreettisesti laskemalla rakenteen lämmöneristyskyvyn ja tiiviyden paranemisesta johtuva lämmitystarpeen pienentyminen. Uutena eristeenä käytettiin Ekovilla-puhallusvillaa ja tiivistämisessä Sitko Flex -tiivistysteippiä.

Tutkimuksessa saatiin tietoa yläpohjaan kohdistuvien korjaustoimenpiteiden vaikutuksista energiankulutukseen. Sekä laskennalliset että mitatut tulokset osoittivat, että pelkästään yläpohjaan tehtävällä energiaremontilla voidaan saavuttaa säästöjä lämmityskustannuksissa ja parantaa rakenteen rakennusfysikaalista toimintaa. Alkuperäinen rakennepiirustuksiin perustunut laskennallinen yläpohjan U-arvo parani 0,20 W:stä/m²K 0,09 W:iin/m²K eli yhteensä 55 %. Yläpohjan lämpöhäviö pieneni 65 % alkuperäisestä. Koko rakennuksen vaipan lämpöhäviöt pelkästään yläpohjaa korjaamalla pieneni 10 %. Ilmanvuotoluku n₅₀ parani 8,7 l:stä/h 6,6 l:een/h eli 24 % ja q₅₀ 7,0 m³:stä/m²h 5,3 m³:een/m²h, sekin 24 %. Laskelmien mukaan koko rakennuksen energiankulutus pieneni 2 241 kWh vuodessa. Laskennalliseksi takaisinmaksuajaksi remontille saatiin noin kymmenen vuotta sähkön hinnalla 0,11 €/kWh.

Asiasanat: energiatehokkuus, energiaremontti, ilmatiiviyys, yläpohja, ilmanvuotoluku

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Civil Engineering, House Building and Renovation

Author: Akseli Romppainen
Title of thesis: Effects of Ceiling Renovation on Energy Efficiency
Supervisor: Kimmo Illikainen
Term and year when the thesis was submitted: Spring 2020
Pages: 48 + 6 appendices

The subject of this thesis was to research the effects of a ceiling renovation on the energy consumption of a detached house built in 1976. The aim was to find out the benefits of replacing thermal insulation and blocking air leakage points.

The condition of the ceiling and the location of air leaks were studied by thermal imaging and measuring the air tightness. The structures were studied with the Comsol Multiphysics simulation program. Heat loss calculations were performed using MathCad Prime. The effects of the renovation on heating energy need and air tightness were studied by measuring the air leakage rate of the building before and after the renovation and calculating the reduction in the heating requirement due to the improved thermal insulation capacity and air tightness of the structure. Ekovilla blown loose wool was used as a new thermal insulation and air leakage points were blocked by Sitko Flex tape.

The research provided information on the effects of ceiling renovation on energy consumption. Both the computational and measured results showed that energy renovation on the ceiling alone can achieve savings in heating costs and improve the structural physics of the structure. The original U-value calculated from the structural drawings improved from 0,20 W/m²K to 0,09 W/m²K, 55 % overall. The heat loss of the ceiling was reduced by 65% from the original. The heat loss of the entire building was reduced 10 % by repairing only the ceiling. Airflow rate n_{50} improved from 8.7 1/h to 6.6 1/h, 24 %, and q_{50} from 7.0 m³/m²h to 5.3 m³/m²h, also 24 %. According to calculations the energy consumption of the whole building was reduced by 2 241 kWh per year.

Keywords: renovation, energy efficiency, air tightness

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS	5
1 JOHDANTO	6
2 LÄMMÖNSIIRTYMINEN RAKENTEESSA	7
2.1 Konvektio	7
2.2 Lämmönjohtuminen	10
2.3 Viivamaiset kylmäsillat	12
2.4 U-arvo	13
2.5 Kosteuden siirtyminen diffuusiolla ja konvektiolla	14
2.5.1 Vesihöyryä läpäisemätön rakenne	15
2.5.2 Dynaaminen rakenne	15
3 YLÄPOHJAN ENERGIAKORJAUS	18
3.1 U-arvojen ja eristepaksuuksien kehitys	18
3.2 Yläpohjan eristevaihto ja tiivistyskorjaukset	20
4 LÄMPÖKUVAUS JA TIIVIYSMITTAUS	22
4.1 Lähtötiedot	22
4.2 Lämpökuvaus ja tiivysmittaus ennen remonttia	22
4.3 Ilmanvuotokohdat	25
4.4 Yläpohjan korjaukset	29
4.5 Lämpökuvaus ja tiivysmittaus remontin jälkeen	33
4.6 Ilmanvuotokohtien uudelleen kuvaus	34
5 LASKENNALLINEN TARKASTELU	36
5.1 Simulointi	36
5.2 Lämpöhäviöt	38
5.2.1 Laskennallinen lämpöhäviö ennen remonttia	39
5.2.2 Remontin vaikutus lämpöhäviöihin	40
6 YHTEENVETO	43
LÄHTEET	45
LIITTEET	48

1 JOHDANTO

Suomen rakennuskannasta suurin osa on yksikerroksisia pientaloja. Näistä 57 % on rakennettu vuonna 1970 tai sen jälkeen. Viime vuosikymmenen puolella voimassa olleet rakennusmääräykset ja -tavat eivät monelta osin vastaa nykyaikaisia vaatimuksia. Tästä syystä pientaloissa on runsaasti korjaustarvetta. Yksi merkittävä asia, johon aiemmilla vuosikymmenillä ei ole osattu kiinnittää huomiota riittävästi, on energiatehokkuus.

Tämän työn tavoitteena on selvittää vuonna 1976 rakennetun yksikerroksisen omakotitalon yläpohjan eristevaihdon ja tiiviyskorjauksien vaikutuksia energiankulutukseen. Tutkimus suoritetaan kohteeseen tehtäviä mittaustuloksia analysoimalla sekä teoreettista laskentaa apuna käyttäen.

Työssä tehdään lämpökamerakuvauksia ja tiiviysmittauksia ennen sekä jälkeen remontin ja niiden perusteella tutkitaan rakennusten lämpöhäviöitä. Lopuksi mittaustuloksiin ja teoreettisiin laskelmiin perustuen laaditaan remonteista vaikuttavuusanalyysi.

Työn tilaajana toimii keräyspaperipohjaisia orgaanisia lämmöneristeitä valmistava ja asentava Ekovilla Oy. Yrityksen tuotteisiin kuuluvat puhalluseristeet, levyeristeet, ilmatiiviystuotteet ja asfalttikuitu. Ekovilla kuuluu EcoUp-nimiseen suomalaiseen eristealan kiertotalouskonserniin, joka valmistaa ja uusiokäyttää erityyppisiä eristeitä sekä kehittää kiertotalouteen liittyvää teknologiaa. EcoUp työllistää yli 100 henkeä ja konserniin kuuluvat Ekovilla ja Eko-Expert ovat alansa tunnetuimpia toimijoita Suomessa. EcoUp tuottaa vuosittain tuhansia kokonaisvaltaisia, ympäristöystävällisiä eristysasennuksia sekä ylä- ja alapohjasaneerauksia asiakkailleen. Yrityksen palveluvalikoimaan kuuluvat myös suurtehoimurintipalvelut sekä leca-sora- ja vaahtolasitoimitukset.

2 LÄMMÖNSIIRTYMINEN RAKENTEESSA

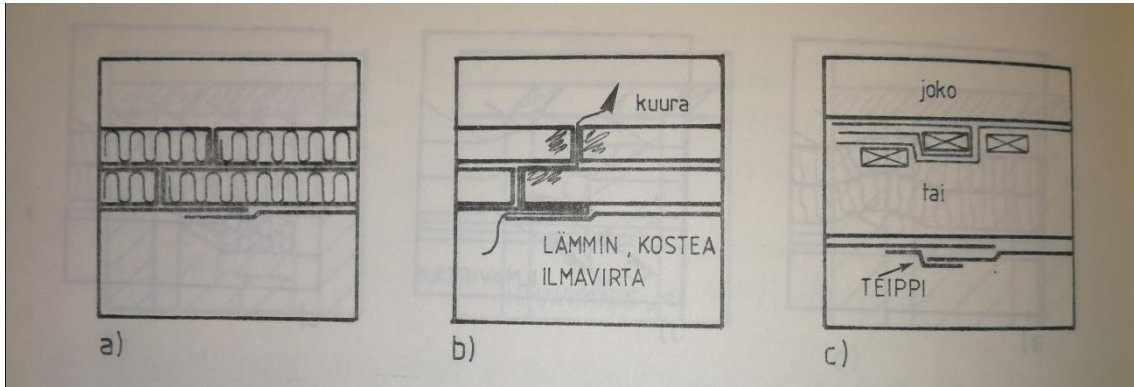
Lämpöenergiaa voi siirtyä rakenteessa kolmella eri tavalla: johtumalla, konvektiolla tai säteilemällä. Luvuissa 2.1 – 2.2 käsitellään tämän työn kannalta oleelliset siirtymismuodot, jotka ovat konvektio ja lämmönjohtuminen. (1.)

2.1 Konvektio

Konvektiossa lämpöenergiaa siirtyy paikasta toiseen ilmavirran mukana. Konvektio voi olla luonnollista eli lämpö siirtyy lämpötilaeroista johtuvien tiheyserojen seurauksena tai pakotettua eli tuulen tai puhaltimen synnyttämää. Yläpohjarakenteessa konvektiota voi esiintyä molemmissa muodoissa. Konvektio heikentää rakenteen lämmöneristävyyttä eli lisää rakennuksen lämpöhäviöitä. (2, s. 4.)

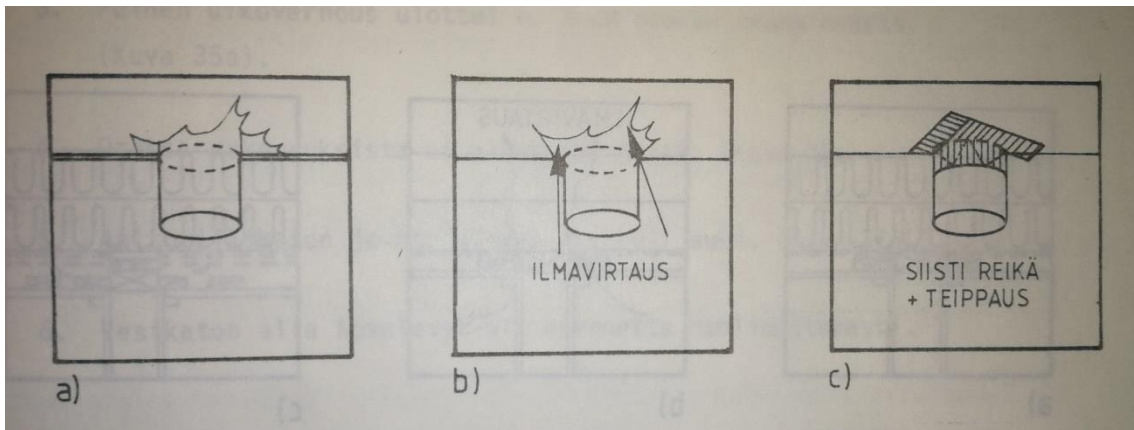
Eri yläpohjaeristeiden herkkyyttä konvektiolle tutkittiin COMBI-hankkeessa vuonna 2018. Tutkimuksissa havaittiin, että tiheä puukuitupuhallusvilla oli vähemmän herkkä eristeen sisäiselle konvektiolle kuin harvempi lasipuhallusvilla. Etenkin yläpohjan runsas tuuletus aiheutti lasivillassa voimistunutta sisäistä konvektiota. Tämän tutkimuksen pohjalta voidaan olettaa, että vaihtamalla yläpohjaeristeet puukuitupuhallusvillaan voidaan pienentää eristeen sisäisten konvektion aiheuttamia lämpöhäviöitä yläpohjassa. (2, s. 18.)

Vanhoissa rakennuksissa on usein puutteita höyryn- tai ilmansulun asennuksissa. Höyryn- tai ilmansulku on käytännössä voitu ainoastaan limittää kunnollisten teippien puuttuessa ja limityksenkään tärkeyttä ei ole aina ymmärretty. Nykyisten ohjeiden mukaan höyryn- tai ilmansulku on limitysten lisäksi teipattava huolellisesti. (3, s. 28.) (Kuva 1.)



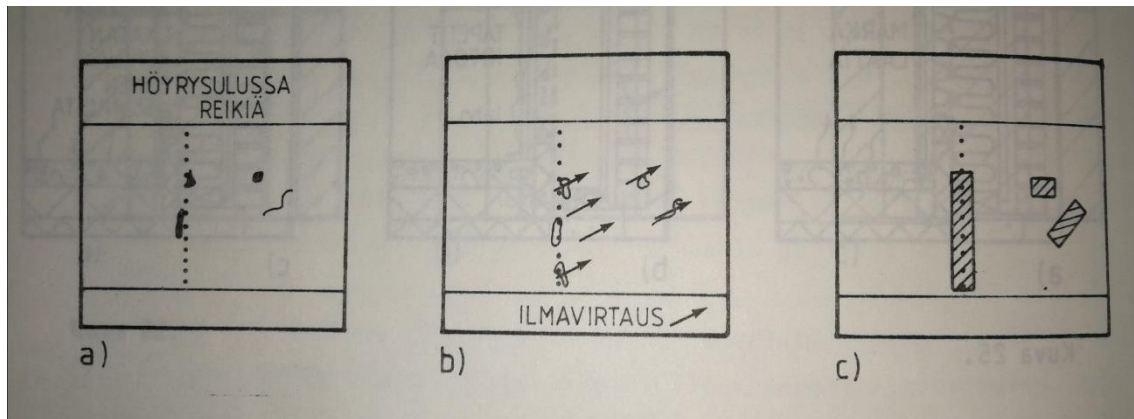
KUVA 1. Ilmavirran kulkeutuminen rakenteeseen limitysten välistä (4, s. 34)

Höyryn- tai ilmansulut on myös asennettu huolimattomasti ja niihin on esimerkiksi sähköasennuksien ja muiden läpivientien yhteydessä puhkottu reikiä ja läpivienit on jätetty tiivistämättä (kuva 2).



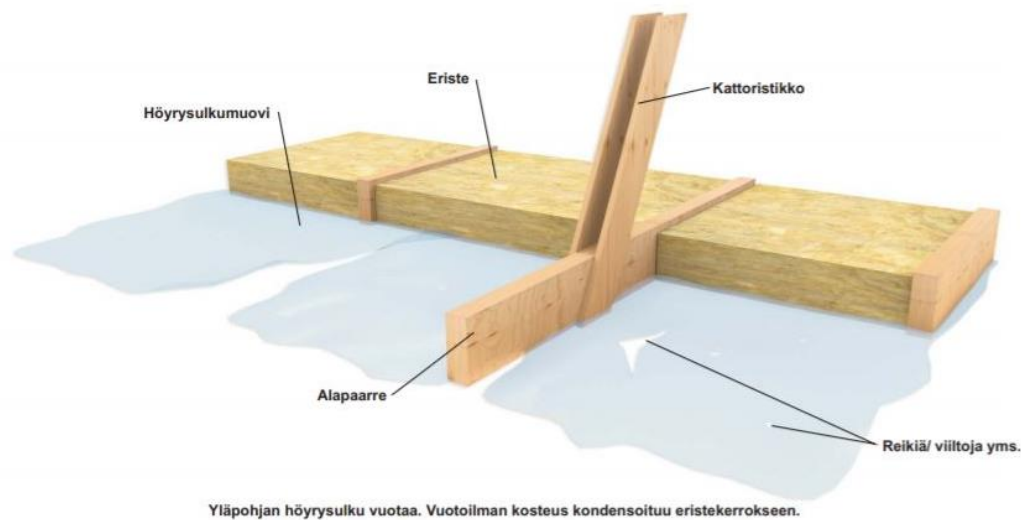
KUVA 2. Ilmavirran kulkeutuminen tiivistämättömien läpivientien kautta (4, s. 35)

Höyryn- tai ilmansulussa olevan reiän kautta huoneilma pääsee virtaamaan rakenteeseen vapaasti vieden lämpöenergiaa ilmavuodon mukana (kuva 3).



KUVA 3. Ilmavirran kulkeutuminen höyryn- tai ilmansulun reikien läpi (4, s. 34)

Rakennuksen ollessa alipaineinen rakenteen sisällä olevat epäpuhtaudet pääsevät kulkeutumaan sisäilmaan, jos rakenne on epätiivis. Lisäksi rakenteen sisällä virtaava kylmä ulkoilma voi alentaa sisäpinnan lämpötilaa ja aiheuttaa rakenteeseen kondenssiriskin. (1; 3, s. 28.) (Kuva 4.)



KUVA 4. Yläpohjan höyryn- tai ilmansulun vuodot (5, s. 93)

Rakennuksen vaipan läpi konvektion seurauksena virtaavan vuotoilman lämpöhäviö saadaan laskettua Ympäristöministeriön asetuksessa 1010/2017 ja Suomen rakentamismääräyskokoelmassa rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskentaa koskevan ohjeen mukaan kolmella kaavalla. Vaipan läpi virtaavaan vuotoilmaan kuluva lämpöenergia lasketaan kaavalla 1. (6, s. 9.)

$$Q_{vuotoilma} = H_{vuotoilma}(T_s - T_u)\Delta t / 1\,000 \quad \text{KAAVA 1}$$

$Q_{vuotoilma}$ = vuotoilman lämmityksen tarvitsema energia (kWh)

$H_{vuotoilma}$ = vuotoilman ominaislämpöhäviö (W/K)

T_s = sisäilman lämpötila (°C)

T_u = ulkoilman lämpötila (°C)

Δt = ajanjakson pituus (h)

1 000 = kerroin, jolla suoritetaan laatumuunnos kilowattitunneiksi

Rakennuksen vuotoilman ominaislämpöhäviö lasketaan kaavalla 2 (8, s. 12).

$$H_{vuotoilma} = \rho_i c_{pi} q_{v,vuotoilma} \quad \text{KAAVA 2}$$

$H_{vuotoilma}$ = vuotoilman ominaislämpöhäviö (W/K)

ρ_i = ilman tiheys (1,2 kg/m³)

c_{pi} = ilman ominaislämpökapasiteetti (1 000 Ws/kgK)

$q_{v,vuotoilma}$ = vuotoilmavirta (m³/s)

Vaipan läpi virtaava vuotoilmavirran määrä lasketaan kaavalla 3 (8, s. 9).

$$q_{v,vuotoilma} = \frac{q_{50}}{3600 \cdot x} A_{vaippa} \quad \text{KAAVA 3}$$

$q_{v,vuotoilma}$ = vuotoilmavirta (m³/s)

q_{50} = rakennusvaipan ilmanvuotoluku (m³/hm²)

A_{vaippa} = rakennusvaipan pinta-ala (m²)

x = kerroin, joka on yksikerroksisille rakennuksille 35, kaksikerroksisille 24, kolmi- ja nelikerroksisille 20 ja viisikerroksisille ja sitä korkeammille 15

3 600 = kerroin, joka muuttaa ilmavirran m³/h yksiköstä m³/s yksikköön

2.2 Lämmönjohtuminen

Lämmönjohtumisessa lämpöenergiaa siirtyy liike-energiana molekyylistä toiseen korkeammasta lämpötilasta kohti matalampaa lämpötilaa pyrkien tasoittumaan väliaineessa. Materiaalien lämmönjohtavuus ilmaistaan λ -arvona, jonka yksikkö on W/(mK). Materiaalin lämmöneristyskyky on sitä parempi, mitä pienempi sen

lämmönjohtavuusarvo on. Lämmönjohtavuus ja siirtyvä lämpöenergia ovat keskenään suoraan verrannolliset eli lämmönjohtavuuden puolittuessa siirtyvän lämpöenergian määrä puolittuu myös. Koko rakennusosan lämmöneristävyys vaikuttavat siis oleellisesti lämmöneristekerroksen lämmönjohtamiskyky sekä eristekerroksen paksuus. Lämmönjohtuminen on rakenteissa tapahtuvista lämmön-siirtymismuodoista keskeisin. (1.)

Rakennuksen vaipan läpi johtuva lämpöenergian määrä saadaan laskemalla yhteen rakennusosien lämpöhäviö ja rakennusosien välisten liitosten aiheuttamien kylmäsiltojen lämpöhäviö. Ulkoilmaan rajoittuvien rakennusosien lämpöhäviöt lasketaan kaavalla 4. (6, s. 16.)

$$Q_{rakosa} = \sum U_i A_i (T_s T_u) \Delta t / 1\ 000 \quad \text{KAAVA 4}$$

Q_{rakosa} = johtumislämpöhäviö rakennusosan läpi (kWh)

U_i = Rakennusosan lämmönläpäisykerroin (W/m²K)

A_i = Rakennusosan pinta-ala (m²)

T_s = sisäilman lämpötila (°C)

T_u = ulkoilman lämpötila (°C)

Δt = ajanjakson pituus (h)

1 000 = kerroin, jolla suoritetaan laatumuunnos kilowattitunneiksi

Tarkasteltavan liitoksen viivamainen lisäkonduktanssi ψ lasketaan kaavalla 5 (7, s. 13).

$$\psi = L2D - U_1 * L_1 - U_2 * L_2 \quad \text{KAAVA 5}$$

ψ = rakenneosien liitoksen viivamainen lisäkonduktanssi (W/mK)

$L2D$ = kaksiulotteisella (2D) laskennalla numeerisesti määritetty lämpötekninen kytkentäkerroin tarkasteltavalle liitokselle ja liittyville rakennusosille (W/mK)

U = rakennusosan lämmönläpäisykerroin (W/m²K)

L = rakenneosan pituus (m)

Liitoksen kylmäsiltojen aiheuttama lisäys lämpöhäviöön lasketaan kaavalla 6 (6, s. 28).

$$Q_{\text{kylmäsillat}} = \sum l_k \psi_k (T_s * T_u) \Delta t / 1\,000$$

KAAVA 6

$Q_{\text{kylmäsillat}}$ = johtumislämpöhäviö kylmäsillojen läpi (kWh)

l_k = viivamaisen kylmäsillan pituus (m)

ψ_k = rakenneosien liitoksen viivamainen lisäkonduktanssi (W/mK)

T_s = sisäilman lämpötila (°C)

T_u = ulkoilman lämpötila (°C)

Δt = ajanjakson pituus (h)

1 000 = kerroin, jolla suoritetaan laatumuunnos kilowattitunneiksi

2.3 Viivamaiset kylmäsillat

Ongelmia rakenteissa ja rakenteiden liitoksissa voivat aiheuttaa myös muuta rakennetta huomattavasti enemmän lämpöä johtavat kohdat eli kylmäsillat. Viivamaisen kylmäsillan, kuten seinän yläjuoksun, aiheuttama lisäys rakennusosien lämpövirtaan saadaan laskettua viivamaisen lisäkonduktanssin avulla. Viivamaisen lisäkonduktanssin laskentaoppaassa on esitetty vertailuarvoja rakennusosien välisien liitosten konduktansseille. (7, s. 11.) (Taulukko 1.)

TAULUKKO 1. Ylä-, väli- ja alapohjan liitos ulkoseinään (6, s. 11)

Ulkoseinän runkomateriaali	Lisäkonduktanssi Ψ_k , W/(mK)									
	Yläpohjan runkomateriaali			Väli- pohjan runkomateriaali			Alapohjan runkomateriaali			
	betoni	kevyt- betoni	puu	betoni	kevyt- betoni	puu	betoni maan- vast.	betoni ryöm- tila	kevyt- betoni ryöm- tila	puu ryöm- tila
betoni	0,08		0,04	0,00			0,24	0,28		
kevytbetoni	0,18	0,06	0,04	0,10	0,00		0,09	0,08	0,03	
kevytsorabetoni	0,13		0,04	0,07			0,15	0,11		
tiili	0,08		0,04	0,00			0,17	0,06		
puu			0,05			0,05	0,10			0,06
hirsi			0,04			0,00	0,11			0,09

Viivamainen lisäkonduktanssin aiheuttama lämpöhäviö saadaan määritettyä, kun tiedetään liittyvien rakennusosien U-arvot, liitoksen pituus ja lämpötekninen kytkentäkerroin L2D. L2D-kerroin tarkoittaa rakenteen läpäisevää lämpövirtaa, joka aiheutuu rakenteen eripuolilla vallitsevien olosuhteiden lämpötilaerosta. (7, s. 6.)

2.4 U-arvo

Rakenteen lämmöneristävyyttä kuvaa U-arvo eli lämmönläpäisykerroin. Lämmönläpäisykertoimella tarkoitetaan lämpövirran tiheyttä, joka jatkuvuustilassa läpäisee rakennusosan, kun lämpötilaero rakennusosan eri puolilla olevien ilmatilojen välillä on yksikön suuruinen. Lämmönläpäisykertoimen yksikkö on SI-järjestelmän mukainen W/m²K. (8, s. 2.)

Rakennusosan lämmönläpäisykerroin on rakennusosan kokonaislämmönvastuksen R_T käänteisluku, joka lasketaan kaavalla 7 (9, s. 5).

$$U = \frac{1}{R_T} \quad \text{KAAVA 7}$$

U = rakennusosan lämmönläpäisykerroin (W/m²K)

R_T = rakennusosan kokonaislämmönvastus (m²K/W)

Lämpö voi johtua rakennusosan sisällä usean ainekerroksen läpi. Ainekerrokset voivat poiketa toisistaan paksuudeltaan ja lämmönjohtavuudeltaan. Yksittäisen ainekerroksen lämmönvastus lasketaan kaavalla 8. (9, s. 5.)

$$R = \frac{d}{\lambda_U} \quad \text{KAAVA 8}$$

R = ainekerroksen lämmönvastus (m²K/W)

d = ainekerroksen paksuus (m)

λ_U = ainekerroksen lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo (W/mK)

Peräkkäisten ainekerrosten muodostaman rakennusosan kokonaislämmönvastus lasketaan kaavalla 9 (9, s. 5).

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} \quad \text{KAAVA 9}$$

R_T = rakennusosan kokonaislämmönvastus (m²K/W)

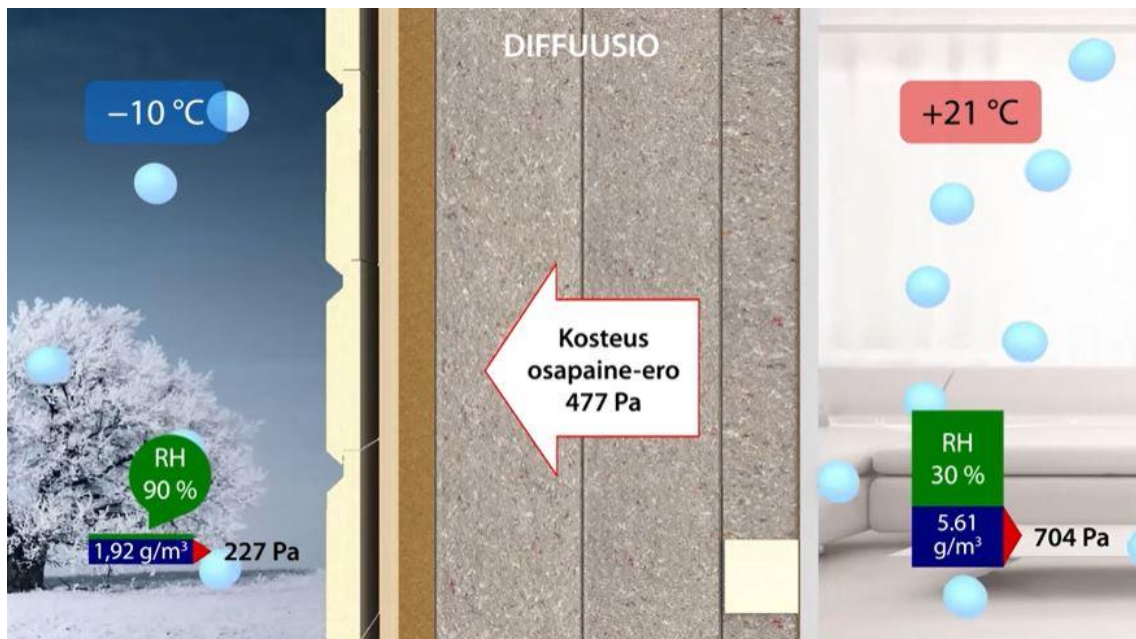
R_{si} = sisäpuolen pintavastus (m²K/W)

R_1, R_2, \dots, R_n = rakennusosan ainekerrosten lämmönvastukset ($\text{m}^2\text{K/W}$)

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

2.5 Kosteuden siirtyminen diffuusiolla ja konvektiolla

Vesihöyryn diffuusiossa huoneilman sisältämä kosteus pyrkii tasoittumaan rakennekerrosten eri puolilla vallitsevan osapaine-eron seurauksena. Lämmin ilma sisältää yleensä enemmän kosteutta kuin kylmä ilma. Tästä syystä kulkusuunta on talvella sisältä ulospäin. (10; 11.) (Kuva 5.)



KUVA 5. Vesihöyryn siirtyminen diffuusiolla talvella (11)

Kesällä ulkolämpötilan kohotessa korkeaksi kulkusuunta voi olla myös ulkoa sisälle päin (kuva 6). Osapaine pyrkii aina tasoittumaan kohti matalampaa pitoisuutta. Vesihöyryn konvektiossa vesihöyryä siirtyy ilmavirran mukana. Vesihöyryn hallitsematon kulkeutuminen rakenteeseen pyritään estämään höyrynsulkumuovilla, ilmansulkupaperilla tai erilaisilla älykalvoiksikin kutsutuilla kosteussuuluilla. Höyryn- tai ilmansulun S_d -arvo kertoo, kuinka paksua ilmakerrosta aine tai tuote vastaa diffuusionvastukseltaan. (10; 11.)



KUVA 6. Vesihöyryn siirtyminen diffuusiolla kesällä (11)

2.5.1 Vesihöyryä läpäisemätön rakenne

Hallitsematon kosteuden kulkeutuminen rakenteeseen pyritään estämään höyrynsulkumuovilla rakennuksissa, joissa on käytetty eristeenä mineraalivillaa. Höyrynsulkumuovin diffuusiovastus S_d on noin 40 - 50 m. Oikeaoppisesti asennettuna se estää tehokkaasti kosteutta pääsemästä rakenteeseen konvektiolla tai diffuusiolla. Höyrynsulkumuovin sijasta voidaan myös käyttää esimerkiksi ilmansulkupaperia, kunhan saavutetaan sisä- ja ulkopinnan vesihöyrynvastusten suhteeksi 5/1. (10.)

Vesihöyryä voi päästä rakenteeseen haitallisia määriä, jos höyrynsulussa on puutteita. Ilmavirran mukana rakenteeseen pääsevä ylimääräinen kosteus tiivistyy vedeksi kohdatessaan kylmän ilman ja aiheuttaa rakenteeseen kosteusvaurioita. Rakenteeseen tiivistynyt kosteus heikentää rakenteen lämmöneristävyyttä ja luo otollisen kasvualustan mikrobeille, mistä voi aiheutua asukkaille vakavia terveyshaittoja. (3, s.10.)

2.5.2 Dynaaminen rakenne

Ilmansulkupaperia voidaan käyttää myös rakenteissa, joiden eristeenä on käytetty hygroskooppista materiaalia, kuten Ekovillaa. Ilmansulkupaperin tehtävänä

on estää konvektio eli ilmavirran vapaa kulkeutuminen rakenteeseen, mutta se sallii kuitenkin ilman sisältämän vesihöyryn tasaantumisen rakenteen läpi diffuusiolla. Dynaamisen rakenteen ilmansulkukerros sallii myös huoneilman epäpuhtauksiksi katsottavien kaasujen, kuten hiilidioksidin poistumisen diffuusion seurauksena samalla osapaine-eroista johtuvalla periaatteella kuin vesihöyryn diffuusiosta. Esimerkiksi Ekovilla X5 -ilmansulkupaperin diffuusiovastus S_d on 0,7 m. (11; 12, s. 9.)

Dynaamiseen eli hengittävään rakenteeseen liittyy paljon vääriä käsityksiä. Dynaamisen rakenteen läpi ei kulje ilma vaan ilmankosteus diffuusion seurauksena. Sisätiloissa tapahtuvat kosteuden muutokset voivat aiheuttaa nopeitakin muutoksia sisäilman kosteuspitoisuuksille. Dynaamisen eli hengittävän rakenteen etuna on ennen kaikkea sen kyky reagoida sitä ympäröiviin kosteuden vaihteluihin sitomalla itseensä kosteutta suuremmasta pitoisuudesta ja luovuttamalla sitä pienempää pitoisuutta kohti turvallisesti aiheuttamatta rakenteeseen kosteusteknisiä ongelmia. Tämä on kuitenkin mahdollista vain silloin kun rakennetta ei ole pinnoitettu suuren diffuusiovastuksen omaavilla pinnoitteilla. (11: 12, s. 9.)

Hengittävällä rakenteella on suuri tehollinen kosteuskapasiteetti. Tämä tarkoittaa sitä, että rakenteeseen siirtynyt kosteus ei tiivisty vedeksi vaan rakenteen ollessa hygroσκοoppisista materiaaleista rakennettu kosteus tasaantuu eristekuituihin hygroσκοoppisena kosteutena ja alentaa eristeessä kosteusosapainetta talvella ulospäin ja kesällä sisäänpäin mentäessä. Hengittävyys kuvaa siis ilman sisältämän kosteuden liikettä rakenteessa. (11; 12, s. 9.)

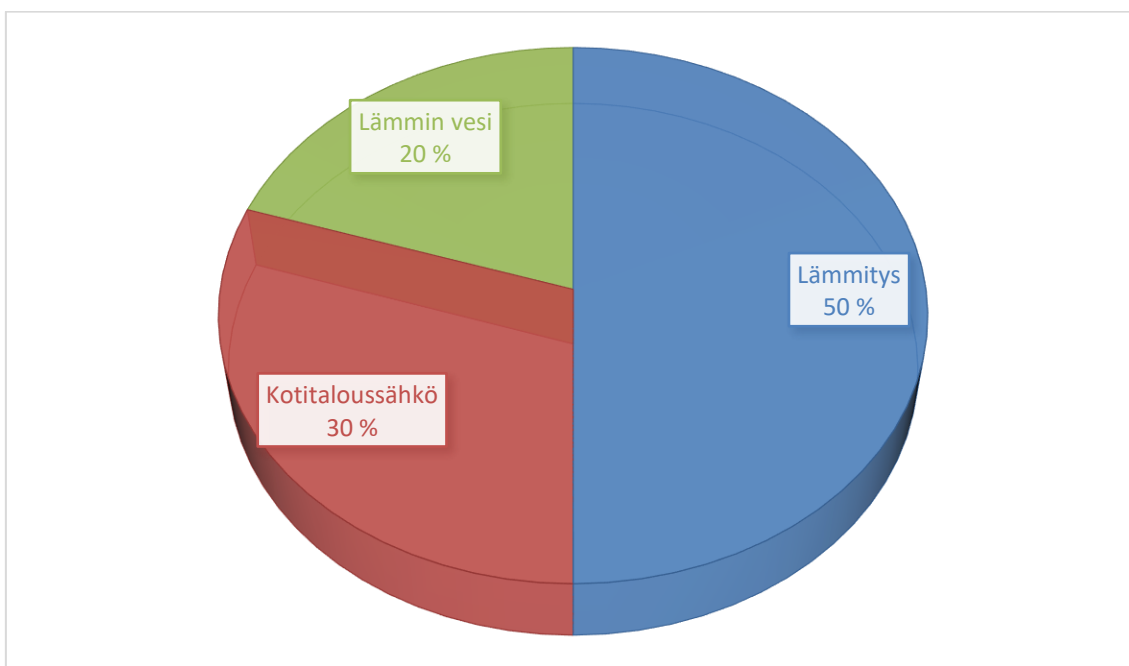
Hygroσκοoppisuudesta huolimatta rakenne on tehtävä yhtä ilmatiiviiksi kuin mikä tahansa muu rakenne, koska vuotoilman mukana kulkevat vesimäärät ovat paikallisesti erittäin suuria. Hygroσκοoppinen rakenne on myös paljon vikasietoisempi kuin ei-hygroσκοoppinen rakenne. Esimerkiksi äkillisesti vesikattoon tulleen reiän seurauksena yläpohjaeristeeseen vuotanut vesi sitoutuu hygroσκοoppiseen eristeeseen, josta se kosteusrasituksen loputtua vapautuu takaisin ulkoilmaan. Ei-hygroσκοoppisen eristeen kohdalla vesi valuisi eristekerroksen läpi lamikoituen höyrynsulkumuovin päälle aiheuttaen merkittäviä kosteusteknisiä ongelmia. (11; 12, s. 9.)

Höyrynsulkuna voidaan käyttää myös älykalvoja. Älykalvolla on kyky sopeutua ilman suhteellisen kosteuden mukaan muuttuvan diffuusiovastuksensa ansiosta. Talvella sisäilman kosteuden ollessa alhainen diffuusiovastus kasvaa suureksi estäen kosteuden siirtymistä rakenteeseen. Kesällä se sallii rakenteen kuivumisen päästämällä kosteutta ulkoa sisätiloihin. (13.)

3 YLÄPOHJAN ENERGIAKORJAUS

Suomen rakennuskantaan, johon ei lasketa kesämökkejä eikä myöskään maatalous- tai muita talousrakennuksia, kuului vuonna 2018 noin 1,5 miljoonaa rakennusta. Asuinrakennuksia, joista suurin osa on erillisiä pientaloja, oli koko rakennuskannasta 85 % ja näistä 60 % on rakennettu vuonna 1970 tai sen jälkeen. Vanhoja pientaloja on siis lukumääräisesti paljon ympäri Suomea. Aiemmillä vuosikymmenillä ei ole kiinnitetty riittävästi huomiota esimerkiksi energiatehokkuuteen ja siten asuinrakennuksissa on paljon tarvetta energiaremonteille. (14.)

Kokonaisenergiankulutuksesta rakennusten energiankulutuksen osuus on Suomessa yli 40 %. Tästä noin 50 % kuluu lämmitykseen (kuva 7). Energiaremontilla voidaan rahallisten säästöjen lisäksi myös pienentää asumisesta aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä. (3, s. 54.)

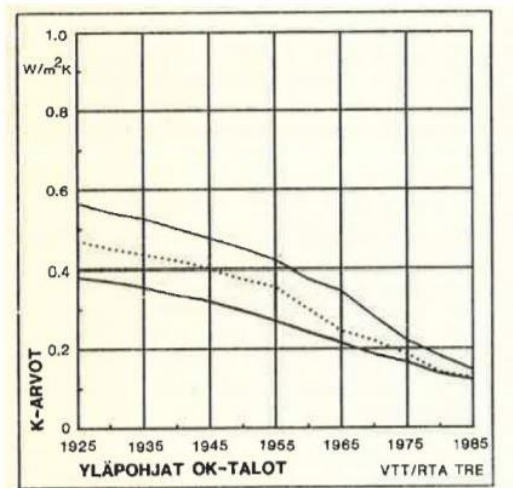


KUVA 7. Pientalon energiankulutus (3, s. 54)

3.1 U-arvojen ja eristepaksuuksien kehitys

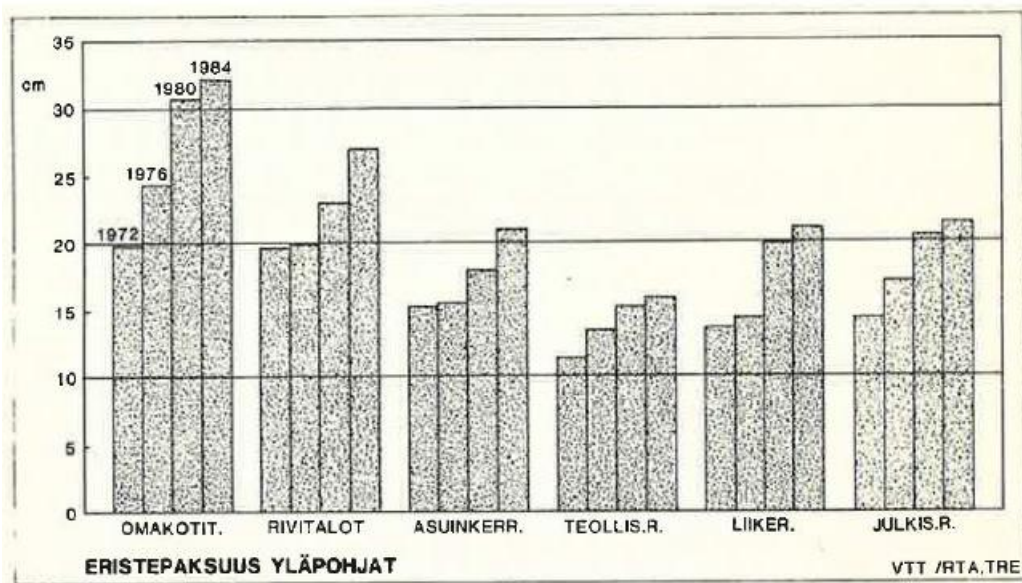
Rakennusosien U-arvoja on ohjailtu rakennusmääräyksillä ja niiltä edeltäneillä ohjeilla. Määräykset vuosilta 2010 ja 2012 määrittävät yläpohjan U-arvoksi 0,09 W/m²K. Aikaisempina vuosikymmeninä määräykset ovat sallineet merkittävästi

suuremman U-arvon. Esimerkiksi vuoden 1975 määräysten mukaan yläpohjan U-arvovaatimuksena (silloinen k-arvo) on 0,35 W/m²K ja 1985 0,22 W/m²K. (15, s. 8.) (Kuva 8.)



KUVA 8. Yläpohjien U-arvon (k-arvon) kehitys (15, s.14)

Yläpohjan U-arvoon vaikuttava suurin yksittäinen tekijä on eristekerroksen paksuus. Eristepaksuus on käytännössä kehittynyt sen mukana, kun vaatimukset rakenteen lämmöneristävydestä ovat tiukentuneet. 1970-luvun alkupuolella eristepaksuudet pientaloissa olivat hyvin pieniä, jopa alle 20 cm. (Kuva 9.)



KUVA 9. Yläpohjien eristepaksuuden kehitys (15, s. 15)

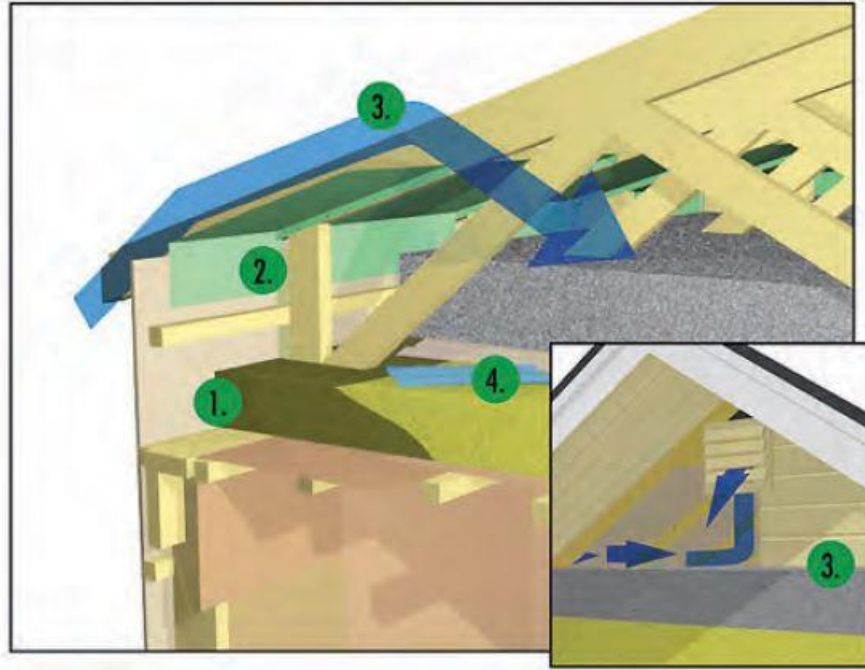
Eristepaksuudet, joilla saavutetaan nykyiset vaatimukset, ovat jopa tuplaantuneet 1970-luvun alusta. Esimerkiksi Ekovillalla eristetyn puurakenteisen suoran yläpohjan eristepaksuus on oltava vähintään 400 mm, jotta saavutetaan määräysten mukainen U-arvo 0,09 W/m²K. (16.)

3.2 Yläpohjan eristevaihto ja tiivistyskorjaukset

Rakennusten yläpohjan lisälämmöneristäminen on helppo ja nopea ratkaisu, jolla voidaan parantaa rakenteen lämmöneristyskykyä. Lisälämmöneristäminen tapahtuu poistamalla vanhan eristekerroksen päältä sinne kuulumattomat asiat, kuten jätteet sekä mahdollisesti pilaantuneet eristeet. Uusi eristekerros puhalletaan vanhan eristekerroksen päälle. (3, s. 55.) (Kuva 10.)

Lisäeristämisen yhteydessä voidaan myös tehdä korjauksia höyryn- tai ilmansulun tiiveyteen ylhäältä käsin käyttämällä vanhoja eristeitä pois esimerkiksi läpivientien kohdalta tai rakennuksen sisäpuolelta, mikäli kattoverhoilu on syystä tai toisesta pois paikaltaan. (3, s. 55.)

Tärkeä huomioitava asia lisäeristämisen yhteydessä on rakenteen riittävän tuuletuksen varmistaminen. Summittaisella lisäeristämisellä voidaan tahattomasti aiheuttaa rakenteeseen ongelmia, mikäli rakenteen läpi tuleva kosteus ei pääse tuulettumaan pois. Yläpohjan tuuletusta voidaan tehostaa myös koneellisesti, mutta tällöin on erityisesti varmistettava yläpohjan höyryn- tai ilmansulun kunto, sillä koneellinen tuuletus voi teoriassa aiheuttaa rakenteeseen pakotetun konvektion ja repii siten voimakkaammin sisäilmaa rakenteen läpi aiheuttaen rakenteeseen kosteusvaurioita. (3, s. 55.)



KUVA 10. Yläpohjan lisälämmöneristys (3, s. 55)

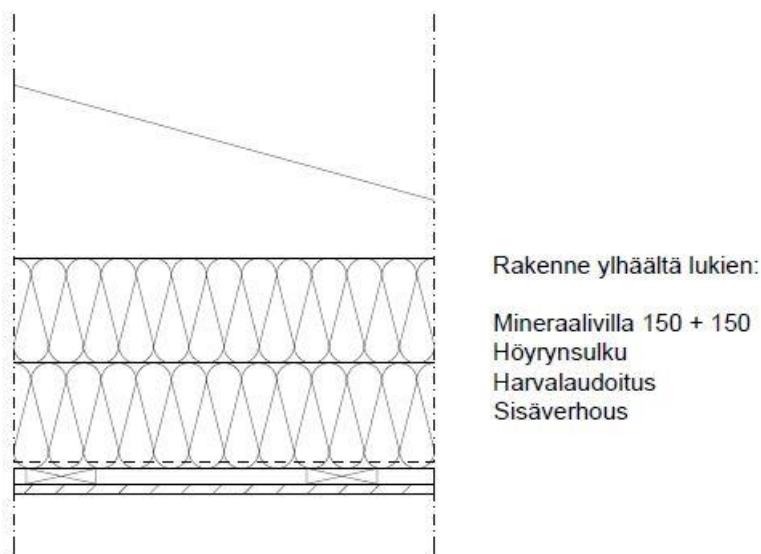
Yläpohjan eristevaihto on lähes samanlainen operaatio kuin lisäeristäminen. Käytännössä se eroaa vain siten, että vanha eriste poistetaan yläpohjasta kokonaan. Samalla voidaan tarkistaa koko yläpohjan kunto ja höyryn- tai ilmansulussa olevat puutteet on helppo havaita ja siihen tehtävät korjaukset on helppo toteuttaa. Vanhat eristeet voidaan poistaa joko käsin tai suurtehoimuria apuna käyttäen. (17.)

4 LÄMPÖKUVAUS JA TIIVIYSMITTAUS

Tutkimuksen kohteena oli vuonna 1976 rakennettu 1-kerroksinen omakotitalo Haukiputaalla. Kohteeseen suunniteltiin tehtäväksi yläpohjan eristeiden vaihto ja ilmanvuotokohtien korjaus. Ilmanvuotokohtia etsittiin lämpökamerakuvausten avulla. Lisäksi kohteeseen tehtiin ilmatiiviysmittaus. Mittaukset suoritettiin korkeissa RT 14-11239 ja RT 80-10974 esitettyjen ohjeiden mukaisesti.

4.1 Lähtötiedot

Mittausta ja muita tutkimuksia varten kohteesta hankittiin saatavilla olevat rakennuslupapiirustukset ja rakenneleikkaukset (liite 1). Näiden kuvien perusteella laskettiin mitattavan kohteen ilmatilavuus ja vaipan pinta-ala ilmanvuotoluvun q_{50} määrittelemistä varten. Piirustuksien mukaan rakennuksen yläpohjassa oli ennen remonttia mineraalivillaa 300 mm. (Kuva 11.)



KUVA 11. Hahmotelma alkuperäisestä yläpohjarakenteesta

4.2 Lämpökuvaus ja tiiviysmittaus ennen remonttia

Ensimmäinen lämpökamerakuvaus suoritettiin kohteeseen joulukuussa 2019. Ennen kuvausta asukasta ohjeistettiin poistamaan ikkunaverhot sekä siirtämään huonekalut metrin irti seinästä edellisenä päivänä ennen kuvausta. Lämpöku-

vauksessa keskityttiin erityisesti yläpohjaan, mutta etsittiin myös muita mahdollisia vuotokohtia. Mittausta ennen kohteessa peitettiin sisäpuolelta tiiviisti tulisijat ja kaikki rakennukseen tarkoituksellisesti ilmanvaihtoa varten tehdyt poistoilmakanavat teippiä ja muovia käyttäen (kuva 12).



KUVA 12. IV-poisto tukittuna

Myös kaikki ovet ja ikkunat suljettiin. Ilmatiivysmittausta varten asukasta kehoitettiin olemaan käyttämättä tulisijoja ainakin kaksi vuorokautta ennen mittausta, ettei tulisijojen peittäminen vaikeutuisi lämmön vuoksi (kuva 13).



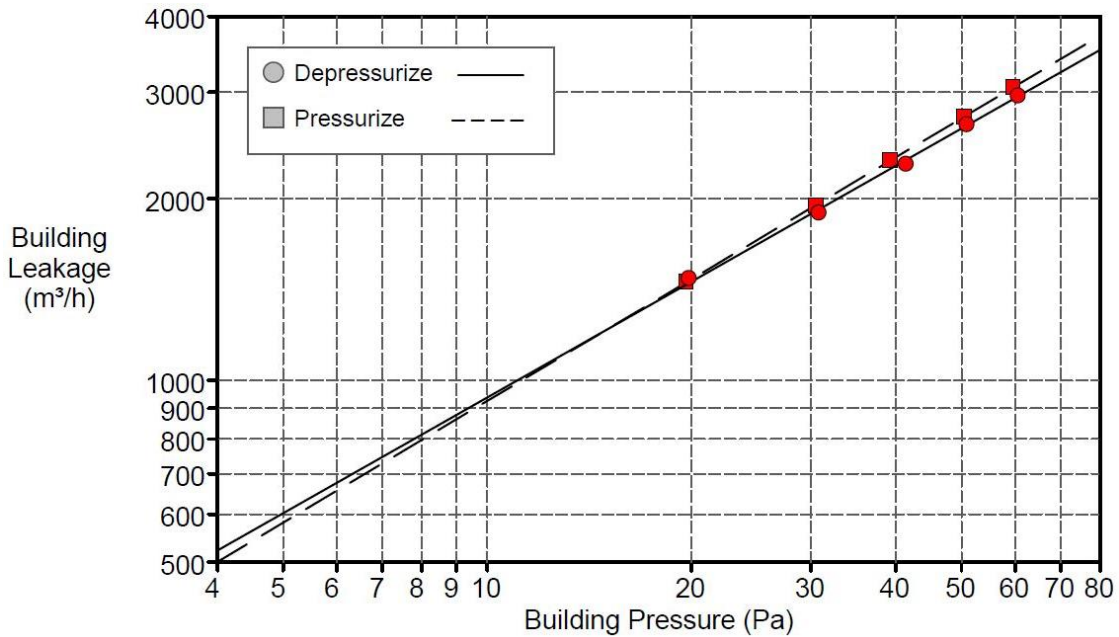
KUVA 13. Takka peitettynä ilmatiiviisti

Tutkimukset aloitettiin kirjaamalla rakennuksen tiedot ja mittausolosuhteet eli sisä- ja ulkolämpötilat ja tuulennopeus ylös raportointia varten. Lämpökamerakuvaukset tehtiin ensin normaalien käyttöolosuhteiden vallitessa. Kuvauksissa keskityttiin pääasiassa yläpohjaan, etenkin seinän ja yläpohjan liittymään. Lisäksi kuvattiin muitakin vuotokohtia, jotta voitaisiin paremmin arvioida yläpohjan lämpöhäviöiden vaikutusta kokonaisuuteen. Samat kuvaukset tehtiin myös 50 Pa:n alipaineessa, jolloin ilmavuotokohtat näkyivät kuvauksessa selkeämmin.

Rakennuksen ilmanvuotoluku määritettiin painekokeella, jossa asuntoon tuotettiin ulko-oviaukkoon asennetun puhaltimen avulla vähintään 50 Pa:n alipaine ja sitten 50 Pa:n ylipaine.

Painemittauslaite Minneapolis BlowerDoor DG-700 yhdistettiin tietokoneeseen, jossa oli mittalaitetta varten asennettu Tectite-mittausohjelma. Ohjelmalla mitattiin rakennuksen vaipan läpi virrannut ilmamäärä m^3/h . Ohjelmaan syötettiin ennen mittausta kohteen tiedot ja sääolosuhteet eli ulko- ja sisäilman lämpötilat sekä tuulennopeus. Rakennuksen sisälämpötila oli mittaushetkellä $22\text{ }^\circ\text{C}$, ulkolämpötila $3\text{ }^\circ\text{C}$ ja tuulennopeus noin 5 m/s .

Ennen varsinaista mittausta ohjelma mittasi aloituspaineen käyttöolosuhteissa, joka tässä kohteessa oli $-1,8\text{ Pa}$. Alkupaineen mittausta varten peitettiin puhallinaukko, jotta saatiin mitattua tuulen ja savupiippuvaikutuksen aiheuttama paineero. Tämän jälkeen aloitettiin varsinainen painekoe alipainemittauksella. Mittaus aloitettiin lähtöarvoksi asetetun 60 Pa :n paine-erolla ja eroa mitattiin 10 yksikköä kerrallaan aina 20 Pa :iin asti. Lopuksi mitattiin loppupaine puhallin peitettynä. Loppupaine oli $-1,5\text{ Pa}$ eli alle raja-arvon 5 Pa , joten mittaus voitiin hyväksyä. Mittausohjelma piirsi mitattujen arvojen pohjalta ilmanvuotokäyrän. Kohteen vuotoilman määrä rakennuksen vaipan läpi 50 Pa :n alipaineessa oli ilmanvuotokäyrän perusteella noin $2\ 600\text{ m}^3/\text{h}$ (kuva 14). Mittausohjelma laati mittauksesta myös raportin, josta käyvät ilmi tarkat mittaustulokset. (Liite 2.)



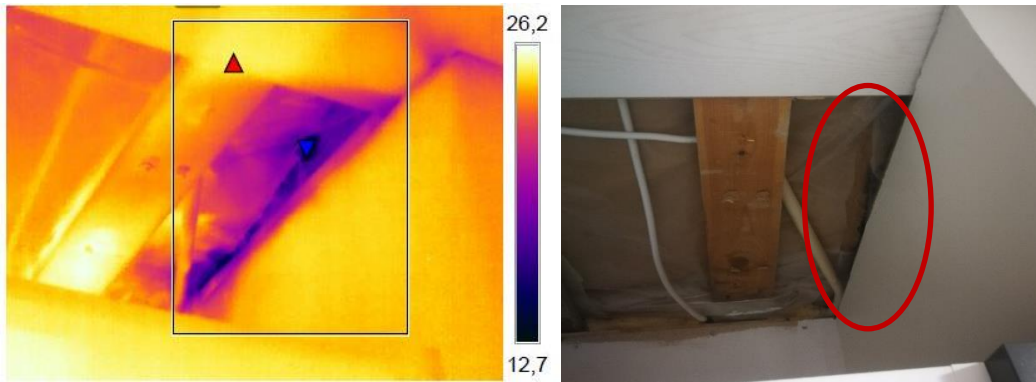
KUVA 14. Ilmanvuotokäyrät yli- ja alipaineessa

Mittausohjelma laski automaattisesti yli- ja alipainemittauksesta saatujen ilmanvuotolukujen keskiarvot. Rakennuksen ilmanvuotoluku n_{50} oli 8,7 1/h, joka on hyvin korkea arvo ilmanvuotoluvuksi mutta melko tyypillinen arvo 1970-luvulla rakennetuissa omakotitaloissa. Nykyään käytettävä tarkempi q_{50} -arvo oli hieman parempi $7,0 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$. Q_{50} -arvo on ollut käytössä vasta vuodesta 2012, joten vertailtaessa tuloksia muihin sen aikaisiin rakennuksiin voitiin käyttää ainoastaan n_{50} -arvoa. (Liite 2.)

4.3 Ilmanvuotokohdat

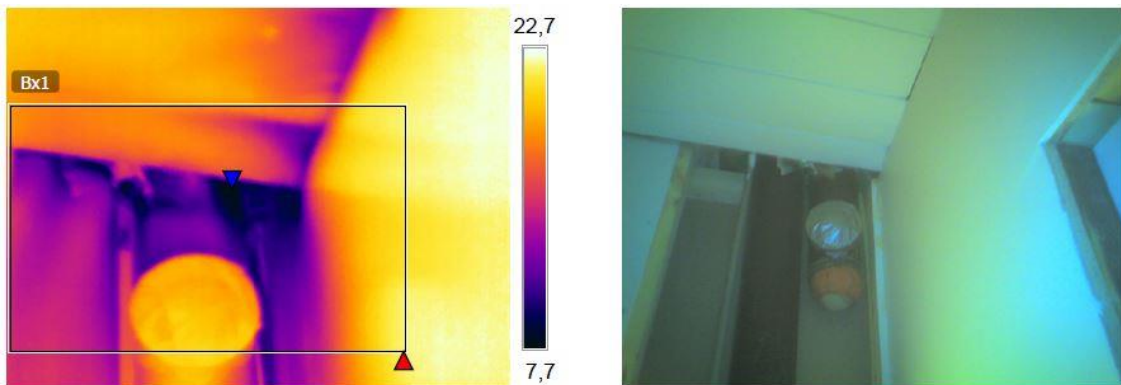
Lämpökuvauksessa havaittiin rakennuksen vaipassa olevan ilmanvuotokohtia oletetun paljon, mitkä painoutuivat erityisesti rakennusosien liitoksiin. Lisäksi vuotoja löytyi läpivienneistä.

Katon sisäverhoilu puuttui osittain keittiöstä, josta voitiin havaita höyrynsulun olleen ainoastaan limitetty, kuten 1970-luvulla oli tapana. Lisäksi limityksen vieressä höyrynsulussa havaittiin suuri halkeama, josta ilmaa pääsi vapaasti virtaamaan yläpohjarakenteeseen. (Kuva 15.)



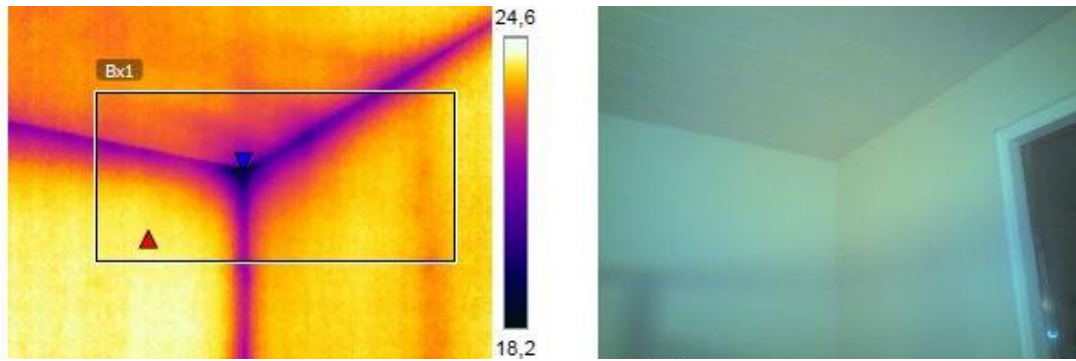
KUVA 15. Alipainekuva keittiön höyrynsulun halkeamasta

Toinen suuri ilmanvuotokohta löytyi wc:stä. Viemärintuuletusputken läpiviennin tiivistäminen oli tehty puutteellisesti, mikä näkyi erittäin selkeästi alipaineessa kuvattuna. (Kuva 16.)



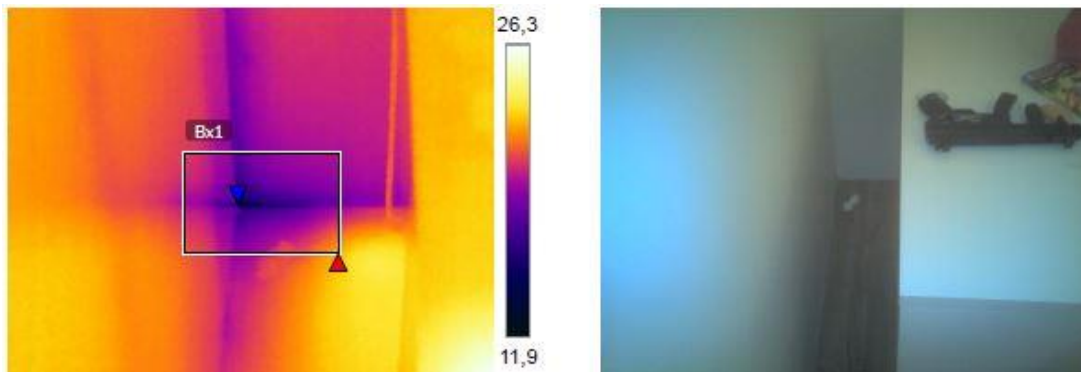
KUVA 16. Alipainekuva wc:n ilmanvuodosta

Rakenteiden liittymien suurimmat vuotokohdat olivat rakennuksen alanurkissa. Yläpohjan ja seinän väliset liitokset olivat lämpötilaindeksillä mitattuna hyvät eli $TI > 70\%$ (kuva 17), mutta ympäröiviin lämpötiloihin verratessa liitoskohdat olivat selvästi kylmempiä.



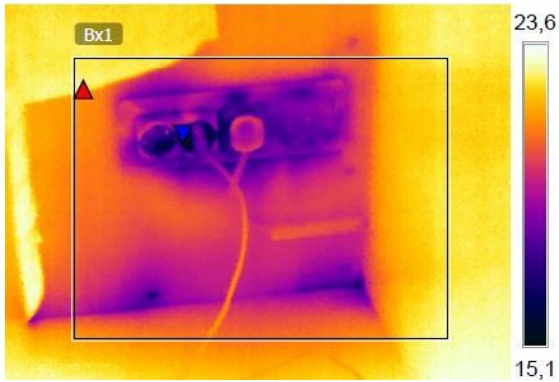
KUVA 17. Ylänurkka käyttöolosuhteissa TI > 70 %

Alapohjan ja seinän nurkkaliitokset olivat heikoimmin toteutetut rakennusosien liitokset lämpökamerakuvauksen perusteella. Lämpötilaindeksillä mitattuna osa nurkista oli alle huonoimman tason eli TI < 61 %. (Kuva 18.)



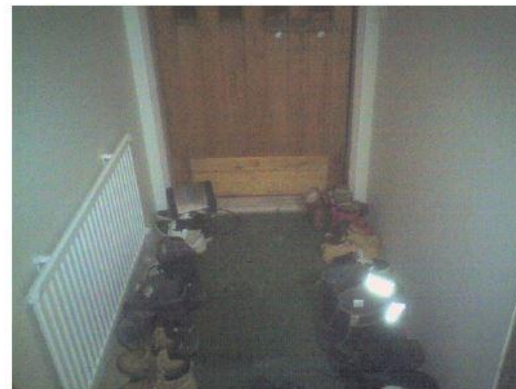
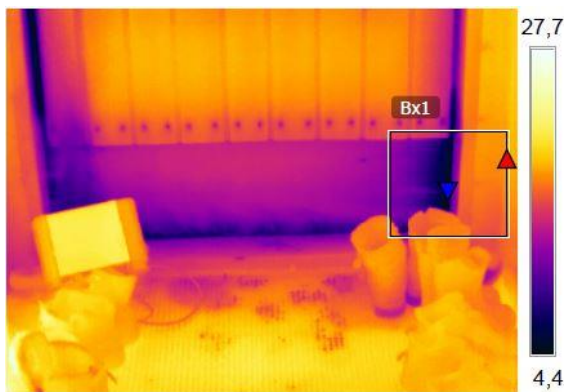
KUVA 18. Alanurkka käyttöolosuhteissa TI < 61 %

Lisäksi vuotoja löytyi pistorasioista. Pistorasian ilmanvuodon aiheutti höyrynsulku muovin sijoittaminen suoraan seinän pintalevytyksen taakse, jolloin rasian asennuksessa on tullut höyrynsulkuun väistämättä reikä. (Kuva 19.)



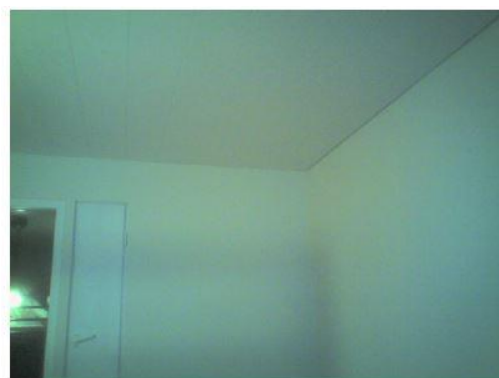
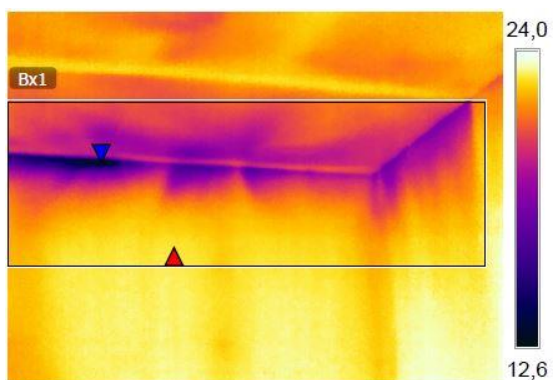
KUVA 19. Pistorasian ilmanvuoto

Suurimmat yksittäiset ilmanvuodot löytyivät molemmista ulko-ovista. Ovien ilmanvuodon aiheutti tiivisteiden puutteellisuus (kuva 20).



KUVA 20. Ulko-oven ilmanvuoto

Alipaineessa otetuissa lämpökuvissa kaikkien nurkkien ja liitoksien vuodot korostuivat selkeästi (kuva 21).



KUVA 21. Yläpohjan ja seinän liitoksen ilmanvuoto alipaineessa

4.4 Yläpohjan korjaukset

Yläpohjaan tehtiin maaliskuussa 2020 eristeiden vaihto ja höyrynsulun tiivistys. Tässä kohteessa oli sovittu, että asukas poistaa vanhat eristeet itse ja Ekovilla tekee tiivistyskorjaukset ja puhalttaa vanhojen eristeiden tilalle uudet.

Korjaustoimenpiteet aloitettiin poistamalla vanhat mineraalivillalevyt. Vanhoissa eristeissä näkyi selkeästi mustumista, mikä voi olla merkki suurien ilmavuotojen aiheuttamasta biologisesta turmeltumisesta. Kattoristikot olivat säilyneet kuitenkin hyväkuntoisina. Pelkillä levyillä toteutettu eristys ja nykymittapuilla vähäinen eristepaksuus olivat luultavasti sallineet puurakenteisiin kohdistuneen korkean kosteuskuorman tuulettumisen ja siirtymisen ulkoilmaan. Pahimmassa tapauksessa suuret ilmavuodot olisivat voineet aiheuttaa vaurioita myös kattoristikoihin. (Kuva 22.)



KUVA 22. Vaurioitunut mineraalivillalevy

Eristeiden poistamisen jälkeen teipattiin höyrynsulun limitykset ja muut vuotokohdat Sitko Flex -tiivistysteipillä (kuva 23). Teippauskohdat puhdistettiin pölyä hyvin sitovalla kuitukankaalla.



KUVA 23. Höyrinsulun limitys

Kuten lämpökuvauksessa havaittiin, kaikki läpiviennit oli tehty puhkaisemalla vain reikä höyrinsulkumuoviin ilman tiivistystoimenpiteitä. Myös sähkökaapeleita oli viety läpi yläpohjan höyrinsulusta huolimattomasti. (Kuva 24.)



KUVA 24. Viemärintuuletusputken läpivienti

Ensimmäisellä kuvauskerralla havaittu keittiön höyrynsulun halkeama ei ollut laatuvaan vaan muitakin halkeiluja ja suuria viiltoja sekä reikiä löytyi koko yläpohjan alueelta. Yhteensä 100 mm leveää tiivistysteippiä kului yli 60 m. (Kuva 25; Kuva 26.)



KUVA 25. Halkeama höyrynsulussa keittiön kohdalla

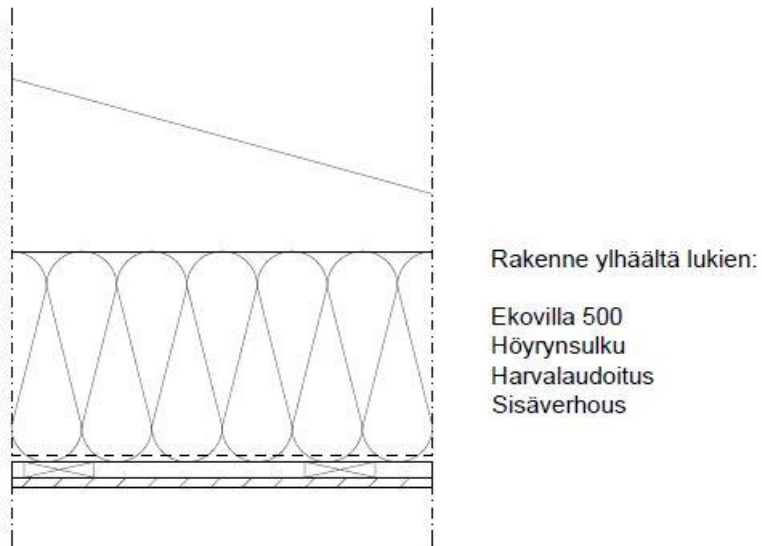


KUVA 26. Halkeama höyrynsulussa

Kun höyrynsulussa olleet vuotokohdat saatiin kauttaaltaan teipattua umpeen, yläpohjaan puhallettiin uudeksi eristeeksi Ekovilla-puhallusvillaa 500 mm. Samalla varmistettiin reuna-alueilta, että yläpohjarakenne pääsee tuulettumaan vapaasti. (Kuva 27; Kuva 28.)



KUVA 27. Yläpohjaan puhallettu Ekovilla-puhallusvilla

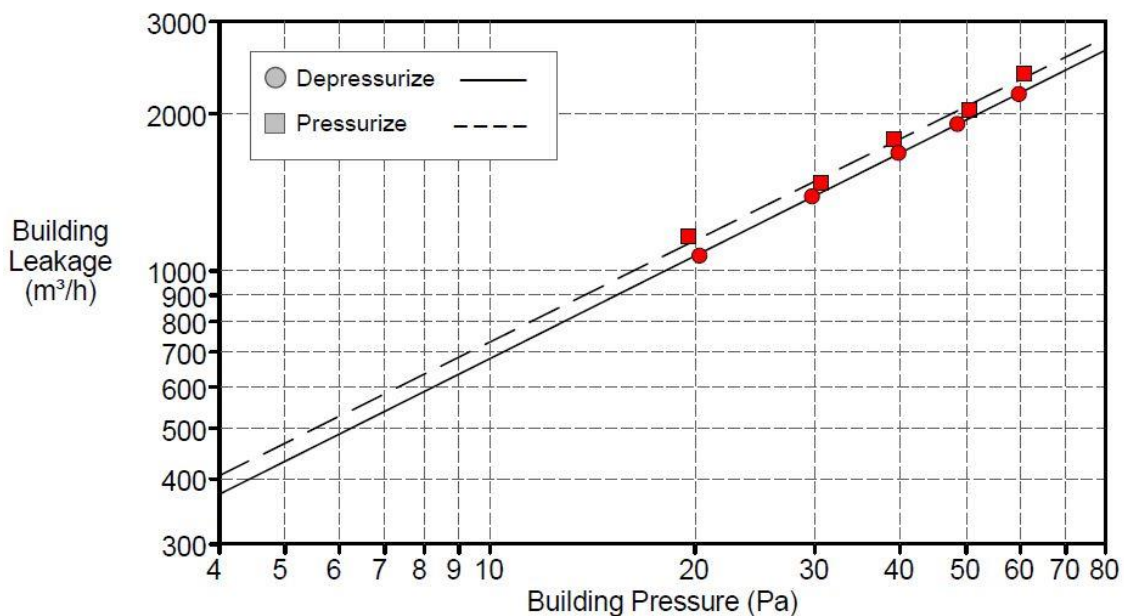


KUVA 28. Rakenneleikkaus korjatusta yläpohjarakenteesta

4.5 Lämpökuvaus ja tiiviysmittaus remontin jälkeen

Lämpökuvaus ja tiiviysmittaus suoritettiin eristeiden vaihdon ja höyrynsulku-
muovin teippaamisen jälkeen uudestaan maaliskuussa 2020. Lämpökuvauksen
osalta keskityttiin yläpohjaan, koska korjauksia tehtiin vain yläpohjarakentee-
seen. Lämpökuvauksella pyrittiin etsimään mahdolliset tiivistämättä jääneet koh-
dat ja käytiin läpi paikat, joissa oli havaittu ilmanvuotoja aiemmalla kuvausker-
ralla.

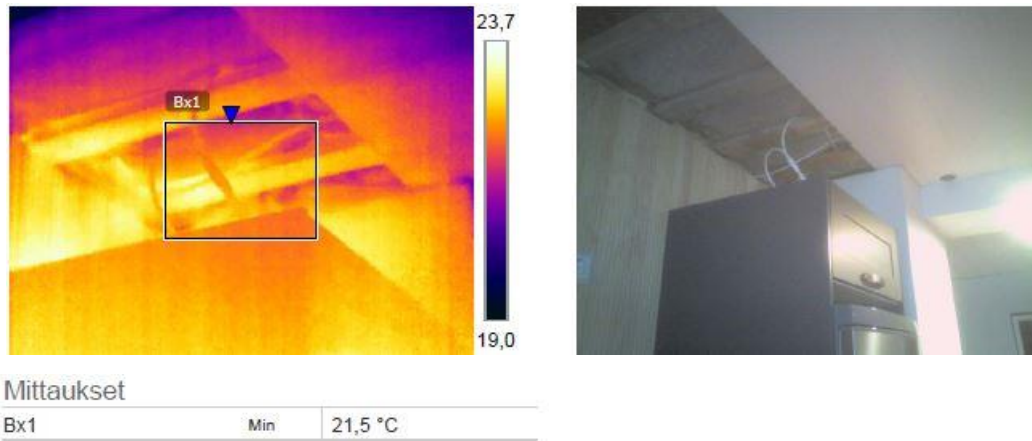
Tiiviysmittaus suoritettiin samalla laitteistolla ja samoin menetelmin kuin ensim-
mäisellä mittauskerralla. Myös mittausolosuhteet olivat lähes samat, kun sisäläm-
pötila oli 23 °C, ulkolämpötila 3 °C ja tuulenopeus noin 6 m/s. Vuotoilman määrä
rakennuksen vaipan läpi 50 Pa:n alipaineessa oli ilmanvuotokäyrän perusteella
noin 2 000 m³/h (kuva 29). Mittausohjelma laski automaattisesti yli- ja alipainemit-
tauksesta saatujen ilmanvuotolukujen keskiarvot. Rakennuksen uusi ilmanvuoto-
luku n₅₀ oli 6,6 1/h ja q₅₀-arvo oli 5,3 m³/(h*m²). Kumpikin ilmanvuotoluku pieneni
24 %. (Liite 3.)



KUVA 29. Ilmanvuotokäyrät yli- ja alipaineessa

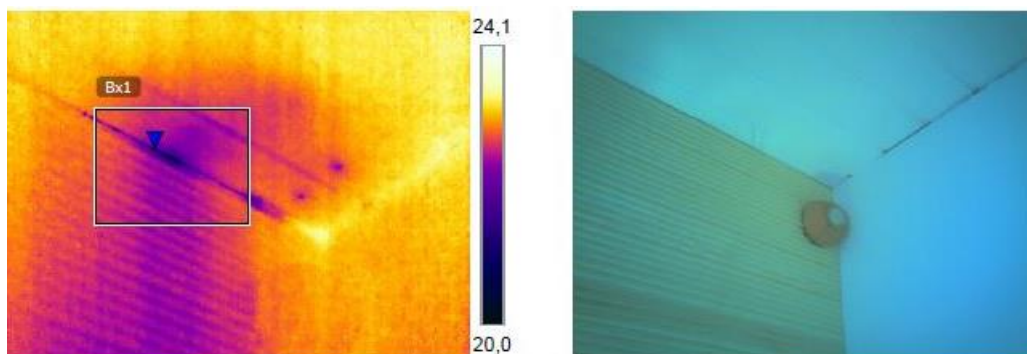
4.6 Ilmanvuotokohtien uudelleen kuvaus

Lämpökuvauksessa havaittiin, että yläpohjan tiivistysteippaukset onnistuivat hyvin. Keittiön höyrynsulun repeämästä aiheutunut suuri ilmavuoto saatiin tukittua kokonaan teippaamalla. (Kuva 30.)



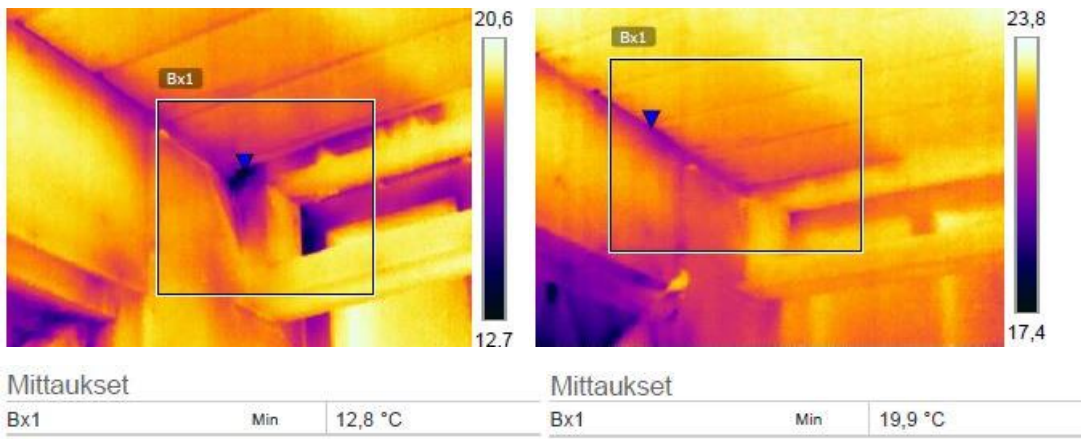
KUVA 30. Alipainekuva keittiön höyrynsulun halkeamasta korjattuna

Wc:ssä oli seinä verhoiltu ensimmäisen mittauskerran jälkeen, joten yläpohjaan menevät putket eivät olleet enää niin selkeästi näkyvillä. Alipaineessa otetun lämpökuvan perusteella kuitenkin on havaittavissa, että läpivienti saatiin tiivistettyä. (Kuva 31.)



KUVA 31. Alipainekuva viemärintuuletusputken läpiviennistä korjattuna

Muutkin yläpohjan ilmanvuotokohtat saatiin teippaamalla ja eristevaihdolla hyvin tukittua. Jo lämpökuvauksen perusteella voitiin päätellä yläpohjan lämmöneristyskyvyn parantuneen selkeästi. (Kuva 32.)



KUVA 32. Ennen ja jälkeen kuva yläpohjaliittymän ilmavuodosta alipaineessa kuvattuna

5 LASKENNALLINEN TARKASTELU

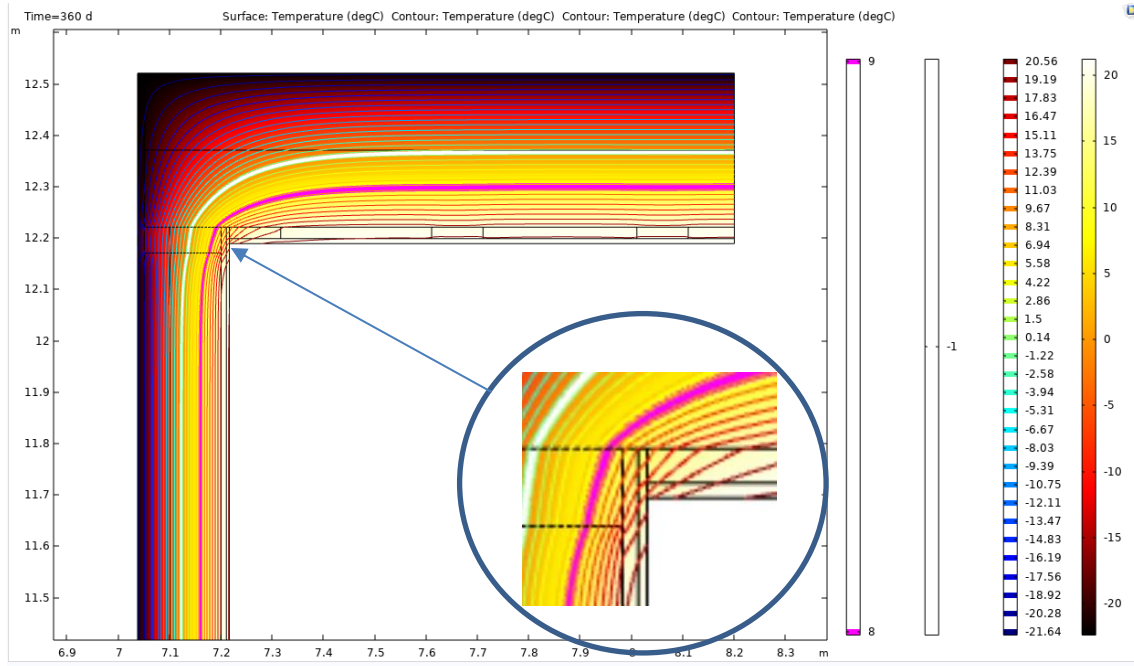
Kohdetta tarkasteltiin myös tietokonesimuloinnin avulla Comsol Multiphysics -simulointiohjelmalla. Ohjelmalla tutkittiin yläpohjarakennetta ennen ja jälkeen remontin ja siitä saatujen arvojen perusteella selvitettiin yläpohjarakenteen lämmöneristyskyvyn muutosta ja yläpohjan osuutta rakennuksen lämpöhäviöissä. Lisäksi tutkittiin eristeiden vaihdon vaikutuksia viivamaisiin kylmäsiltoihin. Laskelmissa apuna käytettiin MathCad Prime -ohjelmaa.

5.1 Simulointi

Tutkimuskohteen rakenteiden rakennusfysikaalisia ominaisuuksia tutkittiin Comsol Multiphysics -simulointiohjelman avulla. Tärkeimpänä tavoitteena oli saada rakenneliitosten L2D-arvo määritettyä viivamaisen lisäkonduktanssin laskemista varten. Lisäksi ohjelman avulla laskettiin rakenteiden U-arvoja sekä tutkittiin rakenteiden käyttäytymistä eri sääolosuhteiden vallitessa. Sää tiedoiksi syötettiin Oulun alueen säädataa vuodelta 2010.

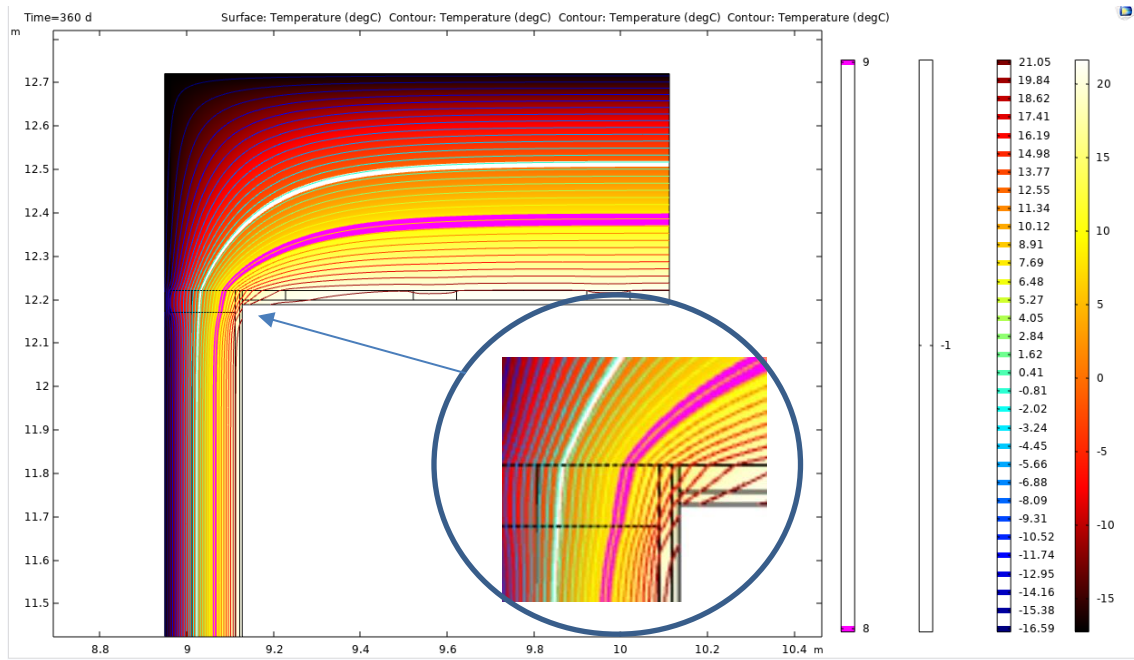
Luvussa 5.1 on esitetty työn kannalta oleellisin rakenneleikkaus, yläpohja. Muut laskentamallit lämpötilajakaumineen on esitetty liitteessä 6. Laskentamallit ohjelmaan määritettiin saatavilla olevien piirustusten ja paikan päällä tehtyjen havaintojen perusteella noudattaen viivamaisen lisäkonduktanssin laskentaoppaan ohjeita.

Rakenteen toimivuutta arvioitiin Comsoliin syötetyn laskentamallin avulla. Laskentamallissa pakkasrajaa kuvattiin valkoisella ja kondenssivyöhykettä purppuralla. Kondenssivyöhykkeellä kuvattiin sitä lämpötilaa, jossa lämpimän sisäilman sisältämä vesihöyry saavuttaa kastepisteensä, tässä tapauksessa 8 - 9 °C. Tämän tarkastelun perusteella havaittiin yläpohjan ja seinän liittymässä kondenssivyöhykkeen kulkevan erittäin lähellä nurkkaa ja höyrynsulkua. Tällaisessa tilanteessa on vaarana, että höyrynsulun pintaan tiivistyy vettä. Valkoisella värillä kuvattu pakkasvyöhyke kulki suunnilleen puolivälissä rakennetta seinän ja yläpohjan liittymän kohdalla ja yläpohjassa kahden 150 mm paksun mineraalivillalevyn välissä. (Kuva 33.)



KUVA 33. Laskentamalli vanhasta yläpohjarakenteesta

Sama tarkastelu tehtiin myös korjatulla liittymädetaljilla, missä yläpohjan eristeenä käytettiin 500 mm Ekovillaa. Pakkasraja kulki korjatussa mallissa noin 300 mm:n päässä sisäpinnasta eli kaksi kertaa kauempana verrattaessa vanhaan rakenteeseen. Myös kondenssivyöhyke oli myös selkeästi kauempana yläpohjan eristeen kohdalla. Nurkassa se kulki hieman kauempana höyrinsulusta kuin vanhassa rakenteessa. (Kuva 34.)



KUVA 34. Laskentamalli korjatusta yläpohjarakenteesta

Viivamaisen lisäkonduktanssin laskentaoppaassa on esitetty seinän ja yläpohjan liitoksen lisäkonduktanssin vertailuarvoksi 0,05 W/mK. Liittymä oli siinä mielessä hyvin toteutettu, että viivamaisen lisäkonduktanssin arvo vanhassa rakenteessa oli 0,043 W/mK. Liittymän läpäisevä lämpövirta L2D oli Comsolin laskemana 0,42 W/mK.

Korjatussa rakenteessa liittymän kylmäsilta korostui yläpohjarakenteen lämmöneristävyyden parantuessa. Liittymän läpäisevä lämpövirta L2D pieneni 0,42 W:stä/mK 0,36 W:iin/mK. Uusi arvo viivamaiselle lisäkonduktanssille pysyi edelleen alle taulukkoarvon sen ollessa 0,048 W/mK.

5.2 Lämpöhäviöt

Tämän kohteen lämpöhäviölaskelmissa huomioitiin rakennuksen vaipan läpi johdettu lämpöenergian määrä sekä vuotoilman mukana kulkeutunut lämpöenergia. Tutkimuksen laskennallisena lähtökohtana oli tarkastella hukatun lämpöenergian määrän muutosta yläpohjan osalta sekä sen merkitystä kokonaislämpöhäviön määrään. Lämpöhäviölaskelmia varten laskettiin myös muiden rakennusosien U-arvot. (Liite 4.)

5.2.1 Laskennallinen lämpöhäviö ennen remonttia

Ulkoilmaan rajoittuvien rakennusosien johtumislämpöhäviöt laskettiin kaavalla 4 (sivulla 11).

$$Q_{rakosa} = \sum U_i A_i (T_s T_u) \Delta t / 1\,000 = 142,8 * 4862 * 24 / 1\,000 = 16\,663 \text{ kWh}$$

Liitoksen kylmäsilan aiheuttama lisäys lämpöhäviöön laskettiin kaavalla 6 (sivulla 11).

$$Q_{kylmäsilat} = \frac{\sum l_k \psi_k (T_s * T_u) \Delta t}{1\,000} = 16,8 * 4862 * \frac{24}{1\,000} = 1\,965 \text{ kWh}$$

Näin ollen vaipan läpi johtunut lämpöenergian määrä ennen remonttia oli yhteensä 18 629 kWh vuodessa, josta liittymien kylmäsiltojen osuus oli 1 965 kWh eli noin 11 %. Yläpohjan osuus johtumislämpöhäviöistä oli 15 % eli 2 762 kWh. (Taulukko 2.) (Liite 5.)

TAULUKKO 2. Rakennuksen laskennallinen johtumislämpöhäviö vuodessa

	Koko rakennus	Yläpohja	Liittymät
kWh	18 629	2 762	1 965
%	100	15	11

Ensimmäisessä mittauksessa saatiin määritettyä ilmanvuotoluvuksi 7,0 m³/m²h. Sen avulla laskettiin vaipan läpi virtaava vuotoilmavirran määrä käyttäen kaavaa 3 (sivulla 10).

$$q_{v,vuotoilma} = \frac{q_{50}}{3\,600 * x} A_{vaippa} = \frac{7,0}{3\,600 * 35} * 378,4 = 0,0211 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Rakennuksen vuotoilman ominaislämpöhäviö laskettiin kaavalla 2.

$$H_{vuotoilma} = \rho_i c_{pi} q_{v,vuotoilma} = 1,2 * 1\,000 * 0,0211 = 25,34 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Vaipan läpi virtaavaan vuotoilmaan kuluva lämpöenergia lasketaan kaavalla 1.

$$Q_{\text{vuotoilma}} = \frac{H_{\text{vuotoilma}}(T_s - T_u)\Delta t}{1\,000} = \frac{25,34 * 2862 * 24}{1\,000} = 2\,956 \text{ kWh}$$

Näin saatiin määritettyä koko rakennuksen vuotoilmaan kuluva lämpöenergian määrä, joka oli 2 956 kWh vuodessa. Rakennuksen laskennallinen kokonaislämpöhäviö, johon laskettiin johtumis- ja vuotoilmalämpöhäviö, oli ennen remonttia yhteensä 21 627 kWh vuodessa. (Taulukko 3.) (Liite 5.)

TAULUKKO 3. Vuotoilman lämpöhäviö vuodessa ja ilmanvuotoluvut ennen tiivistyksiä

Lämpöhäviö (kWh)	n50 (1/h)	q50 (m ³ /hm ²)
2 956	8,7	7,0

5.2.2 Remontin vaikutus lämpöhäviöihin

Eristeiden vaihdon jälkeen laskennallinen johtumislämpöhäviö yläpohjassa oli 1 244 kWh vuodessa. Verrattaessa alkuperäiseen se pieneni 54 % eli rakenteen lämmöneristyskyky tuplaantui jo pelkästään johtumislämpöhäviötä tarkastellessa. Yläpohjan osuus koko rakennuksen johtumislämpöhäviöistä oli alkuperäisellä rakenteella 14 %. Korjaustoimien jälkeen se oli enää 7 %. Rakennusosien kylmäsiltojen osuus lämpöhäviöissä pysyi käytännössä samana. Laskelmissa on havaittavissa hyvin pieni lisäys kylmäsiltoihin, mikä johtuu siitä, että rakenteen lämmöneristyskyky kasvoi, mutta liittymää ei muutettu oleellisesti. (Liite 5.)

Tiivistyskorjauksien jälkeen vuotoilman määrä vuodessa oli 2 233 kWh eli pieneni 24 %. Tutkittavassa kohteessa tehtiin tiivistyskorjauksia ainoastaan yläpohjan höyrynsulkumuoviin. Tästä syystä vuotoilman lämpöhäviön pieneneminen 723 kWh voidaan huomioida nimenomaan yläpohjan lämpöhäviöitä laskettaessa. (Taulukko 4.) (Liite 5.)

TAULUKKO 4. Tiivistyskorjauksien vaikutukset vuotoilman lämpöhäviöön ja ilmanvuotolukuihin

	Vuotoilman lämpöhäviö vuodessa (kWh)	Ilmanvuotoluku q_{50} (m ³ /hm ²)	Ilmanvuotoluku n_{50} (1/h)
Ennen tiivistyksiä	2 956	7,0	8,7
Tiivistyksien jälkeen	2 233	5,3	6,6
Muutos	723	1,7	2,1
Muutos (%)	24	24	24

Taulukossa 5 on esitetty yläpohjan vuosittainen lämpöhäviö, jossa on huomioituna johtumisen lisäksi myös vuotoilman mukana hävinnyt energian määrä. Tämän laskelman mukaan yläpohjan lämpöhäviö pieneni peräti 65 %, yhteensä 2 261 kWh.

TAULUKKO 5. Yläpohjan kokonaislämpöhäviön muutos

	Yläpohja
Ennen korjauksia (kWh)	3 485
Korjauksien jälkeen (kWh)	1 224
Muutos (kWh)	2 261
Muutos (%)	65

Korjauksien jälkeen laskennallinen kokonaislämpöhäviö, johtumislämpöhäviön ja vuotoilman huomioiden koko rakennuksessa oli yhteensä 19 386 kWh vuodessa. Energiankulutus pieneni siis yläpohjan eristepaksuutta kasvattamalla ja ilmatiiveyttä parantamalla yhteensä 2 241 kWh vuodessa eli 10 % alkuperäisestä energiankulutuksesta.

Rahallinen säästö vuositason riippuu oleellisesti käytettävästä energian muodosta ja sen hinnasta. Lisäksi kohteeseen tehtävät korjaustoimenpiteet materiaalienekit vaihtelevat. Taulukossa 6 on esitetty esimerkkilaskelmia säästöistä, joita korjauksilla voidaan saavuttaa energiankulutuksessa ja energiasäästöistä

johtuva takaisinmaksuaika, kun lähtötietona käytetään tämän tutkimuksen kohdetta. Tässä kohteessa korjaustoimenpiteille tuli hintaa yhteensä 2 500 €, kun asukas poisti vanhat eristeet itse ja Ekovilla suoritti tiivistykset sekä uudelleen eristyksen.

TAULUKKO 6. Esimerkkilaskelmia säästöistä

Energian hinta:	Säästöt vuodessa:	Takaisinmaksuaika:
0,11 €/kWh	246,51 €	10 v 2 kk
0,15 €/kWh	334,15 €	7 v 6 kk
0,20 €/kWh	448,20 €	5 v 7 kk

6 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää vuonna 1976 Haukiputaalle rakennetun yksikerroksisen omakotitalon yläpohjaan tehtävien korjauksien vaikutukset energiakulutukseen Comsol- ja MathCad Prime -ohjelmia laskelmissa apuna käyttäen.

Kohteeseen tehtiin joulukuussa 2019 ilmatiiviydsmittaus ja lämpökamerakuvaus, joiden perusteella paikattiin yläpohjan ilmavuotokohtia sekä vaihdettiin yläpohjan eristeet. Mittaus ja kuvaus uusittiin korjaustoimenpiteiden jälkeen maaliskuussa 2020. Muutoksia energiakulutuksessa tutkittiin vertaamalla vuotoilma- ja johtumislämpöhäviötä ennen ja jälkeen korjauksien.

Rakennuksessa havaittiin olevan ulkoseinän ja yläpohjan liittymässä sekä yläpohjan läpivienneissä isoja ilmavuotoja, kuten ennen mittauksia oli oletettu. Ilmavuodot saatiin hyvin kuriin huolellisella teippauksella Sitko Flex -tiivistysteippiä käyttäen. Yläpohjan eristys oli lähtötilanteessa kaksi päällekkäistä 150 mm:ä paksuista mineraalivillalevyä. Eristepaksuutta kasvatettiin 300 mm:stä 500 mm:iin Ekovilla-puhallusvillalla.

Alkuperäinen rakennepiirustuksiin perustunut laskennallinen yläpohjan U-arvo parani $0,20 \text{ W:stä/m}^2\text{K}$ $0,09 \text{ W:ään/m}^2\text{K}$ eli yhteensä 55 %. Yläpohjan lämpöhäviö pieneni 65 % alkuperäisestä. Koko rakennuksen vaipan lämpöhäviöt pelkästään yläpohjaa korjaamalla pieneni 10 %. Ilmanvuotoluku n_{50} parani $8,7 \text{ 1:stä/h}$ $6,6 \text{ 1:een/h}$ eli 24 % ja q_{50} $7,0 \text{ m}^3\text{:stä/m}^2\text{h}$ $5,3 \text{ m}^3\text{:een/m}^2\text{h}$, sekä 24 %. Laskelmien mukaan koko rakennuksen energiankulutus pieneni 2 241 kWh vuodessa.

Pelkästään yläpohjaan tehtävällä remontilla voidaan saavuttaa siis selviä rahallisia säästöjä asumiskustannuksissa. Rakennuksen energiatehokkuuden parantaminen voi nostaa myös talon jälleenmyyntiarvoa. Lisäksi asumisviihtyvyys paranee, kun vetoisuus pienenee. Energiakulutuksen pienentäminen säästää kukkaron lisäksi myös ympäristöä hiilijalanjäljen pienentyessä.

Työssä saatiin selkeää näyttöä siitä, että energiakulutusta voidaan pienentää vanhoissa rakennuksissa päivittämällä yläpohjarakenne vastaamaan nykypäivän

vaatimuksia verrattain helposti toteutettavilla korjaustoimenpiteillä. Tämä kohde oli myös hyvä esimerkki siitä, että etenkin vanhoissa rakennuksissa on syytä selvittää höyryn- tai ilmansulun kunto esimerkiksi tiiviysmittauksen avulla, sillä eristeeroksen kasvattaminen summittaisesti voi lisätä kosteusteknisiä ongelmia, jos kosteussulku on huonosti toteutettu.

On hyvä huomioida, että saadut tulokset rakennuksen vuosittaisesta energiankulutuksesta ovat laskelmiin perustuvia arvioita eivätkä välttämättä täysin vastaa tosielämän tilannetta. Tässä työssä tehtiin kokonaisvaltainen yläpohjaremontti öljylämmitteiseen rakennukseen. Yläpohjakorjauksien vaikutuksien tutkimista voisi laajentaa kohteisiin, joissa energiakulutusta voisi tutkia laskelmien lisäksi myös kulutusta seuraamalla, esimerkiksi sähköllä tai kaukolämmöllä lämmitettävät rakennukset. Lisäksi tutkittavien kohteiden suurempi lukumäärä ja kohteiden sekä tehtävien korjaustoimenpiteiden erilaisuus lisäisi tutkimustuloksien luotettavuutta ja siten voitaisiin myös arvioida pelkästään laskennallisten tulosten luotettavuutta verrattuna tosielämään.

LÄHTEET

1. Rakenteiden lämpötekniikka. Sisäilmayhdistys ry. Saatavissa: <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kosteusvauriot/Kosteustekninen-toiminta/Rakenteiden-lampotekniikka>. Hakupäivä 17.1.2020.
2. Kivioja, Henna – Tuominen, Eero 2019. Sisäisen konvektion vaikutus puhalusvillaeristeisissä yläpohjissa. Tampere: Tampereen yliopisto. Saatavissa: https://research.tuni.fi/uploads/2019/01/a39b69b7-combi_seminaari2019_2b_4.pdf. Hakupäivä 5.11.2019.
3. Romppainen, Ilkka 2010. Lämmin puutalo. Ohjeet ilmanpitävään ja energiaa säästävään rakentamiseen. Helsinki: Rakennustieto Oy.
4. Kokki, Pertti – Metiäinen, Pertti – Mäkelä, Harri – Saarimaa Juho 1983. Pientalorakentamisen seuranta. Asuntomessut Forssassa 1982. Espoo: VTT.
5. Tunnista ja tutki riskirakenne. 2012. Kosteus- ja hometalkoot. Saatavissa: <https://hometalkoot.fi/guides>. Hakupäivä 21.1.2020.
6. RT RakMK-103174 (2018). 2019. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Ohjeet 2018. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Helsinki: Ympäristöministeriö, Energiatehokkuus. Saatavissa: <https://kortistot.rakennustieto.fi/kortit/RT%20RakMK-103174> (vaatii käyttäjälisenssin). Hakupäivä 16.3.2020.
7. Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaopas. 2012. Ympäristöministeriö.
8. 1010/2017. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. Suomen säädöskokoelma. Helsinki.
9. C4 Lämmöneristys, ohjeet 2003. 2002. Ympäristöministeriön asetus lämmöneristyksestä. Helsinki: Ympäristöministeriö.
10. Asiaa kosteudesta ja sen liikkumisesta. 2016. Tiivistalo Wiki. Saatavissa: https://www.tiivistalo.fi/tiivistalo_wiki/. Hakupäivä 24.2.2020.

11. Dynaaminen eli hengittävä rakenne rakentamisessa. 2016. Video. Saatavissa: <https://www.youtube.com/watch?v=UFrXQs5SEhk>. Hakupäivä 25.2.2020.
12. Kokko, Erkki 2002. Hengittävä puukuiturakenne. Fysikaalinen toimintaperiaate ja vaikutukset sisäilmaan. Saatavissa: <https://www.ekovilla.com/miksi-ekovilla/hengittava/>. Hakupäivä 16.3.2020.
13. Intello XN – uuden sukupolven höyrynsulkukangas. 2020. Höyrynsulut. Saatavissa: <https://www.tiivistalo.fi/system-intello/>. Hakupäivä 3.4.2020.
14. Rakennuskanta 2018. Rakennukset ja kesämökit. Tilastokeskus. Helsinki. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/rakke/2018/rakke_2018_2019-05-21_kat_002_fi.html. Hakupäivä 16.3.2020.
15. Tyypillisiä olemassa olevien vanhojen rakennusten alkuperäisiä suunnittelu-arvoja. 2018. Energiatodistusoppaan 2018 liite. Ympäristöministeriö.
16. Rakennesuunnittelu. Ekovilla. Saatavissa: <https://www.ekovilla.com/ammattilaisille/suunnittelu/>. Hakupäivä 11.11.2019.
17. Yläpohjan eristeidenvaihto. Eko-Expert. Saatavissa: <https://www.eko-expert.com/ylapohjan-saneeraus-eristeidenvaihto>. Hakupäivä 29.1.2020.
18. Lylykangas, Kimmo – Andersson, Albert – Kiuru, Jari – Nieminen, Jyri – Pääta, Juha 2015. Rakenteellinen energiatehokkuus. Saatavissa: http://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/oppaat-ohjeet/ret_opas_20150917.pdf. Hakupäivä 11.11.2019.
19. RT 14-11239. 2016. Rakennuksen lämpökuvaus. Rakennustieto Oy. Saatavissa: <https://kortistot.rakennustieto.fi/kortit/RT%2014-11239> (vaatii käyttäjälisenssin). Hakupäivä 16.3.2020.
20. RT 80-10974. 2009. Teollisesti valmistettujen asuinrakennusten ilmanpitävyyden laadunvarmistusohje. Rakennustieto Oy. Saatavissa: <https://kortistot.rakennustieto.fi/kortit/RT%2080-10974> (vaatii käyttäjälisenssin). Hakupäivä 16.3.2020.

LIITTEET

Liite 1 Rakennuslupapiirustukset

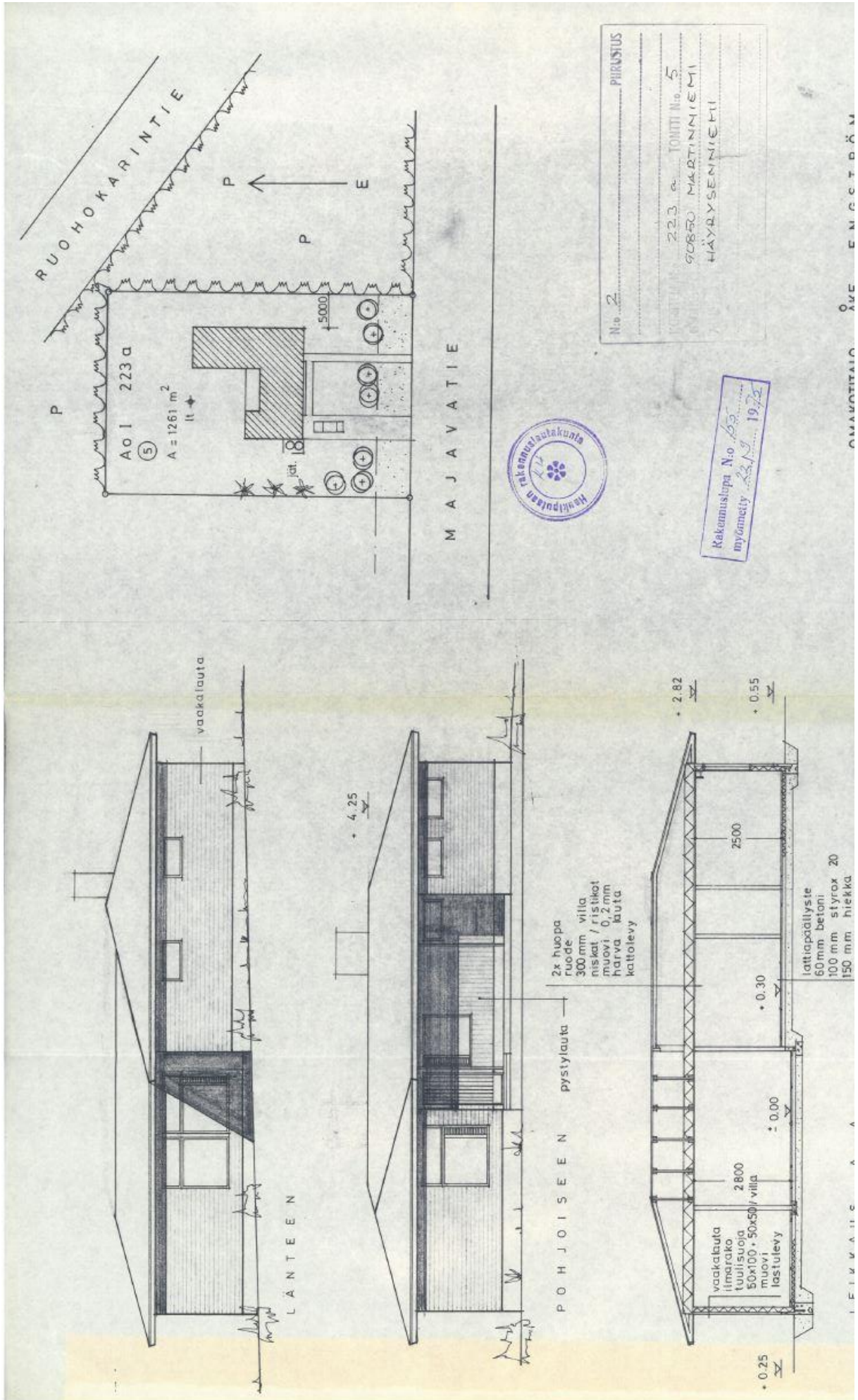
Liite 2 Tiiviysmittausraportti 1

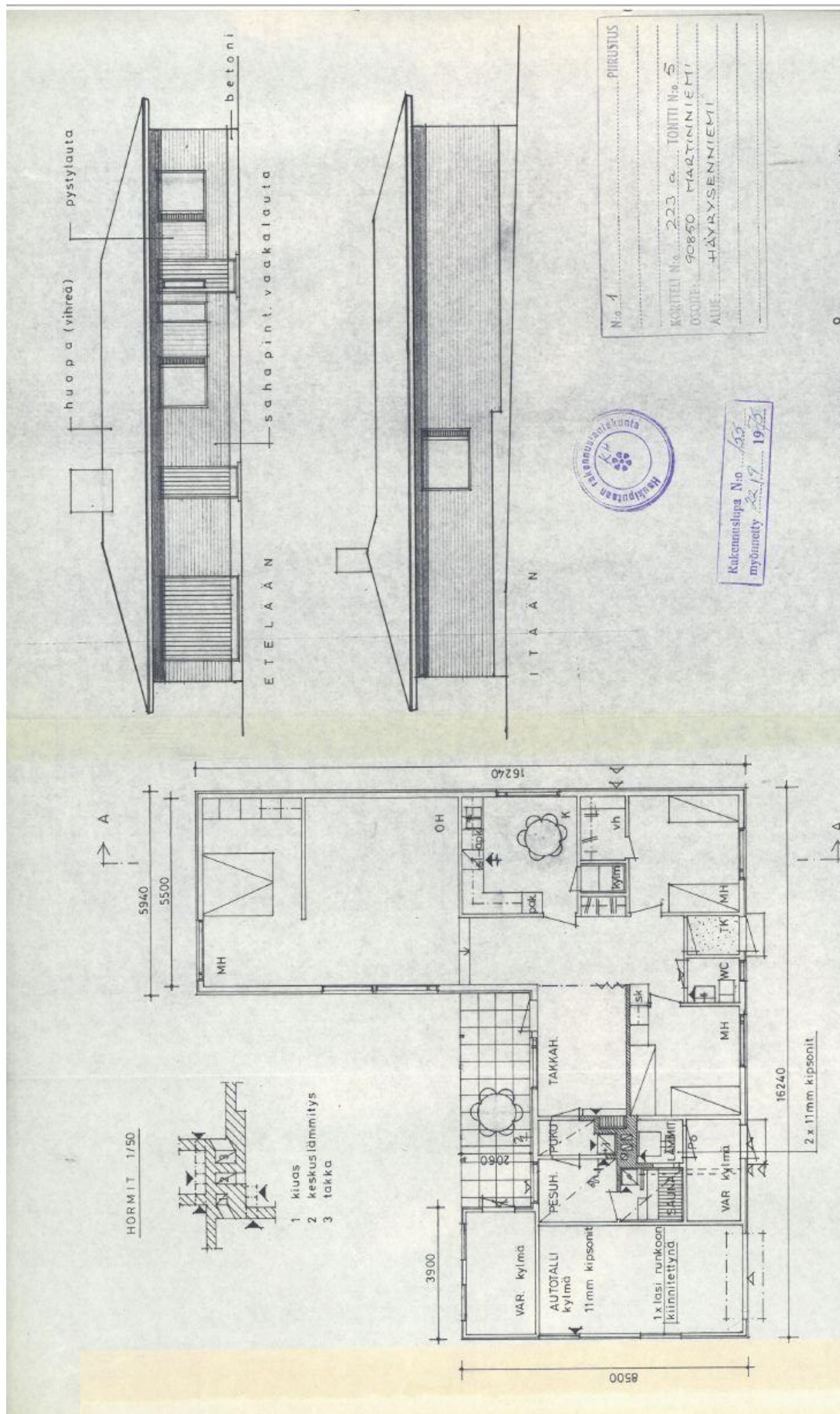
Liite 3 Tiiviysmittausraportti 2

Liite 4 Rakennusosien U_c -arvot

Liite 5 Vaipan lämpöhäviöt

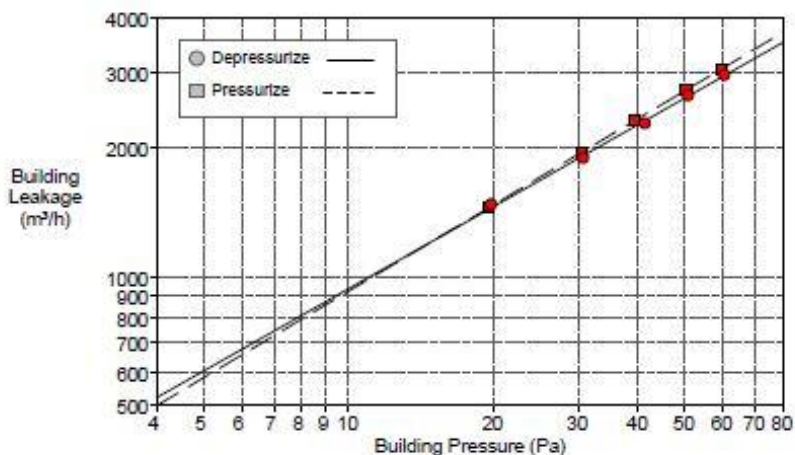
Liite 6 Comsol Multiphysics -laskentamallit





BUILDING LEAKAGE TEST

Date of Test: 4.12.2019		Technician:	
Test File: Majavamutka alipaine ja ylipaine2			
Customer:		Building Address:	
		<u>Depressurization</u>	<u>Pressurization</u>
Test Results at 50 Pascals:		<u>Average</u>	
V50: Airflow (m³/h)	2608 (+/- 0.6 %)	2716 (+/- 0.1 %)	2662
n50: Air Changes per Hour (1/h)	8.52	8.88	8.70
w50: m³/(h·m² Floor Area)	21.77	22.67	22.22
q50: m³/(h·m² Surface Area)	6.89	7.18	7.03
Leakage Areas:			
Canadian EqLA @ 10 Pa (cm²)	1044.8 (+/- 2.6 %)	1032.3 (+/- 0.6 %)	1038.6
cm²/m² Surface Area	2.76	2.73	2.74
LBL ELA @ 4 Pa (cm²)	562.5 (+/- 4.2 %)	539.3 (+/- 0.9 %)	550.9
cm²/m² Surface Area	1.49	1.43	1.46
Building Leakage Curve:			
Air Flow Coefficient (Cenv)	211.6 (+/- 6.5 %)	198.5 (+/- 1.4 %)	
Air Leakage Coefficient (CL)	216.2 (+/- 6.5 %)	198.1 (+/- 1.4 %)	
Exponent (n)	0.636 (+/- 0.017)	0.669 (+/- 0.004)	
Correlation Coefficient	0.99891	0.99995	
Test Standard:	EN 13829	Regulation complied with:	
Type of Test Method:	B		
Equipment:	Model 4 (230V) Minneapolis Blower Door		
Inside Temperature:	22 °C	Volume:	306 m³
Outside Temperature:	3 °C	Surface Area:	378 m²
Barometric Pressure:	101325 Pa	Floor Area:	120 m²
Wind Class:	5 Fresh Breeze	Uncertainty of	
Building Wind Exposure:	Highly Protected Building	Building Dimensions:	%
Type of Heating:		Year of Construction:	1976
Type of Air Conditioning:			
Type of Ventilation:	None		



BUILDING LEAKAGE TEST Page 2

Date of Test: 4.12.2018 Test File: Majavamutka alipaine ja ylipaine2

Comments

automaattinen ylipainetesti ei onnistunut. kokeillaan käsikäytöllä

Data Points: Depressurization:

Nominal Building Pressure (Pa)	Fan Pressure (Pa)	Nominal Flow (m³/h)	Temperature Adjusted Flow (m³/h)	% Error	Fan Configuration
-2.1	n/a				
-62.3	133.8	3086	2961	0.6	Ring A
-52.7	107.2	2766	2654	0.7	Ring A
-43.1	79.2	2381	2284	-1.1	Ring A
-32.5	54.4	1976	1896	-0.9	Ring A
-21.6	32.9	1541	1478	2.2	Ring A
-1.5	n/a				
Test 1 Baseline (Pa): p01- = -2.1 p01+ = 0.0 p02- = -1.5 p02+ = 0.0					

Data Points: Pressurization:

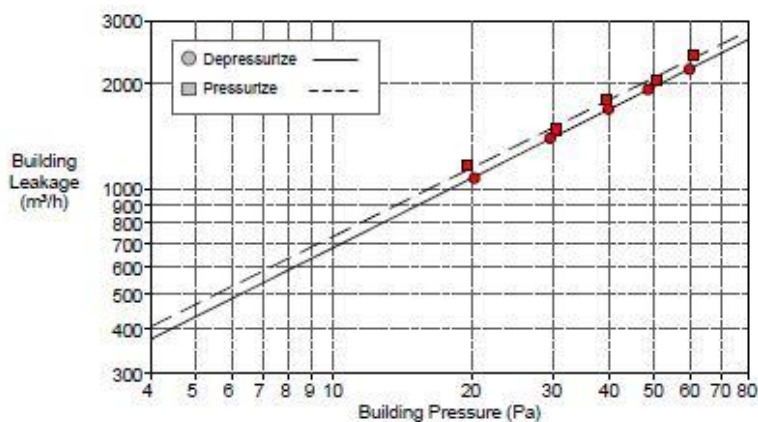
Nominal Building Pressure (Pa)	Fan Pressure (Pa)	Nominal Flow (m³/h)	Temperature Adjusted Flow (m³/h)	% Error	Fan Configuration
-2.1	n/a				
57.5	122.3	2952	3055	0.1	Ring A
48.4	97.1	2634	2726	-0.2	Ring A
37.2	69.9	2237	2316	0.3	Ring A
28.5	49.2	1881	1947	-0.3	Ring A
17.6	27.3	1406	1455	0.1	Ring A
-2.1	n/a				
Test 1 Baseline (Pa): p01- = -2.1 p01+ = 0.0 p02- = -2.1 p02+ = 0.0					

BUILDING LEAKAGE TEST

Date of Test: 10.3		Technician:	
Test File: Majavamutka alipaine ja ylipaine 2020			
Customer:		Building Address: Majavamutka 2	

	Depressurization	Pressurization	Average
Test Results at 50 Pascals:			
V50: Airflow (m³/h)	1949 (+/- 0.3 %)	2067 (+/- 1.3 %)	2008
n50: Air Changes per Hour (1/h)	6.37	6.76	6.56
w50: m³/(h·m² Floor Area)	16.27	17.25	16.76
q50: m³/(h·m² Surface Area)	5.15	5.46	5.31
Leakage Areas:			
Canadian EqLA @ 10 Pa (cm²)	760.2 (+/- 1.1 %)	817.7 (+/- 5.4 %)	788.9
cm²/m² Surface Area	2.01	2.16	2.08
LBL ELA @ 4 Pa (cm²)	403.0 (+/- 1.7 %)	437.0 (+/- 8.7 %)	420.0
cm²/m² Surface Area	1.07	1.15	1.11
Building Leakage Curve:			
Air Flow Coefficient (Cenv)	148.3 (+/- 2.7 %)	166.8 (+/- 13.6 %)	
Air Leakage Coefficient (CL)	151.4 (+/- 2.7 %)	166.2 (+/- 13.6 %)	
Exponent (n)	0.653 (+/- 0.007)	0.644 (+/- 0.036)	
Correlation Coefficient	0.99982	0.99545	
Test Standard:	EN 13829	Regulation complied with:	
Type of Test Method:	B		
Equipment:	Model 4 (230V) Minneapolis Blower Door		

Inside Temperature:	23 °C	Volume:	306 m³
Outside Temperature:	3 °C	Surface Area:	378 m²
Barometric Pressure:	101325 Pa	Floor Area:	120 m²
Wind Class:	6 Strong Breeze	Uncertainty of	
Building Wind Exposure:	Highly Protected Building	Building Dimensions:	%
Type of Heating:		Year of Construction:	1976
Type of Air Conditioning:			
Type of Ventilation:	None		



BUILDING LEAKAGE TEST Page 2

Date of Test: 10.3 Test File: Majavamutka alipaine ja ylipaine 2020

Comments

Alipainemittaus JA ylipaine 1

Data Points: Depressurization:

Nominal Building Pressure (Pa)	Fan Pressure (Pa)	Nominal Flow (m ³ /h)	Temperature Adjusted Flow (m ³ /h)	% Error	Fan Configuration
-2.1	n/a				
-62.0	72.5	2279	2181	-0.4	Ring A
-50.8	55.6	1999	1912	0.1	Ring A
-42.0	43.0	1760	1684	0.4	Ring A
-31.9	29.2	1453	1391	0.4	Ring A
-22.6	194.1	1119	1071	-1.0	Ring B
-2.4	n/a				
Test 1 Baseline (Pa): p01- = -2.1 p01+ = 0.0 p02- = -2.4 p02+ = 0.0					

Data Points: Pressurization:

Nominal Building Pressure (Pa)	Fan Pressure (Pa)	Nominal Flow (m ³ /h)	Temperature Adjusted Flow (m ³ /h)	% Error	Fan Configuration
-1.6	n/a				
59.1	73.7	2298	2384	1.7	Ring A
48.8	53.1	1954	2026	-2.5	Ring A
37.5	41.2	1722	1788	1.2	Ring A
28.9	27.8	1417	1470	-2.3	Ring A
17.9	194.6	1120	1162	3.2	Ring B
-1.8	n/a				
Test 1 Baseline (Pa): p01- = -1.6 p01+ = 0.0 p02- = -1.8 p02+ = 0.0					

Yläpohjan Uc-arvo

Vesikatto, tuulettuva ilmatila, mineraalivilla 300mm, muovi 0,2mm, koolaus 22mm, sisäverhous 13mm

Paksuudet:

$$d_1 := 0.2 \text{ m}$$

$$d_2 := 0.1 \text{ m}$$

$$d_3 := 0.0002 \text{ m}$$

$$d_4 := 0.022 \text{ m}$$

$$d_5 := 0.013 \text{ m}$$

Lämmönjohtavuudet:

$$\lambda_1 := 0.045 \frac{W}{m \cdot K}$$

$$\lambda_2 := 0.045 \frac{W}{m \cdot K}$$

$$\lambda_3 := 0.5 \frac{W}{m \cdot K}$$

$$\lambda_5 := 0.12 \frac{W}{m \cdot K}$$

$$\lambda_{\text{muu}} := 0.12 \frac{W}{m \cdot K}$$

Pintavastukset:

$$R_{\text{si}} := 0.10 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

$$R_{\text{se}} := 0.04 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Table 9 Thermal resistance of roof spaces

Characteristics of roof		R_u $m^2 \cdot K/W$
1	Tiled roof with no felt, boards or similar	0.06
2	Sheeted roof, or tiled roof with felt or boards or similar under the tiles	0.2
3	As 2 (above) but with aluminium cladding or other low emissivity surface at underside of roof	0.3
4	Roof lined with boards and felt	0.3

NOTE The values in this table include the thermal resistance of the ventilated space and the thermal resistance of the [pitched] roof construction. They do not include the external surface resistance, R_{se} .

$$R_u := 0.2 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Table 8 Thermal resistance of unventilated air layers with high emissivity surfaces

Thickness of air layer mm	Thermal resistance $m^2 \cdot K/W$		
	Direction of heat flow		
	Upwards	Horizontal	Downwards
0	0.00	0.00	0.00
5	0.11	0.11	0.11
7	0.13	0.13	0.13
10	0.15	0.15	0.15
15	0.16	0.17	0.17
25	0.18	0.18	0.19
50	0.18	0.18	0.21
100	0.18	0.18	0.22
300	0.18	0.18	0.23

NOTE Interpolated values are obtained by linear interpolation.

$$R_k := 0.16 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

$$R_{\text{tot}} := R_{\text{si}} + R_u + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_3}{\lambda_3} + R_k + \frac{d_5}{\lambda_5} + R_{\text{se}} = 5.113 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

$$U := \frac{1}{R_{tot}} = 0.196 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$\Delta U_g := 0 \quad \Delta U_f := 0 \quad \Delta U_r := 0$$

$$U_C := U + \Delta U_g + \Delta U_f + \Delta U_r = 0.196 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Alapaarteen vaikutus

$$d_{alapaarte} := 0.123 \text{ m}$$

$$l := 48 \text{ mm}$$

$$k := 900 \text{ mm}$$

$$A_{puu} := \frac{l}{k} = 0.053$$

$$A_{villa} := \frac{(k-l)}{k} = 0.947$$

$$A_{puu} + A_{villa} = 1$$

Kokonaan villaa: $R1 := R_{si} + R_u + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_3}{\lambda_3} + R_k + \frac{d_5}{\lambda_5} + R_{si} = 5.113 \frac{m^2 \cdot K}{W}$

Kokonaan puuta: $R2 := R_{si} + R_u + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_{puu}} + \frac{d_3}{\lambda_3} + R_k + \frac{d_5}{\lambda_5} + R_{si} = 5.947 \frac{m^2 \cdot K}{W}$

Kokonaislämmönvastuksen yläkiarvo

$$R_{tot,upper} := \frac{1}{\frac{A_{villa}}{R1} + \frac{A_{puu}}{R2}} = 5.152 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Kokonaislämmönvastuksen alakiarvo

$$R_{tot,lower} := R_{si} + R_u + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_3}{\lambda_3} + R_k + \frac{d_5}{\lambda_5} + R_{si} = 5.113 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Kokonaislämmönvastus: $R_{tot} := \frac{R_{tot,upper} + R_{tot,lower}}{2} = 5.132 \frac{m^2 \cdot K}{W}$

Lämmönläpäisykerroin:

$$U := \frac{1}{R_{tot}} = 0.195 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Yläpohjan Uc-arvo

Vesikatto, tuulettuva ilmatila, ekovilla 500mm, muovi 0,2mm, koolaus 22mm, sisäverhous 13mm

Paksuudet:

$$d_1 := 0.4 \text{ m}$$

$$d_2 := 0.1 \text{ m}$$

$$d_3 := 0.0002 \text{ m}$$

$$d_4 := 0.022 \text{ m}$$

$$d_5 := 0.013 \text{ m}$$

Lämmönjohtavuudet:

$$\lambda_1 := 0.038 \frac{W}{m \cdot K}$$

$$\lambda_2 := 0.038 \frac{W}{m \cdot K}$$

$$\lambda_3 := 0.5 \frac{W}{m \cdot K}$$

$$\lambda_5 := 0.12 \frac{W}{m \cdot K}$$

$$\lambda_{puu} := 0.12 \frac{W}{m \cdot K}$$

Pintavastukset:

$$R_{si} := 0.10 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

$$R_{se} := 0.04 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Table 9 Thermal resistance of roof spaces

Characteristics of roof		R_u $m^2 \cdot K/W$
1	Tiled roof with no felt, boards or similar	0.06
2	Sheeted roof, or tiled roof with felt or boards or similar under the tiles	0.2
3	As 2 (above) but with aluminium cladding or other low emissivity surface at underside of roof	0.3
4	Roof lined with boards and felt	0.3

NOTE The values in this table include the thermal resistance of the ventilated space and the thermal resistance of the (pitched) roof construction. They do not include the external surface resistance, R_{se} .

$$R_u := 0.2 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Table 8 Thermal resistance of unventilated air layers with high emissivity surfaces

Thickness of air layer mm	Thermal resistance $m^2 \cdot K/W$		
	Direction of heat flow		
	Upwards	Horizontal	Downwards
0	0.00	0.00	0.00
5	0.11	0.11	0.11
7	0.13	0.13	0.13
10	0.15	0.15	0.15
15	0.16	0.17	0.17
25	0.16	0.18	0.19
50	0.16	0.18	0.21
100	0.16	0.18	0.22
300	0.16	0.18	0.23

NOTE Intermediate values are obtained by linear interpolation.

$$R_k := 0.16 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

$$R_{tot} := R_{si} + R_u + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_3}{\lambda_3} + R_k + \frac{d_5}{\lambda_5} + R_{se} = 11.195 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

$$U := \frac{1}{R_{tot}} = 0.089 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$\Delta U_g := 0 \quad \Delta U_f := 0 \quad \Delta U_r := 0$$

$$U_G := U + \Delta U_g + \Delta U_f + \Delta U_r = 0.089 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Alapaarteen vaikutus

$$d_{alapaarte} := 0.123 \text{ m}$$

$$l := 48 \text{ mm}$$

$$k := 900 \text{ mm}$$

$$A_{puu} := \frac{l}{k} = 0.053$$

$$A_{villa} := \frac{(k-l)}{k} = 0.947$$

$$A_{puu} + A_{villa} = 1$$

Kokonaan villaa: $R1 := R_{si} + R_u + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_3}{\lambda_3} + R_k + \frac{d_5}{\lambda_5} + R_{si} = 11.195 \frac{m^2 \cdot K}{W}$

Kokonaan puuta: $R2 := R_{si} + R_u + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_{puu}} + \frac{d_3}{\lambda_3} + R_k + \frac{d_5}{\lambda_5} + R_{si} = 12.028 \frac{m^2 \cdot K}{W}$

Kokonaislämmönvastuksen yläkiiarvo

$$R_{tot,upper} := \frac{1}{\frac{A_{villa}}{R1} + \frac{A_{puu}}{R2}} = 11.237 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Kokonaislämmönvastuksen alakiiarvo

$$R_{tot,lower} := R_{si} + R_u + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_3}{\lambda_3} + R_k + \frac{d_5}{\lambda_5} + R_{si} = 11.195 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Kokonaislämmönvastus: $R_{tot} := \frac{R_{tot,upper} + R_{tot,lower}}{2} = 11.216 \frac{m^2 \cdot K}{W}$

Lämmönläpäisykerroin:

$$U := \frac{1}{R_{tot}} = 0.089 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Seinän U-arvo		
+		
Paksuudet:	Lämmönjohtavuudet:	Pintavastukset:
$d_1 := 0.013 \text{ m}$	$\lambda_1 := 0.049 \frac{W}{m \cdot K}$	$R_{si} := 0.13 \frac{m^2 \cdot K}{W}$
$d_2 := 0.100 \text{ m}$	$\lambda_2 := 0.041 \frac{W}{m \cdot K}$	$R_{se} := 0.04 \frac{m^2 \cdot K}{W}$
$d_3 := 0.0002 \text{ m}$	$\lambda_3 := 0.5 \frac{W}{m \cdot K}$	
$d_4 := 0.048 \text{ m}$	$\lambda_4 := 0.041 \frac{W}{m \cdot K}$	
$d_5 := 0.013 \text{ m}$	$\lambda_5 := 0.12 \frac{W}{m \cdot K}$	$\lambda_6 := 0.21 \frac{W}{m \cdot K}$
$d_6 := 0.006 \text{ m}$	$\lambda_{puu} := 0.12 \frac{W}{m \cdot K}$	
Runko	$p1 := 50 \text{ mm}$	$k1 := 600 \text{ mm}$
Ulkopuolen koolaus	$p2 := 50 \text{ mm}$	$k2 := 600 \text{ mm}$
kokonaan villaa	$A1 := \frac{(k1 - p1) \cdot (k2 - p2)}{k1 \cdot k2} = 0.84$	
kokonaan puuta	$A2 := \frac{p1 \cdot p2}{k1 \cdot k2} = 0.007$	
rungon kohta puuta, sisäpuoli villaa	$A3 := \frac{p1 \cdot (k2 - p2)}{k1 \cdot k2} = 0.076$	
rungon kohta villaa, sisäpuoli puuta	$A4 := \frac{p2 \cdot (k1 - p1)}{k1 \cdot k2} = 0.076$	

Rakenteessa on tuulettuva ilmarako. Tällöin ilmarakoa ja sen ulkopuolella olevia kerroksia ei oteta huomioon lämmönvastuksen lasemisessa JA ulkopinnan pintavastuksena käytetään sisäpinnan pintavastuksen arvoa.

6.9.4 Well-ventilated air layer

The total thermal resistance of a building component containing a well-ventilated air layer shall be obtained by disregarding the thermal resistance of the air layer and all other layers between the air layer and external environment, and including an external surface resistance corresponding to still air (see Annex C). Alternatively, the corresponding value of R_{st} from Table 7 may be used.

Kokonaan villaa:
$$R1 := R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{d_4}{\lambda_4} + \frac{d_5}{\lambda_5} + \frac{d_6}{\lambda_6} + R_{si} = 4.272 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Kokonaan puuta:
$$R2 := R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_{puu}} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{d_4}{\lambda_{puu}} + \frac{d_5}{\lambda_5} + \frac{d_6}{\lambda_6} + R_{si} = 1.896 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Rungon kohta puuta, ulkopuoli villaa:
$$R3 := R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_{puu}} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{d_4}{\lambda_4} + \frac{d_5}{\lambda_5} + \frac{d_6}{\lambda_6} + R_{si} = 2.667 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Rungon kohta villaa, sisäpuoli puuta:
$$R4 := R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{d_4}{\lambda_{puu}} + \frac{d_5}{\lambda_5} + \frac{d_6}{\lambda_6} + R_{si} = 3.502 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Kokonaislämmönvastuksen yläkiiarvo

$$R_{tot,upper} := \frac{1}{\frac{A1}{R1} + \frac{A2}{R2} + \frac{A3}{R3} + \frac{A4}{R4}} = 3.987 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Kokonaislämmönvastuksen alalikiiarvo

$$R_{tot,lower} := R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\frac{d_2}{\lambda_{puu}} + \frac{d_2}{\lambda_2}} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\frac{d_4}{\lambda_{puu}} + \frac{d_4}{\lambda_4}} + \frac{d_5}{\lambda_5} + \frac{d_6}{\lambda_6} + R_{si} = 3.773 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

$$\alpha := 0.8$$

$$\lambda_f := 17 \frac{W}{m \cdot K} \quad \text{Ansaan lämmönjohtavuus (teräs)}$$

$$halk := 0.004 \text{ m} \quad \text{Ansaan halkasija}$$

$$A_f := \pi \cdot \left(\frac{halk}{2} \right)^2 = (1.257 \cdot 10^{-5}) \text{ m}^2$$

$$n_f := \frac{0}{\text{m}^2} \quad \text{Ansainten määrä neliometrillä}$$

$$\Delta U_f := \frac{\alpha \cdot \lambda_f \cdot A_f \cdot n_f}{d_1 + d_2 + d_4} \cdot \left(\frac{d_1 + d_2 + d_4}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_4} \right)^2 = 0 \frac{W}{\text{m}^2 \cdot K}$$

$$\Delta U_r := 0 \frac{W}{\text{m}^2 \cdot K}$$

Korjattu lämmönläpäisykerroin:

$$U_G := U + \Delta U_q + \Delta U_f + \Delta U_r = 0.2577 \frac{W}{\text{m}^2 \cdot K}$$

Maanvarainen alapohja

$$\lambda_{bet} := 2.0 \frac{W}{m \cdot K} \quad d_{bet} := 0.08 \text{ m}$$

$$\lambda_{EPS} := 0.038 \frac{W}{m \cdot K} \quad d_{EPS,ap} := 0.1 \text{ m}$$

$$\lambda_{sok} := 2.0 \frac{W}{m \cdot K} \quad d_{sok} := 0.36 \text{ m}$$

$$\lambda_g := 2.0 \frac{W}{m \cdot K} \quad d_{EPS,sok} := 0.050 \text{ m}$$

$$R_{si,ap} := 0.17 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad R_{si,seinä} := 0.13 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

$$R_{se} := 0.04 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

$$l_1 := 6.44 \text{ m}$$

$$l_2 := 5.5 \text{ m}$$

$$p_1 := 10.3 \text{ m}$$

$$p_2 := 16.24 \text{ m}$$

Laatan U-arvo:

$$B_1 := \frac{l_1 \cdot p_1}{0.5 \cdot (2 \cdot l_1 + 2 \cdot p_1)} = 3.962 \text{ m} \quad B_2 := \frac{l_2 \cdot p_2}{0.5 \cdot (2 \cdot l_2 + 2 \cdot p_2)} = 4.109 \text{ m}$$

$$B := B_1 + B_2 \quad B = 8.071 \text{ m}$$

$$\text{Seinän paksuus:} \quad d_{w,e} := 0.182 \text{ m}$$

$$\text{Alapohjan lämmönvastus:} \quad R_{f,sog} := \frac{d_{bet}}{\lambda_{bet}} + \frac{d_{EPS,ap}}{\lambda_{EPS}} = 2.672 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

$$d_f := d_{w,e} + \lambda_g \cdot (R_{si,ap} + R_{f,sog} + R_{se}) = 5.945 \text{ m}$$

Kun $df > B$ eli alapohja on hyvin eristetty:

$$U_{fg,sog} := \frac{\lambda_g}{0.457 \cdot B + d_f} = 0.208 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Kun $df < B$ eli alapohja on huonosti eristetty:

$$U_{fg,sog} := \frac{2 \cdot \lambda_g}{\pi \cdot B + d_f} \cdot \ln \left(\frac{\pi \cdot B}{d_f} + 1 \right) = 0.212 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Laatan U-arvo vaaka- ja pystysuorien reunaeristeiden kanssa:

Low-density foundations, of thermal conductivity less than that of the soil, are treated as vertical edge insulation. $\Psi_{g,ed}$ has a negative value.

$$d_{n,pysty} := 0.36 \text{ m} \quad d_{n,vaaka} := 0 \text{ m} \quad \text{alapohjan lisäreunaeristeiden paksuus}$$

$$R_{n,pysty} := \frac{d_{sok}}{\lambda_{sok}} + \frac{d_{EPS;sok}}{\lambda_{EPS}} = 1.496 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \quad R_{n,vaaka} := \frac{d_{n,vaaka}}{\lambda_{EPS}} = 0 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

$$d'_{pysty} := \left(R_{n,pysty} - \frac{d_{n,pysty}}{\lambda_g} \right) \cdot \lambda_g = 2.632 \text{ m} \quad d'_{vaaka} := \left(R_{n,vaaka} - \frac{d_{n,vaaka}}{\lambda_g} \right) \cdot \lambda_g = 0 \text{ m}$$

Pystysuoran eristeen syvyys maan pinnan alapuolella : $D_{pysty} := 0.3 \text{ m}$
 Reunaeristeiden (vaakasuuntainen) leveys: $D_{vaaka} := 0 \text{ m}$

viivamainen lämmönläpäisevyys pystysuoralle eristeelle:

$$\psi_{pysty} := -\frac{\lambda_g}{\pi} \cdot \left(\ln \left(\frac{2 \cdot D_{pysty}}{d_f} + 1 \right) - \ln \left(\frac{2 \cdot D_{pysty}}{d_f + d'_{pysty}} + 1 \right) \right) = -0.018 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^3 \cdot \text{K}}$$

viivamainen lämmönläpäisevyys reunaeristeelle (vaakasuuntainen):

$$\psi_{vaaka} := -\frac{\lambda_g}{\pi} \cdot \left(\ln \left(\frac{D_{vaaka}}{d_f} + 1 \right) - \ln \left(\frac{D_{vaaka}}{d_f + d'_{vaaka}} + 1 \right) \right) = 0 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^3 \cdot \text{K}}$$

$$\psi := \min(\psi_{pysty}, \psi_{vaaka}) = -0.018 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$U_{ap} := U_{fg;sog} + \frac{2 \cdot \psi}{B} = 0.2078 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Rakennuksen vaipan lämpöhäviöt ennen remonttia

$$U_{seinä1} := 0.2577 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad U_{seinä1,Comsol} := 0.23276 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad A_{seinä1} := 138.8 m^2$$

$$U_{yp} := 0.195 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad U_{yp,Comsol} := 0.14586 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad A_{yp} := 119.8 m^2$$

$$U_{ap} := 0.2078 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad U_{ap,Comsol} := 0.20638 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad A_{ap} := 119.8 m^2$$

$$U_{ikk1} := 3.1 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad A_{ikk1} := 17.8 m^2$$

$$U_{ovi} := 1 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad A_{ovi} := 3.6 m^2$$

$$H_{vaiippa} := U_{seinä1} \cdot A_{seinä1} + U_{yp} \cdot A_{yp} + U_{ap} \cdot A_{ap} + U_{ikk1} \cdot A_{ikk1} + U_{ovi} \cdot A_{ovi} = 142.804 \frac{W}{K}$$

$$H_{vaiippa} = 142.804 \frac{W}{K}$$

$$H_{yp} := U_{yp} \cdot A_{yp} = 23.361 \frac{W}{K}$$

Liittymien lämpöhäviö (=viivamaiset kylmäsilat)

$$L_{2D,seinä,seinä} := 0.53134 \frac{W}{m \cdot K} \quad l_{seinä,seinä} := 20.2 m$$

$$L_{2D,seinä,yp} := 0.42191 \frac{W}{m \cdot K} \quad l_{seinä,yp} := 60 m$$

$$L_{2D,seinä,ap} := 1.2401 \frac{W}{m \cdot K} \quad l_{seinä,ap} := 60 m$$

$$L_{2D,seinä,ikk} := 0.26749 \frac{W}{m \cdot K} \quad l_{seinä,ikk} := 48 m$$

$$L_{2D,seinä,ovi} := 0.26749 \frac{W}{m \cdot K} \quad l_{seinä,ovi} := 9.8 m$$

$$\Psi_{\text{seinä,seinä}} := L_{2D,\text{seinä,seinä}} - U_{\text{seinä1,Comsol}} \cdot 2 \text{ m} = 0.066 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$\Psi_{\text{seinä,yp}} := L_{2D,\text{seinä,yp}} - U_{\text{seinä1,Comsol}} \cdot 1 \text{ m} - U_{\text{yp,Comsol}} \cdot 1 \text{ m} = 0.043 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$\Psi_{\text{seinä,ap}} := L_{2D,\text{seinä,ap}} - U_{\text{seinä1,Comsol}} \cdot 1 \text{ m} - U_{\text{ap,Comsol}} \cdot 4 \text{ m} = 0.182 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$\Psi_{\text{seinä,ikk}} := L_{2D,\text{seinä,ikk}} - U_{\text{seinä1,Comsol}} \cdot 1 \text{ m} = 0.035 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$\Psi_{\text{seinä,ovi}} := L_{2D,\text{seinä,ovi}} - U_{\text{seinä1,Comsol}} \cdot 1 \text{ m} = 0.035 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$H_{\text{liittymät}} = \Psi_{\text{seinä,seinä}} \cdot l_{\text{seinä,seinä}} + \Psi_{\text{seinä,yp}} \cdot l_{\text{seinä,yp}} + \Psi_{\text{seinä,ap}} \cdot l_{\text{seinä,ap}} + \Psi_{\text{seinä,ikk}} \cdot l_{\text{seinä,ikk}} + \Psi_{\text{seinä,ovi}} \cdot l_{\text{seinä,ovi}} = 16.844 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

$$H_{\text{liittymät}} = 16.844 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

$$H_{\text{liittymät,yp}} := \Psi_{\text{seinä,yp}} \cdot l_{\text{seinä,yp}} = 2.597 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Vaipan ja liittymien johtumislämpöhäviö yhteensä:

$$H := H_{\text{vaippa}} + H_{\text{liittymät}} = 160 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Lämpöhäviö kilowattitunteina vuodessa:

$$Q := 160 \cdot 4862 \cdot \frac{24}{1000} = 18670 \text{ kWh/v}$$

$$Q_{\text{yp}} := 23.361 \cdot 4862 \cdot \frac{24}{1000} = 2726 \text{ kWh/v}$$

$$Q_{\text{liittymät}} := 16.844 \cdot 4862 \cdot \frac{24}{1000} = 1965 \text{ kWh/v}$$

Rakennuksen tarvitseman lämmitysenergian määrän laskemisessa on käytetty Oulun alueen lämmöntarvelukua 4 862 (vrkK) vuodelta 2019.

Liittymien osuus kokonaislämpöhäviöstä

$$\frac{H_{\text{liittymät}}}{H} = 11\%$$

Yläpohjan osuus kokonaislämpöhäviöstä

$$\frac{H_{\text{yp}}}{H} = 15\%$$

Rakennuksen vaipan lämpöhäviöt remontin jälkeen

$$U_{\text{seinä1}} := 0.2577 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad U_{\text{seinä1,Comsol}} := 0.23276 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad A_{\text{seinä1}} := 138.8 \text{ m}^2$$

$$U_{\text{yp}} := 0.089 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad U_{\text{yp,Comsol}} := 0.076060 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad A_{\text{yp}} := 119.8 \text{ m}^2$$

$$U_{\text{ap}} := 0.2078 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad U_{\text{ap,Comsol}} := 0.20638 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad A_{\text{ap}} := 119.8 \text{ m}^2$$

$$U_{\text{ikk1}} := 3.1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad A_{\text{ikk1}} := 17.8 \text{ m}^2$$

$$U_{\text{ovi}} := 1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad A_{\text{ovi}} := 3.6 \text{ m}^2$$

$$H_{\text{vaiippa}} := U_{\text{seinä1}} \cdot A_{\text{seinä1}} + U_{\text{yp}} \cdot A_{\text{yp}} + U_{\text{ap}} \cdot A_{\text{ap}} + U_{\text{ikk1}} \cdot A_{\text{ikk1}} + U_{\text{ovi}} \cdot A_{\text{ovi}} = 130.105 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

$$H_{\text{vaiippa}} = 130.105 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

$$H_{\text{yp}} := U_{\text{yp}} \cdot A_{\text{yp}} = 10.662 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Liittymien lämpöhäviö (=viivamaiset kylmäsiilat)

$$L_{2D;\text{seinä};\text{seinä}} := 0.53134 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad l_{\text{seinä};\text{seinä}} := 20.2 \text{ m}$$

$$L_{2D;\text{seinä};\text{yp}} := 0.35670 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad l_{\text{seinä};\text{yp}} := 60 \text{ m}$$

$$L_{2D;\text{seinä};\text{ap}} := 1.2401 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad l_{\text{seinä};\text{ap}} := 60 \text{ m}$$

$$L_{2D;\text{seinä};\text{ikk}} := 0.26749 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad l_{\text{seinä};\text{ikk}} := 48 \text{ m}$$

$$L_{2D;\text{seinä};\text{ovi}} := 0.26749 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad l_{\text{seinä};\text{ovi}} := 9.8 \text{ m}$$

$$Q_{\text{vuotoilma.1}} := H_{\text{vuotoilma}} \cdot \frac{4862 \cdot 24}{1000} = 2233 \text{ kWh/v}$$

Vuotoilmanmäärän muutos:

$$Q := Q_{\text{vuotoilma}} - Q_{\text{vuotoilma.1}} = 723.297 \text{ kWh/v}$$

Johtumislämpöhäviön ja vuotoilmalämpöhäviön pienentyminen yhteensä

$$Q_1 := 18670 \quad \text{Johtumislämpö alussa kWh/v}$$

$$Q_2 := 17153 \quad \text{Johtumislämpö lopussa kWh/v}$$

$$Q_3 := Q_1 - Q_2 = 1517 \quad \text{Johtumislämpöhäviö muutos kWh/v}$$

$$Q = 723.297 \quad \text{Vuotoilmanmäärän muutos kWh/v}$$

KOKONAISLÄMPÖHÄVIÖ PIENENI:

$$\frac{Q + Q_3}{Q_1 + Q_{\text{vuotoilma}}} = 10\%$$

$$Q_{\text{YHT}} := Q + Q_3 = 2240 \text{ kWh/v}$$

