



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**PUHALLUSERISTETTYJEN YLÄPOHJIEN
LÄMPÖTEKNISET OMINAISUUDET JA NIIDEN
MITOITUS**

Santeri Hast

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Diplomityö

Joulukuu 2022

TIIVISTELMÄ

Puhalluseristettyjen yläpohjien lämpötekniset ominaisuudet ja niiden mitoitus

Santeri Hast

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Diplomityö 2022, 95 s.

Työn ohjaajat yliopistolla: Antti Niemi ja Filip Fedorik

Työn tarkoituksena on tutustua puhalluseristettyjen yläpohjien lämpötekniisiin ominaisuuksiin. Rakennushankkeeseen pakolliseksi tuleva elinkaarimallin mukainen hiilijalan- ja hiilikädenjäljen laskenta suoritetaan 140 m² omakotitalon ja 3000 m² maatalousrakennuksen lämmöneristeille. Niiden avulla lämmöneristeen valinnasta johtuvia ympäristövaikutuksia pystytään vertailla. Työssä lasketaan erilaisilla hyväksyttävillä menetelmillä lämmönläpäisykerroin tyypilliselle yläpohjarakenteelle ja tuloksia verrataan aikaisempien tutkimusten pohjalta laskettuihin todellisia olosuhteita vastaaviin arvoihin. U-arvot lasketaan EN-standardien, RIL:n suunnitteluohjeen ja COMBI-hankkeen tuloksista johdettujen arvojen mukaisesti. COMBI-hankkeen tulokset kuvaavat todellisia yläpohjan olosuhteita.

Selluvillan ympäristövaikutukset ovat huomattavasti pienemmät kuin mineraalivilloilla. Tämä näkyy pienenä hiilijalanjälkenä. Selluvilla on myös ainut puhallettava lämmöneriste, joka sitoo hiiltä ja jolla on hiilikädenjälki. Tulokset osoittavat, että EN-standardien mukainen mitoitus antaa huomattavasti todellista tilannetta paremmat U-arvot kaikille puhallettaville lämmöneristeille. Sisäinen konvektio alkaa monien tutkimusten mukaan jo pienillä lämpötilaeroilla ja kerrospaksuuksilla. RIL:n suunnitteluohjeen mukainen mitoitus on pienemmän ilmanläpäisevyyden omaavalla selluvillalla lähes todellisia tilanteita vastaava. Suuremman ilmanläpäisevyyden omaavan lasivillan tapauksessa ohje antaa liian pieniä lämmönläpäisykertoimia. Lasivillalla myös eristekerroksen pintaan vaikuttava ilmavirtaus lisää huomattavasti lämpövirtaa eristeen läpi.

U-arvon laskenta on jatkossa suositeltavaa tehdä RIL:n suunnitteluohjeen mukaisesti. Ohjeessa otetaan ilmanläpäisevyys huomioon lisäterminä. Tulosten mukaan lisätermin

kerroin on suurilla ilmanläpäisevyyksillä riittämätön. Hyväksyttävässä lämmönläpäisykerroimen laskennassa tulisi aina ottaa ilmanläpäisevyys huomioon erityisesti Suomen kaltaisissa kylmissä ilmasto-oloissa.

Asiasanat: Puhallettavat lämmöneristeet, ilmanläpäisevyys, lämmönläpäisykerroin, U-arvo, konvektio

ABSTRACT

Thermal properties and design of loose-fill insulated roofs

Santeri Hast

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Master's thesis 2022, 95 pp.

Supervisors at the university: Antti Niemi and Filip Fedorik

The purpose of the work is to find out the thermal properties of the loose-fill insulated roofs. The calculation of the carbon footprint and carbon handprint, which will be mandatory for the construction project, will be carried out in 140 m² for the heat insulation of the detached house and 3000 m² for the agricultural building. They make it possible to compare the environmental impacts of heat insulation selection. The work is calculated using different acceptable methods to calculate the heat permeability factor for the typical superstructure and the results are compared to the actual values calculated from previous studies. U-values shall be calculated in accordance with EN-standards, RIL design guidelines and values derived from the results of the COMBI-project. The results of the COMBI-project reflect the real conditions of the loose-fill insulated roofs.

The environmental impact of wood fibre insulation is significantly lower than mineral wools. This can be seen as a small carbon footprint. Wood fibre insulation is also the only loose-fill insulation that binds carbon and has a carbon handprint. The results show that design according to EN-standard gives significantly better U-values than the actual situation for all loose-fill insulations. According to many studies, internal convection begins with small temperature differences and layer thicknesses. The design according to the RIL design guidelines is almost equivalent to the actual situation for loose-fill insulations with a lower air transmittance. Materials with a greater air transmittance like glass wool, the instructions provide too small heat transmittance factors. In glass wool, the air flow affecting the surface of the insulation layer also significantly increases the heat flow through the insulation.

In the future, it is recommended to calculate the U-value according to RIL's design instructions. In the instructions, air permeability is taken into account as an additional term. According to the results, the coefficient of the additional term is insufficient for greater air permeability. Air permeability should always be taken into account in an acceptable heat transfer coefficient calculation, especially in cold climates like Finland.

Keywords: loose-fill insulation, air permeability, heat permeability, U-value, convection

ALKUSANAT

Työn tarkoituksena on perehtyä yläpohjaan puhallettavien lämmöneristeiden lämpötekniisiin ominaisuuksiin ja suunnitteluun. Lämmönläpäisykertoimen laskenta on muuttunut suunnittelijasta riippuvaisemmaksi EN-standardien mukaiseen mitoitukseen siirryttäessä, mikä on johtanut laskennan ja todellisten olosuhteiden väliseen epäjohtonmukaisuuteen.

Työ kirjoitettiin Villax Oy:n tarjoamasta mielenkiintoisesta aiheesta vuoden 2022 aikana. Haluankin kiittää Teroa ja Mikaa alan saloihin perehdyttämisestä. Kiitokset myös ohjaajilleni Antti Niemelle ja Filip Fedorikille sekä koko konetekniikan osastolle. Haluan kiittää myös Formula Student Oulua mukaansa tempaavasta ja opettavaisesta opiskelijatoiminnasta.

Tärkeimpänä haluan kiittää rakasta vaimoani, joka jaksoi tukea ja kannustaa koko opiskeluajan. Huhtikuussa syntynyt esikoisemme on tuonut uudenlaista iloa elämäämme, ja diplomityön kirjoittaminen on antanut ainutlaatuisen mahdollisuuden seurata pienen miehen kehitystä vierestä.

Seinäjoki, 8.12.2022

Santeri Hast

Santeri Hast

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 JOHDANTO.....	13
1.1 Työn tarkoitus	14
1.2 Rajaukset	15
2 Lämmön siirtyminen	16
2.1 Johtuminen	16
2.2 Säteily.....	18
2.3 Konvektio.....	23
3 Lämmöneristeen tehtävät	27
3.1 Lämmöneristys	27
3.2 Ääneneristys	28
3.3 Paloturvallisuus	30
4 Lämmöneristeen ominaisuudet	32
4.1 Hygroskooppisuus	32
4.2 Lämpökapasiteetti	34
4.3 Ilmavirtaukset ja konvektio eristeessä.....	34
5 Puhallettavat eristeet	36
5.1 Mineraalivilla	37
5.1.1 CE-merkintä.....	39
5.2 Puukuitueriste.....	40
5.2.1 CE-merkintä.....	41
6 Yläpohjan energiatekninen suunnittelu	43
6.1 Lämmöneristysten suunnittelu	44
6.2 Yläpohjan olosuhteet.....	45
6.2.1 Ilmavirtaukset ja konvektio tuuletustilassa.....	46
6.2.2 Kosteus	47
7 Vähähiilinen rakentaminen	49
7.1 Elinkaariarviointi.....	50
7.2 Hiilijalanjälki.....	51
7.3 Hiilikädenjälki	53

8 Lämmönläpäisykertoimen laskenta.....	55
8.1 SFS-EN-standardien mukainen laskenta.....	55
8.1.1 Lämmönjohtavuuden suunnitteluarvon määrittäminen	55
8.1.2 Lämmönläpäisykertoimen laskenta	60
8.1.3 Lämmönläpäisykertoimen korjaukset.....	64
8.2 RIL 225-2004 mukainen laskenta	68
8.2.1 Lämmönjohtavuuden suunnitteluarvon määrittäminen	68
8.2.2 Lämmönläpäisykertoimen laskenta ja korjaukset.....	70
8.3 COMBI- ja FRAME-hankkeiden tutkimustulokset	73
9 Tulokset.....	79
9.1 Vähähiilisyyden arviointi	79
9.2 U-arvot	80
10 Johtopäätökset ja suositukset	85
11 Yhteenveto	88

LÄHDELUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

A	Pinta-ala [m ²]
A _f	Yhden kiinnikkeen poikkipinta-ala [m ²]
c	Ominaislämpökapasiteetti [J/kg·K]
c	Valon nopeus tyhjiössä [m/s]
c _p	Ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa [J/kg·K]
c _{pa}	Ilman ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa [J/kg·K]
C	Spektripainotusermi, raide- ja lentoliikenne [dB]
C _{jalanjälki}	Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki [kgCO ₂ e]
C _{kädenjälki}	Rakennuksen elinkaaren hiilikädenjälki [kgCO ₂ e]
C _{tr}	Spektripainotusermi, tieliikenne [dB]
D _{nT}	Äänitasoero [dB]
D _{nT,w}	Äänitasoeroluku [dB]
d	Paksuus [m]
d _o	Kiinnikkeen ympärillä olevan lämmöneristyskerroksen paksuus [m]
d _l	Lämmöneristyskerroksen läpäisevän kiinnikkeen pituus [m]
E	Kvantin energia [J]
E _b	Mustan pinnan säteilytysvoimakkuus [W/m ²]
E _{bλ}	Mustan pinnan spektrinen säteilytysvoimakkuus [W/m ² ·μm]
F _a	Vanhenemismuunnos [-]
F _m	Kosteusmuunnos [-]
F _T	Lämpötilamuunnos [-]
f	Säteilyn taajuus [Hz]
f	Äänentaajuus [Hz]
f	Vuotokerroin, mistä selviää osuus sademäärästä, joka saavuttaa vedeneristysmateriaalin [-]
f _m	Pinta-alaosuus [-]
f _t	Lämpötilan muuntokerroin [1/K]
f _u	Kosteuden muuntokerroin [-]
f _ψ	Kosteuden muuntokerroin [-]
GWP	Global Warming Potential [kgCO ₂ e]
g	Maan vetovoiman kiihtyvyys [m/s ²]

h	Planckin vakio [Js]
h_c	Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin [$W/m^2 \cdot K$]
K	Boltzmannin vakio [J/K]
M	Säteilemisvoimakkuus [W/m^2]
m	Rakenteen massa [kg/m^2]
Nu	Nusseltin luku [-]
n_f	Kiinnikkeiden määrä neliömetrille [-]
P	Säteilyteho [W]
P	Paine [N/m^2]
p	Lämmityskauden keskimääräinen sademäärä, joka perustuu sijaintiin liittyviin tietoihin (esimerkiksi sääasema) tai annettuun paikallisiin, alueellisiin tai kansallisiin määräyksiin tai muihin kansallisiin asiakirjoihin tai standardeihin [mm/vrk]
R	Lämmönvastus [$m^2 \cdot K/W$]
R	Rakenteen ilmaääneneristävyyys [dB]
R_{a_m}	Modifioitu Rayleighin luku [-]
R_g	Ilmakerroksen lämmönvastus [$m^2 \cdot K/W$]
R_I	Ilmaa läpäisevän eristekerroksen lämmönvastus [$W/m^2 \cdot K$]
R_j	Ekvivalentti lämmönvastus [$m^2 \cdot K/W$]
R_{se}	Ulkopuolinen pintavastus [$m^2 \cdot K/W$]
R_{si}	Sisäpuolinen pintavastus [$m^2 \cdot K/W$]
R_{tot}, R_T	Kokonaislämmönvastus [$m^2 \cdot K/W$]
$R_{tot,lower}$	Kokonaislämmönvastuksen alalikiarvo [$m^2 \cdot K/W$]
$R_{tot,upper}$	Kokonaislämmönvastuksen ylälikiarvo [$m^2 \cdot K/W$]
$R_{T,h}$	Kylmäsiltoja huomioimaton rakenneosan kokonaislämmönvastus [$m^2 \cdot K/W$]
R_w	Ilmaääneneristävyyysluku, laboratoriomittaus [dB]
R'_w	Ilmaääneneristävyyysluku, mittaus rakenteessa [dB]
R_1	Ilmarakojen sisältävän kerroksen lämmönvastus [$m^2 \cdot K/W$]
R_1	Kiinnikkeen ympärillä olevan lämmöneristyskerroksen lämmönvastus [$m^2 \cdot K/W$]
R_1	Lämmönvastus vedeneristeen yläpuoliselle lämmöneristeelle [$m^2 \cdot K/W$]
q	Lämpövirran tiheys [W/m^2]

q_{conv}	Konvektiivinen lämpövuon tiheys [W/m^2]
T	Lämpötila [K]
T_0	Ympäristön lämpötila [K]
T_a	Väliaineen lämpötila [K]
T_s	Materiaalin pinnan lämpötila [K]
U	Lämmönläpäisykerroin [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]
U_c	Korjattu lämmönläpäisykerroin [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]
ΔU	Lämmönläpäisykerroimen korjaustekijä [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]
ΔU_a	Ilmanläpäisevyyden korjaustekijä [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]
ΔU_f	Mekaanisten kiinnikkeiden korjaustekijä [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]
ΔU_g	Ilmarakojen korjaustekijä [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]
ΔU_r	Käännettyjen kattojen korjaustekijä [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]
$\Delta U_a''$	ilmanläpäisevyyden vaikutuksen korjauskerroin [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]
$\Delta U''$	Ilmaraon korjauskerroin [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]
$\Delta U_{\psi X}$	Kylmäsiltojen korjaustekijä [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]
V	Tilavuusvirta [m^3/s]
x	Kerroin vedeneristeelle päässeän veden aiheuttamalle lisääntyneelle lämpöhäviölle [$(\text{W} \cdot \text{vrk})/(\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{mm})$]
α	Absorbtiokerroin [-]
α	Kiinnikkeestä riippuva kerroin [-]
β	Lämpölaajenemiskerroin [$1/\text{K}$]
ε	Emissiokerroin [-]
η	Dynaaminen viskositeetti [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]
κ	Permeabiliteetti [m^2]
λ	Aallonpituus [m]
λ	Lämmönjohtavuus [$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$]
$\lambda_D, \lambda_{\text{Declared}}$	Lämmönjohtavuuden ilmoitettu arvo [$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$]
λ_{design}	Lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvo [$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$]
$\lambda_{\text{eq};j}$	Ainekerroksen j ekvivalentti lämmönjohtavuus [$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$]
λ_f	Kiinnikkeen lämmönjohtavuus [$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$]
λ_n	Normaalinen lämmönjohtavuus [$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$]
$\Delta \lambda_{\text{hyg}}$	Hygroskooppisen kosteuden vaikutuksen lisäys [$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$]
ν	Kinemaattinen viskositeetti [m^2/s]
ρ	Tiheys [kg/m^3]

ρ	Heijastuskerroin [-]
ρ_a	Ilman tiheys [kg/m ³]
σ	Stefan-Bolzmanningin vakio [W/(m ² ·K ⁴)]
τ	Läpäisykerroin [-]
Φ	Lämpövirta [W]
χ	Paikallinen lämmönläpäisykerroin [W/m ² ·K]

1 JOHDANTO

Rakennusten suunniteltu käyttöikä viidenkymmenen tai sadan vuoden päähän pakottaa meidät ajattelemaan ilmastonmuutoksen aiheuttamia uudenlaisia olosuhteita ja vaatimuksia rakennuksille (Suomen betoniyhdistys 2021, s. 54). Ilmastonmuutos ja ympäristötietoisuus ovat lisänneet merkittävästi myös rakentamisen muutosta. Erityisesti rakennusten energiatehokkuudella voidaan vastata kestävä kehityksen haasteisiin (RIL 249-2015 2015, s. 3). Myös rakennusala koskettavat kansainväliset päästötavoitteet, joiden saavuttamiseksi tulee luoda täysin uudenlaisia rakenneratkaisuja ja rakennusmateriaaleja. Rakennuksille asetetaan entistä tiukempia energiatehokkuusvaatimuksia (RIL 255-1-2014 2014, s. 5). Nykyään pyritäänkin lähes nollaenergiarakennuksiin niin uudisrakentamisessa kuin korjausrakentamisessakin (RIL 249-2015 2015, s. 3). Energiatehokkuuden systemaattinen parantaminen on tiukentanut rakennusosien U-arvovaatimuksia. Vaatimusten tiukentaminen näkyy rakenteiden dimensioiden ja eristekerroksen paksuuden kasvamisella. Lämmönjohtavuuden avulla laskettavasta eristekerroksen paksuudesta onkin muodostunut keskeinen tekijä ulkovaippaa suunniteltaessa (RIL 255-1-2014 2014, s. 27). Lisäksi energian hinnannousu pakottaa ajattelemaan energiatehokkaammin, kun aiemmin sen huomioiminen on jäänyt taka-alalle (Pyly 2014, s. 5).

Ennusteiden mukaan ilmastonmuutos tuo mukanaan myös uudenlaisia haasteita kosteusrasitusten kasvamisen myötä (RIL 255-1-2014 2014, s. 5). Nykyiset ilmastonmuutosennusteet osoittavat, että ulkovaipan rasiitusta koskevat olennaisimmat olosuhteet ovat muuttumassa pääsääntöisesti huonompaan suuntaan. Sademäärät lisääntyvät ja ilmaston lämmitessä erityisesti talvisateet runsastuvat ja muuttuvat vetisemmiksi. Tämä aiheuttaa rakenteiden kastumista juuri silloin, kun kuivumisolosuhteet ovat heikoimmillaan. Kosteus on yksi merkittävimmistä rakenteiden rasiitustekijöistä (Suomen betoniyhdistys 2021, s. 51). Suomen betoniyhdistys (2021, s. 54) tuokin esiin, että rakenteiden kuivuminen on haasteellisempaa tulevaisuuden ilmastossa, sillä ennusteiden mukaan poutaiset jaksot lyhenevät ja pilvisuus lisääntyy. Lisäksi olosuhteet muuttuvat otollisemmiksi kosteuden kondensoitumiselle ja mikrobikasvustojen lisääntymiselle (Suomen betoniyhdistys 2021, s. 54).

Lämmön ja kosteuden eristäminen tulee tehdä erityisellä huolella, sillä näin voidaan saada aikaan mahdollisimman hyvin suunniteltuja ja toimivia sekä kestäviä rakenteita. Valtaosa rakennusten vaurioista syntyykin tutkimusten mukaan kosteuden ja lämmön yhteisvaikutuksesta. Huomionarvoista on, että suurin osa näistä vaurioista syntyy turhaan (Björkholtz 1997, s. 3). Siikanen (2014, s. 3) tuo esiin, että nykyään rakennusten kosteusongelmat ja niiden seuraukset, kuten ilman homepöly ja materiaaleista tulevat sisäilmaan päätyvät päästöt ovat selkeästi korostuneet.

1.1 Työn tarkoitus

Tämän työn tarkoituksena on selvittää puhallettavien eristeiden lämpöteknisiä ominaisuuksia ja niiden kykyä vastata yllä esiteltyihin tulevaisuuden haasteisiin. Aikaisemmin Suomessa käytetty lämmöneristystä koskeva rakennusmääräyskokoelman osa C4 on korvattu eurooppalaisilla tuote- ja suunnittelustandardeilla sekä teknisillä hyväksynnöillä. Tämä asettaa suunnittelijalle uudenlaisia haasteita, sillä Suomen olosuhteet poikkeavat merkittävästi Keski- ja Etelä-Euroopan tilanteista ja rakenneratkaisuista. Suunnittelijalta vaaditaan nykyään itsenäisiä ratkaisuja ja aiemmin virkamiesten hoitamien tehtävien suorittamista. Lämmönjohtavuuden suunnitteluarvon määrittäminen on ollut lämmöneristeelle tyyppihyväksynnän myöntävän virkamiehen tehtävä, mutta nykyään se kuuluu suunnittelijalle. Suunnittelijan tulee päättää rakennusaineen suunnittelulämpötila ja -kosteus. Tehdyt valinnat vaikuttavat siihen, millaisia arvoja suunnittelun lopputuloksena saadaan, sillä uusien lämmöneristysmääräysten täytyminen on mahdollista esittää hyväksyttävästi vaihtoehtoisin tavoin (RIL 225-2004 2005, s. 3–7). Tässä työssä perehdytään tähän ongelmaan osiossa kahdeksan (8) laskemalla lämmönläpäisykertoimet sekä standardien SFS-EN ISO 6946 ja SFS-EN ISO 10456 että RIL 225-2004 soveltamisohjeen mukaan. Lisäksi tuloksia verrataan TTY:llä tehdyn COMBI-hankkeen tuloksista johdettuihin arvoihin.

Etenkin RakMK:n osassa C4 käytettävä normaalin lämmönjohtavuuden λ_n korvaaminen EN-standardeissa käytettyyn ilmoitettuun lämmönjohtavuuteen λ_D , on muuttanut ilmanläpäisevyyden merkityksen lämmöneristävyuden tarkastelussa. Tämä on johtanut käytännössä suuren ilmanläpäisevyyden omaavien tuotteiden laskennallisen tarkastelun huomattavaan parantumiseen tuotteen pysyessä samana.

Ympäristöministeriö on tällä hetkellä valmistelemassa asetusta rakennuksen ilmastaselvityksestä. Sen on määrä tulla voimaan vuoteen 2025 mennessä. Kappaleessa seitsemän (7) käsitellään rakennuksen hiilijalan- ja hiilikädenjäljen elinkaariarviointia ja tuloksissa vertaillaan puhallettavien eristeiden laskennallisia arvoja.

1.2 Rajaukset

Työssä lasketaan tulevan ilmastaselvityksen mukainen rakennuksen elinkaaren hiilijalan- ja hiilikädenjälki yläpohjan eristeille ja lämmönläpäisykertoimet eri laskentatapojen mukaan. Laskenta suoritetaan 140 m² omakotitalolle sekä 3000 m² maatalousrakennukselle. Omakotitalon laskelmat suoritetaan 450 mm ja 600 mm eristepaksuuksille ja maatalousrakennuksen 300 mm ja 400 mm eristepaksuuksille. COMBI-hankkeessa koetulokset saatiin 300 mm ja 600 mm eristepaksuuksille, joten vertailutulokset saadaan vain näille paksuuksille.

2 LÄMMÖN SIIRTYMINEN

Rakentamisesta puhuttaessa lämmöllä yleensä tarkoitetaan rakennusten lämmittämiseen ja ihmisen hyvinvointiin tarvittavaa lämpöä ja sen tuottamista. Kuitenkin viime vuosina pinnalle noussut ilmastonmuutos ja kasvihuoneilmiö on globaalisti kytketty lämmön tuottamiseen, jonka seurauksena huomiota on kiinnitetty energiankulutuksen pienentämiseen ja uusiutuviin energialähteisiin. (Siikanen 2014, s. 40)

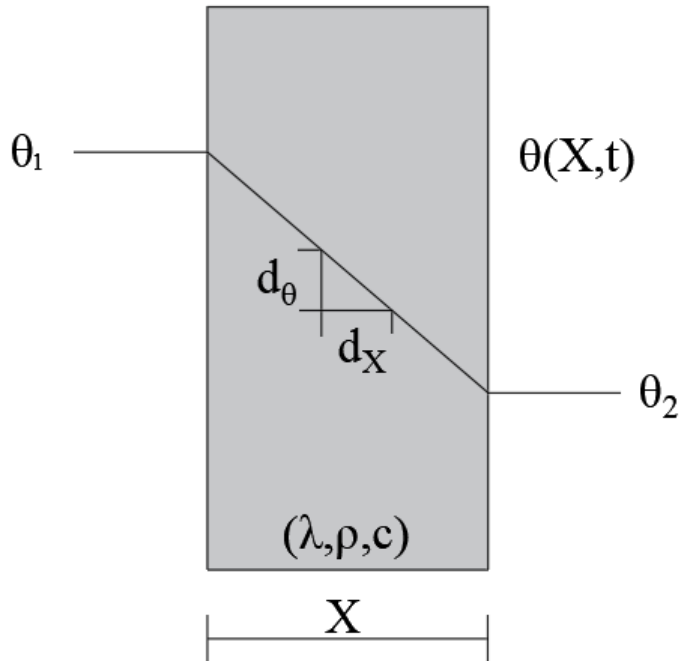
Lämpö on atomien ja molekyylien liike-energiaa. Lämpö voi siirtyä rakenteessa kolmella eri mekanismilla: johtumalla, säteilemällä ja konvektion avulla (Siikanen 2014, s. 40). Kiinteässä aineessa lämpö siirtyy johtumalla. Kaasuissa ja nesteissä lämpö voi siirtyä sekä lämpötilaeroista johtuvasta vapaasta konvektiosta että ulkoisesta voimasta, kuten pumpusta tai tuulettimesta syntyvästä pakotetusta konvektiosta (Hautala & Peltonen 2008, s. 165).

2.1 Johtuminen

Lämmön johtuessa kiinteässä aineessa kappaleen kuumassa osassa nopeammin värähtelevien molekyylien voidaan ajatella törmäävän ja siirtävän liike-energiaa kappaleen viileämmässä osassa oleviin hitaammin värähteleviin molekyyliin. Värähdysliikkeen kasvu tarkoittaa myös lämpömäärän kasvua (Inkinen & Tuohi 1999, s. 409). Materiaalin jokainen atomi värähtelee lepoasemansa värähtelysäteen ympärillä. Lepoasema on atomin positio $-273,15$ °C:ssa (Mankel 2018, s.14). Lämpötilaerot väliaineessa pyrkivät aina tasaantumaan virtaamalla kuumemmasta kylmempään päin. Lämpö voi siirtyä johtumalla kiinteissä aineissa ja nesteessä (Siikanen 2014, s. 40). Hall ja Allison (2010, s. 9) lisäävät vielä kaasun edellisten jatkoksi. Kuvassa 1 on esitetty yleinen lämmön johtumisen yhtälö (1) Fourierin lain mukaan, mikä kuvaa lämmön johtumista materiaalikerroksen läpi yksiulotteisessa tapauksessa (Mankel 2018, s.14):

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (1)$$

missä ρ on tiheys [kg/m^3],
 c on aineen ominaislämpökapasiteetti [$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$],
 T on lämpötila [K] ja
 λ on kappaleen materiaalin lämmönjohtavuus [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$].



Kuva 1. Lämmön johtuminen Fourierin lain mukaan (mukaillen Mankel 2018).

Lämmönjohtavuus λ on materiaalikohtainen lämmönjohtavuusominaisuuksia kuvaava kerroin. Lämmönjohtavuus määrittää, kuinka paljon lämpöenergiaa kulkeutuu kuljettaessa yhden pituusyksikön paksuisen materiaalikerroksen läpi lämpötilaeron ollessa yhden kelvinin suuruinen. Lämmönjohtavuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat tiheys, kosteus ja lämpötila (Mankel 2018, s.14).

Materiaalissa siirtyvän lämpöenergian nopeus riippuu materiaalin ominaisuuksista (Björkholtz 1997, s. 12; Inkinen & Tuohi 1999, s. 409). Inkisen ja Tuohin (1999, s. 410) mukaan materiaalit, joissa on paljon vapaita elektroneja, kuten metallit, ovat hyviä lämmönjohteita. Paljon vapaita elektroneja sisältävässä materiaalissa lämmön johtuminen tapahtuu sekä atomien värähtelyn että elektronien liikkeen seurauksena. Kaasuissa hiukkasten väliset etäisyydet toisistaan ovat suuret, jonka vuoksi ne eivät johda hyvin lämpöenergiaa. Stationaariselle lämpövirralle tasomaisen ainekerroksen läpi on kokeellisesti saatu lauseke:

$$\Phi = -\lambda A \frac{\Delta T}{d}, \quad (2)$$

missä Φ on lämpövirta [W],
 ΔT on kappaleen yli vallitseva lämpötilaero [K],
 d on kappaleen paksuus [m] ja
 A on rakenteen pinta-ala [m²].

Rakennustuotteiden lämpötekniisiä ominaisuuksia arvioitaessa käytetään myös lämpövirran tiheyttä, koska pinta-ala ei ole määrittävä tekijä. Lämpövirran tiheys q , voidaan laskea kaavalla (3) (Inkinen ja Tuohi 1999, s. 412):

$$q_x = \frac{\Phi}{A} = \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\lambda(T_1 - T_2)}{d}, \quad (3)$$

missä q on lämpövirran tiheys [W/m²] ja
 $T_1 - T_2$ on lämpötilaero kappaleen eri puolilla [K].

Lämpötila voi vaihdella kaikissa kolmessa suunnassa samanaikaisesti. Jos vektorit x , y ja z tiedetään, voidaan samanaikaiset lämpövirrat kussakin ulottuvuudessa kirjoittaa yleiseen muotoon (Hall ja Allison 2010, s. 9):

$$q = -\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \lambda \frac{\partial T}{\partial y}, \lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right) = -\lambda \nabla T. \quad (4)$$

2.2 Säteily

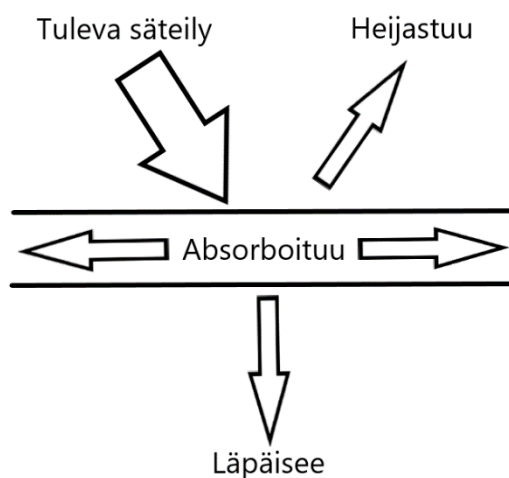
Energian siirtyminen säteilemällä tapahtuu sähkömagneettisen säteilyn avulla, jonka energia on peräisin molekyylien ja atomien lämpövärähtelyistä. Säteily eroaa muista lämmönsiirtymismekanismeista, koska se ei tarvitse siirtyäkseen mitään väliainetta. Tämä on havaittavissa esimerkiksi avaruuden tyhjiön läpi kulkevasta auringon energiasta. Kaikki kappaleet emittoivat eli lähettävät säteilyä, kun niiden lämpötila on absoluuttista nollapistettä (0 K) korkeampi (Inkinen & Tuohi 1999, s. 418). Kappaletta, joka lähettää tai vastaanottaa säteilyenergiaa kutsutaan emittoijaksi. Mitä enemmän materiaalin atomeissa tai molekyylyissä on kineettistä energiaa, sitä suurempi on materiaaleista säteilevä energia (Mankel 2018, s.16). Kappaleeseen siirtyy lämpöä, jos säteilyenergia absorboituu toiseen kappaleeseen (Hautala & Peltonen 2008, s. 174).

Auringosta, jonka keskimääräinen lämpötila on 6000 K, tulevalla säteilyllä on paljon lyhyempi aallonpituus kuin tyypillisissä maanpäällisissä lämpötiloissa olevalla kappaleella ja siksi sitä kutsutaankin lyhytaaltoiseksi säteilyksi. Tämä on hyödyllinen eroavaisuus, koska materiaalin aallonpituudesta riippuva käyttäytyminen lämpösäteilyssä voidaan jakaa lyhytaaltoiseen ja pitkäaaltoiseen säteilyyn. (Hall ja Allison 2010, s. 20)

Inkisen ja Tuohin (1999, s. 420–421) mukaan saksalainen Max Planck (1858–1947) julkaisi vuonna 1900 tutkimuksen koskien mustan pinnan säteilyä. Tutkimuksen tuloksen eivät vastanneet sen aikaisen teoreettisen mallin ennustamaa säteilyjakaumaa varsinkaan lyhyillä aallonpituuksilla. Planck johti uuden koetuloksia vastaavan säteilylain (8), joka johti kvanttiteorian syntyyn. Perusoletuksena käytettiin ajatusta, jossa säteilyenergia syntyy ja häviää vain tietyn kokoisina annoksina eli kvantteina, joiden suuruus saadaan kaavalla (5):

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}, \quad (5)$$

missä E on kvantin energia,
h on Planckin vakio, $6,626 \cdot 10^{-34}$ [Js],
f on säteilyn taajuus [Hz],
c on valon nopeus tyhjiössä [m/s] ja
 λ on aallonpituus [m].



kuva 2. Säteilyn heijastuminen, absorboituminen ja läpäisy pintaan osuessa.

Hall`n ja Allison`n (2010, s. 19) mukaan musta kappale määritellään kappaleeksi, joka absorboi kaiken tulevan säteilyn millä tahansa lämpötilalla ja aallonpituudella. Kuten kuvasta (2) näkyy, todelliset pinnat kuitenkin absorboivat, heijastavat ja saattavat läpäistä lämpösäteilyä lämpötilan ja aallonpituuden mukaan.

Kirchhoffin laki kertoo, että pinnan emittoiman säteilyenergian määrä on oltava yhtä suuri kuin pinnan absorboiman säteilyenergian määrä. Kappaleen materiaaliominaisuuksista kiinnostavat siksi absorptiokerroin (α) tai emissiokerroin (ε), heijastuskerroin (ρ) ja läpäisykerroin (τ), jotka kuvaavat säteilyn absorboituvia, heijastavia ja läpäiseviä osia siten, että kertoimet muodostavat yhtälöt:

$$\varepsilon = \alpha \text{ ja} \tag{6}$$

$$\alpha + \rho + \tau = 1. \tag{7}$$

Vuonna 1879 itävaltalainen Josef Stefan (1835–1893) johti koehavainnoista tuloksen, jonka mukaan termodynaamisen lämpötilan T neljäs potenssi on suoraan verrannollinen säteilyn eksitanssiin eli säteilemisvoimakkuuteen M . Vuonna 1884 Ludvig Boltzmann (1844–1906) johti teoreettisen riippuvuuden, jonka tuloksena syntyi Stefan-Boltzmannin laki ja verrannollisuuskerroin σ , joka on Stefan-Boltzmannin vakio (Inkinen & Tuohi 1999, s. 418). Laki pätee mustaan kappaleeseen (Hautala & Peltonen 2008, s. 176). Täysin mustan pinnan omaava kappale, joka emittoi lämpösäteilyä on ideaalinen rajatapaus, eikä sille ole todellista vastinetta. Kuitenkin esimerkiksi aurinko on nimityksestään huolimatta säteilyominaisuuksiltaan lähes musta kappale. Stefan-Boltzmannin laki voidaan kirjoittaa muotoon (Inkinen & Tuohi 1999, s. 418):

$$M = \sigma T^4, \tag{8}$$

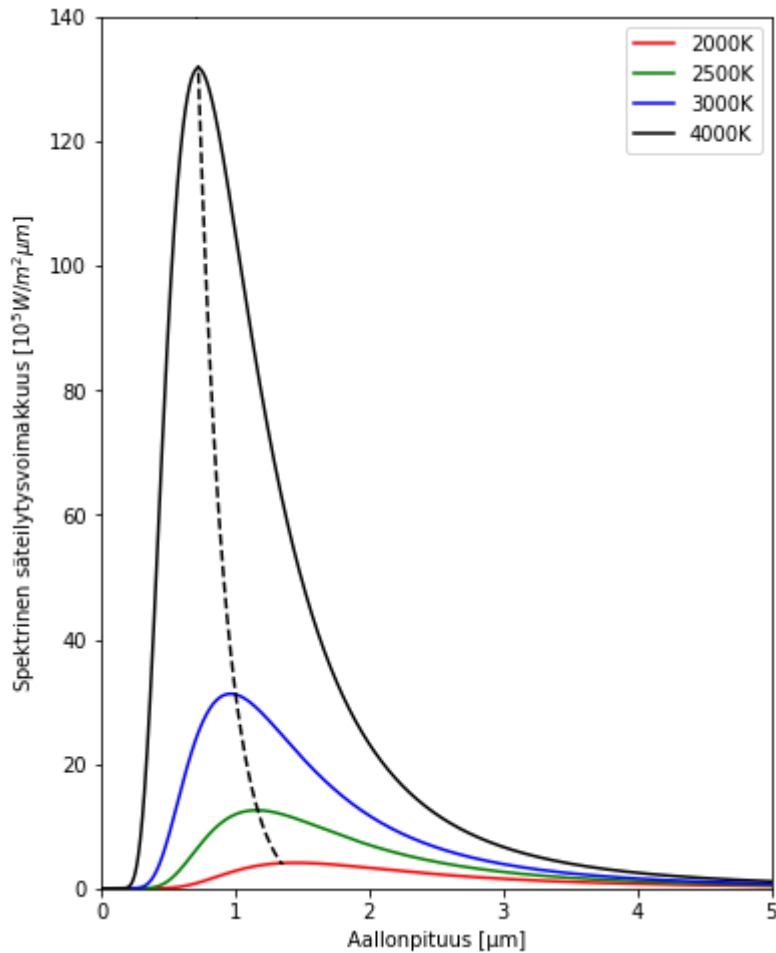
missä M on säteilemisvoimakkuus [W/m^2] ja

σ on Stefan-Boltzmannin vakio, $5,67051 \cdot 10^{-8}$ [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$].

Mustan kappaleen irradianssi eli säteilytysvoimakkuus millä tahansa yksittäisellä aallonpituudella voidaan kuvata mustan pinnan spektrisen emissiotehon jakaumalla tai Planckin lailla muodossa (Hall ja Allison 2010, s. 18):

$$E_{b\lambda} = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5 e^{hc/\lambda kT} - 1}, \tag{9}$$

missä $E_{b\lambda}$ on mustan pinnan spektrinen säteilytysvoimakkuus aallonpituuden funktiona [$\text{W}/\text{m}^2\mu\text{m}$] ja K on Boltzmannin vakio, $1,380649 \cdot 10^{-23}$ [J/K].



Kuva 3. Mustan pinnan emittoima säteily aallonpituuden funktiona.

Kuva (3) esittää mustan pinnan spektrisen säteilytysvoimakkuuden $E_{b\lambda}$ aallonpituuden funktiona neljässä eri lämpötilassa. Säteilytysvoimakkuus tietyssä lämpötilassa saadaan laskemalla aallonpituusakselin ja mustan pinnan kyseisen lämpötilan emissioikäyrän väliin jäävä pinta-ala. Näin ollen mustan pinnan säteilytysvoimakkuus E_b saadaan integroimalla Planckin lakia aallonpituuden arvoilla nolasta äärettömään ja yhdistämällä kaavat (6–9) saadaan:

$$\int_0^{\infty} E_{b\lambda} d\lambda = E_b = M = \sigma T^4, \quad (10)$$

Kuvassa (3) esiintyvä katkoviiva kuvaa jakauman maksimikohdan siirtymistä lyhyempiä aallonpituuksia kohti lämpötilan kasvaessa. Säteilevän pinnan lämpötilan (T) ja vastaavan aallonpituuden maksimikohdan (λ_{\max}) yhteyttä kutsutaan Wienin siirtymäläiksi ja se voidaan laskea yhtälöllä (11) (Inkinen & Tuohi 1999, s. 422):

$$\lambda_{\max}T = 2898 \mu\text{m} * K. \quad (11)$$

Myös pinnan luonne vaikuttaa säteilytehoon. Säteilevän pinnan emissiokerroin (ϵ) saa arvoja 0...1. Emissiokerroin saadaan laskemalla todellisen pinnan säteilytehon ja samassa lämpötilassa ja pinta-alaltaan samankokoisen mustan pinnan säteilytehon suhde (Inkinen & Tuohi 1999, s. 419). Rakennusfysiikassa voidaan suuremmitta virheittä käyttää Kirchhoffin lakia olettaen, että emissiokerroin on yhtä suuri kuin absorptiokerroin ($\alpha = \epsilon$), jolloin puhutaan harmaasta kappaleesta. Kirchhoffin lakia ei kuitenkaan voida soveltaa auringon säteilyyn, koska aurinko säteilee lyhyillä aallonpituuksilla. Materiaalien absorptio- ja emissioikäytyminen on erilaista lyhyt- ja pitkäaaltoisella säteilyllä, joten $\alpha \neq \epsilon$ (Mankel 2018, s. 16). Kaavalla (12) saadaan todellisen kappaleen emittoima säteilyteho (Inkinen & Tuohi 1999, s. 419):

$$P = \epsilon\sigma AT^4, \quad (12)$$

missä P on säteilyteho [W].

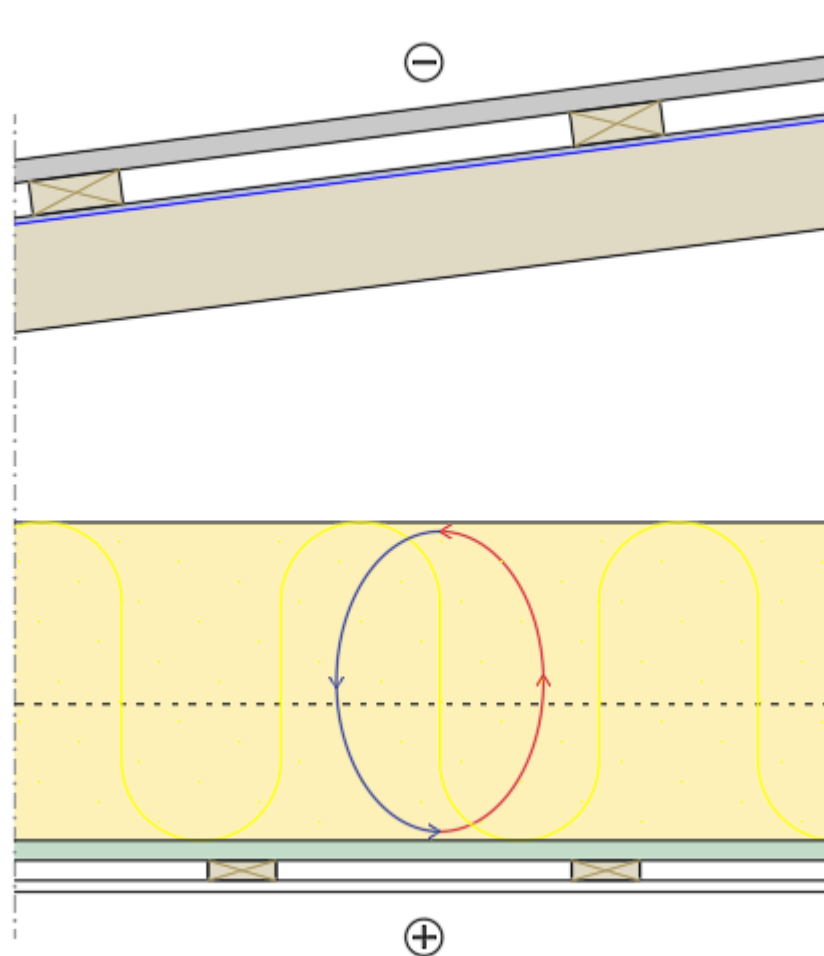
Kappaleen täytyy myös absorboida ympäristönsä lämpösäteilyä, jottei se emittoisi kaikkea energiaansa yhtälön (12) mukaisesti. Jos kappale säteilisi kaiken energiansa pois, sen lämpötila laskisi absoluuttiseen nollapisteseen. Kappaleen ollessa termisessä tasapainossa ympäristönsä kanssa, se absorboi ja emittoi saman verran säteilyenergiaa tietyssä ajassa. Kappaleen lämpötilan ollessa ympäristöä korkeampi, säteilee kappale ympäristöönsä energiaa nettoteholla (Inkinen & Tuohi 1999, s. 420):

$$P = \epsilon\sigma A(T^4 - T_0^4), \quad (13)$$

missä T_0 on ympäristön lämpötila.

2.3 Konvektio

Konvektio on lämmön siirtymistä kaasun tai nesteen virtauksen mukana. Konvektio voidaan jakaa luonnolliseen ja pakotettuun konvektioon. Luonnollinen konvektio johtuu lämpötilaerojen aiheuttamista tiheyseroista. Pakotettu konvektio sen sijaan johtuu siitä, että kaasu tai neste liikkuu ulkopuolisen voiman vaikutuksesta. Tällaisina voimina voivat toimia sisätiloissa esimerkiksi ilmanvaihdossa käytettävät puhaltimet sekä ihmisten liikkeet ja ulkona tuuli. Useimmiten konvektio esiintyy kuitenkin pakotetun ja luonnollisen konvektion yhdistelmänä ja rakenteissa esiintyy harvoin puhtaasti luonnollista konvektiota. Jos yläpohja on hatara, voi konvektion eli ilmavirtausten mukana siirtyä suuria määriä lämpöä ulos. Tätä karannutta ilmaa vastaava määrä korvautuu ulkoilmalla, jonka lämmittämiseen kuluu energiaa. (Björkholtz 1997, s. 13)



Kuva 4. Konvektiovirtaus yläpohjan eristeessä.

Lämmönsiirto konvektion kautta tapahtuu, kun kappaleen lämpöenergia siirtyy välittäjäaineeseen, kuten esimerkiksi ilmaan tai vastaavasti välittäjäaineen lämpöenergiaa välittyy kappaleeseen. Lämmönlähteen lämmittäessä ilman molekyylejä ne alkavat liikkua. Kuumennetun ilman tiheys pienenee tilavuuden kasvaessa ja se alkaa nousta. Lämpimän ilman noustessa se alkaa jäähtyä luovuttaessaan lämpöenergiaa ympärilleen. Jäähtymisen aikana tilavuus pienenee, jolloin kylmä ilma alkaa laskeutua tiheyden kasvaessa ja tilavuuden pienentyessä. Prosessi aiheuttaa jatkuvan vastavuoroisen virtauksen, mikä on nähtävissä kuvassa (4) (Mankel 2018, s.15). Nusseltin luvulla voidaan laskea kasvanut lämpövirta (Hagentoft 2001, s. 62):

$$Nu = \frac{q_{with\ convection}}{q_{without\ convection}}, \quad (14)$$

missä Nu on Nusseltin luku,

$q_{with\ convection}$ on lämpövirran tiheys konvektion kanssa ja

$q_{without\ convection}$ on lämpövirran tiheys ilman konvektiota.

Nusseltin luku riippuu modifioidusta Rayleighin luvusta Ra_m , joka saadaan kaavalla 15 (Hagentoft 2001, s. 62):

$$Ra_m = \frac{\rho_a c_{pa} * g * \beta * d * k * \Delta T}{v * \lambda}, \quad (15)$$

missä ρ_a on ilman tiheys [kg/m³],

c_{pa} on ilman lämpökapasiteetti vakiopaineessa [J/kg·K],

β on ilman lämpölaajenemiskerroin [1/K],

ΔT on lämpötilaero lämmöneristeen pintojen välillä [K],

d on lämmöneristeen paksuus [m],

κ on lämmöneristeen permeabiliteetti [m²],

v on ilman kinemaattinen viskositeetti [m²/s] ja

λ on lämmöneristeen lämmönjohtavuus ilman konvektiota [W/m·K].

Konvektiivisen lämpövuon tiheys kappaleen ja kaasumaisen tai nestemäisen väliaineen välillä riippuu virtaavan väliaineen lämpötilasta ja kappaleen pinnan lämpötilasta. Lisäksi kappaleen pinnan karheus ja virtaavan väliaineen nopeus vaikuttavat huomattavasti lämmönsiirtoon (Mankel 2018, s.15). Kaavalla (16) voidaan laskea

konvektiivinen lämpövuon tiheys q_{conv} [W/m^2] Newtonin lain avulla (Gaskell 2012, s. 296):

$$q_{conv} = h_c(T_s - T_a), \quad (16)$$

missä h_c on konvektiivinen lämmönsiirtokerroin [$W/m^2 \cdot K$],
 T_s on materiaalin pinnan lämpötila [K] ja
 T_a on väliaineen lämpötila [K].

Konvektiivisen lämmönsiirtokerroimen arvo riippuu kappaleen pinnan muodosta ja suunnasta, pinnan karheudesta, nesteen viskositeetista, nesteen vapaan virran nopeudesta ja suunnasta sekä välittäjäaineen ja kappaleen pinnan lämpötiloista. Nämä määrittävät, onko pinnan ylittävä virtaus vapaata vai pakotettua, laminaarista vai turbulentiasta tai näiden yhdistelmä. Konvektiivisen lämmönsiirtokerroimen laskuun on otettu käyttöön yksinkertaistettuja empiirisiä menetelmiä virtausdynamiikan monimutkaisuuden takia. (Hall & Allison 2010, s. 15)

Huokoisissa materiaaleissa lämpötilaerot voivat aiheuttaa konvektiovirtauksia ainekerroksissa. Ilmavirtauksen voimakkuuteen vaikuttavat muun muassa lämpötilaero, lämmöneristekerroksen paksuus ja kerroksen suunta (Hagentoft 2001, s. 62). Myös huokoisissa materiaaleissa tapahtuu konvektiovirtausten aiheuttamaa lämmönsiirtymistä, ja juuri konvektion rajoittaminen antaa eristemateriaaleille alhaiset lämmönsiirto-ominaisuudet. Eristemateriaalin kokonaislämmönjohtavuus λ_{total} on kvantifioitu suhteessa lämpövirtaan stationääritilassa tunnetulla keskilämpötilalla. Näin ollen eristysmateriaalin läpi tapahtuvan lämmönsiirtymisen ensisijaisilla tavoilla voidaan katsoa olevan kumulatiivinen vaikutus määrittäessä kokonaislämmönjohtavuutta. Lämmönsiirtymismuodot tyypillisessä huokoisessa eristemateriaalissa voidaan kuvata seuraavasti (Hall & Allison 2010, s. 16):

$$\lambda_{total} = \lambda_{solid} + \lambda_{fluid} + \lambda_{rad} + \lambda_{conv}, \quad (17)$$

missä λ_{solid} on johtuminen kiinteän materiaalin läpi,
 λ_{fluid} on johtuminen nesteen tai kaasun läpi huokosissa,
 λ_{rad} on säteily huokosten sisäpintojen välillä ja
 λ_{conv} on luonnollinen konvektio huokosten nesteen tai kaasun kautta.

Rakennusfysiikassa neste tai kaasu voi olla ilmaa, vesi-ilmaseosta tai vettä, jolloin nesteen määrä voi vaihdella merkittävästi ja lämpöenergia voi kulkea myös latenttimuodossa veden höyrystymisen tai kondensoitumisen vuoksi. Tällä voi olla merkittäviä vaikutuksia materiaalin eristyskykyyn ja se korostaa eristeiden tarvetta pysyä kuivina, jotta ne olisivat mahdollisimman tehokkaita. Perinteisissä eristysmateriaaleissa, joiden huokosten halkaisija on yli 1 mm, konvektiivisen lämmönsiirron määrä voi muodostaa merkittävän osan kokonaislämmönjohtavuudesta standardilämpötilassa ja -paineessa. Huokosten halkaisijoiden pienentyessä toisiinsa liittyvät reitit huokosten välillä muuttuvat mutkikkaammiksi. Tämä rajoittaa nesteen liikettä tehden konvektiosta vähemmän vallitsevan ja lepotilassa olevan nestefaasin lämmönjohtavuudesta tulee rajoittava tekijä. Olettaessa huokosten olevan täynnä ilmaa saadaan ilman lämmönjohtavuudeksi lepotilassa noin 0,026 W/mK. Jos huokokset ovat tarpeeksi pieniä, voidaan olettaa $\lambda_{\text{conv}} = 0$. (Hall & Allison 2010, s. 16)

3 LÄMMÖNERISTEEN TEHTÄVÄT

Lämmöneriste on sellainen rakennusaine, jonka pääasiallinen tai muun tarkoituksen ohella oleva käyttötarkoitus on lämmöneristäminen (Siikanen 2014, s. 49). Sitä käytetään estämään lämmön siirtyminen rakenteen puolelta toiselle. Lämmöneristyskyky erilaisilla lämmöneristeillä voi perustua yhteen tai useampaan eri tekijään. Yksi merkittävimpiä tekijöitä on eristeessä paikallaan olevan ilman alhainen lämmönjohtavuus. Lisäksi lämpötilan muutos voi vaikuttaa merkittävästi lämmönjohtavuuteen, sillä lämpötilan laskiessa myös lämmönjohtavuus alenee. Tämä johtuu siitä, että myös muilla kaasuilla kuin ilmalla lämmönjohtavuus pienenee samalla, kun lämpötila laskee (RIL 255-1-2014 2014, s. 260). Lämmöneristeen ominaisuudet muuttuvat ympäröivän lämpötilan ja kosteusolosuhteiden mukaan. Lämmöneristeen ominaisuuksien huomioiminen onkin tärkeää etenkin ulkovaipassa, kuten yläpohjassa, koska lämpö- ja kosteusolosuhteet vaihtelevat Suomen ilmastossa huomattavasti. Lämmöneristeen ominaisuudet mitataan kuitenkin pääosin vain tietyssä lämpötilassa ja suhteellisessa kosteudessa (Vinha ym. 2005, s. 3–15).

3.1 Lämmöneristys

Lämmöneristys on rakennusosaan tehty eristekokonaisuus, joka on voitu tehdä yhdestä tai useammasta kerroksesta. Tavallisimmat lämmöneristeet ovat kevytbetoni, kevytsora, kevytsorabetoni, koksikuona, korkkilevy, kutterinlastu, lastuvillalevy, masuunikuona, mineraalivilla, kivivilla, lasivilla, kuonavilla, silikaattivilla, polystyreenisolumuovi, polyuretaanisolumuovi, puhallusvilla, puukuitueristeet, sahanpuru ja solulasi (Siikanen 2014, s. 49). Rakennusinsinööriliiton RIL 255-1-2014 (2014 s. 260) mukaan myös rakenteen rakennusosa tai massiivinen kantava runko rakennuksessa voi toimia lämmöneristeenä. Tällaisia materiaaleja ovat esimerkiksi tiili, kevytbetoni tai hirsi.

Eristekuidut sitovat ja siten pidättävät paikallaan ilmaa. Näin saadaan aikaan lämpöä eristävä kerros (Romppainen 2010, s. 19). Lämmön siirtyminen huokoisessa materiaalissa muodostuu lämmön johtumisesta kiinteässä materiaalissa ja ilmassa, konvektiosta ja kiinteiden materiaalien välisestä ja sisäisestä säteilystä. Ilmaa läpäisevissä materiaaleissa lämmönsiirtyminen voi lisääntyä sisäisen konvektion vaikutuksesta. Näiden mekanismien suuruudet ja vaikutukset toisiinsa riippuvat materiaaliominaisuuksista ja materiaalien rakenteista (Hagentoft 2001, s. 60).

Rakennusta eristettäessä tulee valita oikeanlainen eriste oikeaan paikkaan. Tällä pyritään takaamaan se, että eriste toimii koko rakennuksen elinkaaren ajan suunnitellusti (Romppainen 2010, s. 19).

3.2 Ääneneristys

Suomessa rakentamismääräyskokoelmassa ei ole asetettu rakennuksen ulkovaipalle ääneneristävyyteen liittyviä määräyksiä. Niitä voidaan sen sijaan esittää asema- ja rakennuskaavoissa erityisesti sellaisilla alueilla, joilla melu saattaa olla ongelma. Näitä ovat esimerkiksi vilkkaasti liikennöityjen väylien, rauta- ja moottoriteiden läheisyydet sekä lentomelualueet. (Suomen Betoniyhdistys 2021, s. 78)

Rakenteen kykyä eristää ilmaääntä tilojen välillä kuvataan ilmaääneneristävyydellä. Laboratoriossa rakenteelle määritetty ilmaääneneristävyytluku merkitään R_w [dB] ja tilojen välille valmiissa rakennuksessa määritetty ilmaääneneristävyytluku merkitään R'_w [dB]. Ilmaääneneristävyys paranee mitä suurempi ilmaääneneristävyytluku on (Lahtela 2004, s. 12). Ilmaääneneristävyytluku R_w on SFS-EN ISO 717-1 standardin mukaan taajuusjaksottain 100...3150 Hz taajuusalueella mitattu tai mallinnettu mittasuure (Lahtela ym. 2021, s. 4). Tilojen välisistä äänitasoeroista D_{nT} [dB] taajuusalueella 100...3150 Hz taajuusjaksottain mitatuista arvoista laskettu tilojen välinen ilmaääneneristävyys ilmoitetaan äänitasoeroluvulla $D_{nT,w}$ [dB]. Äänitasoeroluku kuvaa ääneneristävyyttä tarkemmin kuin ilmaääneneristävyytluku, koska se ottaa huomioon myös tilojen välillä olevat rakenteelliset sivutiesiirtymät, rakennusosan pinta-alan, tilan koon ja jälkikaiunta-ajan. Liikenne-, raide- ja lentomelun poikkeava luonne puheääneen verrattuna otetaan huomioon ulkovaipan ääneneristävyyden tarkastelussa spektripainotustermeillä C ja C_{tr} . Liikennemelua tarkastellessa käytetään ilmaääneneristävyytlukua $R_w + C_{tr}$ ja raide- ja lentomelua tarkastellessa $R_w + C$ (Lahtela ym. 2021, s. 13–86). Taulukossa 1 on esitetty Suomen suurimpien puhallusvillavalmistajien ilmoittamia ääneneristävyytlukuja.

Taulukko 1. Eristevalmistajien ilmoittamia ääneneristävyyslukuja (Ekovilla 2022a; Paroc 2022a; Isover 2022a)

Ristikkoyläpohja	Katetyyppi	R _w [dB]	R _w + C [dB]	R _w + C _{tr} [dB]	R' _w [dB]
Selluvilla (Ekovilla)	peltikate	46	44	37	
	huopakate	48	47	44	
	tiilikate	50	49	47	
Kivivilla (Paroc)	peltikate	55	53	48	
	tiilikate	56	54	52	
Lasivilla (Isover)					≥ 30

Yläpohja muodostaa yhdessä ulkoseinien, ikkunoiden ja ovien kanssa rakenteen ulkovaipan ääneneristävyys (Lahtela ym. 2021, s. 86). Puurakenteisessa yläpohjassa vesikate ja alakatto lepäävät usein omien runkojensa varassa muodostaen levymäiset massat, joiden väliin jäävä ilmatila muodostaa ilmajousen. Tästä syystä yläpohjan voidaan ääniteknisesti ajatella toimivan kaksinkertaisena rakenteena (Lahtela 2004, s. 53). Lämmöneristeestä ainakin osan tulisi olla huokoista mineraali- tai puukuituvillan kaltaista materiaalia hyvän ääneneristävyys saavuttamiseksi. Kevyillä ja huonommin ääntä absorboivilla kovilla lämmöneristeillä kuten EPS ja PIR, ei saavuteta huokoisten materiaalien kaltaista ääneneristävyttä (Lahtela ym. 2021, s. 86).

Rakenteen kohdatessaan ääniaalto synnyttää rakenteeseen värähtelyä. Värähtelyn kasvaessa rakenteessa, se synnyttää yhä enemmän ääniaaltoja toiselle puolelle rakennetta. Massalaki tarkoittaa sitä, että raskas rakenne eristää paremmin ääntä, koska se värähtelee vähemmän samasta äänenpaineesta kuin kevyt rakenne. Rakenteen ilmaääneneristävyyslusun suuruusluokka voidaan tietyissä tapauksissa arvioida määrittämällä rakenteelle ilmaääneneristävyys taajuudella 500 Hz käyttäen yksinkertaista massateoriaa (Lahtela 2004, s. 18):

$$R = 20 \lg(m * f) - 49, \quad (18)$$

missä R on rakenteen ilmaääneneristävyys [dB],
 m on rakenteen massa [kg/m^2] ja
 f on äänentaajuus [Hz].

Rakenteen massan kaksinkertaistuessa, voidaan olettaa ilmaääneneristävyyden paranevan 4–6 dB. Ääneneristävyys kasvaa hitaammin massan lisääntyessä alle 100 kg/m^2 painoisilla rakenteilla, joten massalaki pitää paikkansa vain pääpiirteittäin. Rakenteen painon tullessa riittävän suureksi, ei enää massan lisäämisellä saada olennaista parannusta ääneneristävyyteen. (Lahtela 2004, s. 18)

3.3 Paloturvallisuus

Paloturvallisuus tulee ottaa huomioon yksittäisten materiaalien ja rakennekokonaisuuden osalta jo rakennuksen suunnitteluvaiheessa. Erityisesti julkisivumateriaalien, tuulensuojan, rankarakenteiden ja lämmöneristeiden materiaaleja valittaessa on otettava huomioon myös paloturvallisuus. Lisäksi palokatkot ovat keskeinen tarkasteltava tekijä. Ympäristöministeriö on antanut asetuksen rakennusten paloturvallisuudesta. (Suomen betoniyhdistys 2021, s. 73).

Kantavan ja osastoivan rakennusosan suunnittelu tehdään standardin ISO 834 mukaisen palokäyrän esittämän palotilanteen mukaan ja rakennusosille annetaan tarvittaessa palonkestävyydelle luokkavaatimuksia, jotka voidaan jakaa kolmeen perusvaatimukseen: kantavuuteen R, tiiveyteen E ja eristävyyteen I. Palotilanteen kantavuus voidaan osoittaa rakennusosalle eurokoodi 5 mukaisella laskentamenetelmällä tai vaihtoehtoisesti standardin mukaisella polttokokeella. (Puuinfo 2021, s. 9–11)

Kuten muutkin rakennustarvikkeet, eristeet jaetaan luokkiin palossa käyttäytymisen perusteella. Taulukossa 2 on esitetty paloon osallistumisen luokat A1...F. Taulukoissa 3 esitetty savun tuotto ja taulukossa 4 esitetty palavien pisaroiden ja osien tuotto määritetään luokkien A2...D rakennustarvikkeille. Rakennustuotteen valmistajan tulee ilmoittaa luokka suoritustapailmoituksessa. (Puuinfo 2021, s. 23)

Taulukko 2. Rakennusaineen osallistuminen paloon (mukaiillen Puuinfo 2021, s. 23)

Kuvaus	Luokka
Ei osallistu paloon	A1
Osallistuu erittäin rajoitetusti	A2
Osallistuu hyvin rajoitetusti	B
Osallistuu rajoitetusti	C
Osallistuminen hyväksyttävää	D
Käyttäytyminen hyväksyttävää	E
Käyttäytymistä ei ole määritetty	F

Taulukko 3. Rakennusaineen savun tuotto (mukaiillen Puuinfo 2021, s. 23)

Kuvaus	Luokka
Erittäin vähäinen	s1
Vähäinen	s2
Muu kuin s1 tai s2	s3

Taulukko 4. Rakennusaineen palavien pisaroiden ja osien tuotto (mukaiillen Puuinfo 2021, s. 23)

Kuvaus	Luokka
Ei esiinny	d0
Nopeasti sammuvia esiintyy	d1
Muu kuin d0 tai d1	d2

NR-ristikkorakenteen palomitoitus suunnitellaan yleensä paloristikon avulla, jolloin yläpohjan kantavuus säilytetään ullakkopalossa. Palossa sulamaton lämmöneriste suojaa puuosia ja rajoittaa hiiltymisnopeutta. Vaikka mineraalivillat ovat palamattomia tuotteita, ovat niiden sulamislämpötilat erilaisia ja lasivilla eroaakin näiltä osin kivivillasta oleellisesti. (Puuinfo 2021, s. 43–93)

4 LÄMMÖNERISTEEN OMINAISUUDET

Materiaaliominaisuudet tulisi selvittää eri lämpötila- ja kosteusolosuhteissa, jotta saataisiin mahdollisimman luotettavasti laskettua rakenteiden rakennusfysikaalista toimintaa. Kehittyneet laskentaohjelmat mahdollistavat rakenteiden toiminnan analysoinnin eri vuodenaikoina myös erilaiset ilmasto-olosuhteet huomioiden yhä tehokkaammin. Ongelmana kuitenkin on, että kaikille tuotteille ei ole olemassa rakennusfysikaalisia materiaaliominaisuuksia muuta kuin yhdessä olosuhteessa. Tämä saattaa aiheuttaa sen, että laskentatulokset ovat harhaanjohtavia. Erityisesti pakkaslämpötiloihin ja korkeisiin RH-olosuhteisiin puuttuvat usein mitatut arvot. Näiden arvojen huomioiminen olisi erityisesti Suomen olosuhteissa tärkeää. Siitä huolimatta markkinoille ilmestyy jatkuvasti uusia tuotteita, joiden kaikkia materiaaliarvoja ei ole ilmoitettu. (Vinha ym. 2005, s. 14)

Lämpötila ja RH-olosuhteet vaikuttavat rakennusmateriaalien rakennusfysikaalisiin ominaisuuksiin. Tämä tulee huomioida rakentamisessa, sillä lämpö- ja kosteusolosuhteet vaihtelevat rakenteissa merkittävästi. Kosteusolosuhteet voivat vaihdella esimerkiksi sadeveden päästessä rakenteisiin tai rakennuksen sisältä ulospäin kulkeutuvan kosteuden vaikutuksesta. Lämpötilanvaihteluilla ei useinkaan ole lämmitetyissä sisätiloissa suurta merkitystä materiaaliominaisuuksien muutoksiin. Kosteusvaihtelut sen sijaan voivat vaikuttaa materiaaliominaisuuksiin siten, että niillä on merkitystä rakenteen kosteustekniseen toimintaan. (Vinha ym. 2005, s. 14)

4.1 Hygroskooppisuus

Hygroskooppisuus on huokoisen materiaalin kyky sitoa kosteutta ilmasta ja luovuttaa sitä takaisin ilmaan. Kun aineen huokosissa olevan ja sitä ympäröivän ilman suhteellinen kosteus ovat yhtä suuret, on saavutettu hygroskooppinen tasapainokosteus. Tämä vaihtelee aineen hygroskooppisuuden mukaan. Lisäksi siihen vaikuttaa lämpötila ja se, onko kyseessä absorptio eli kostuminen vai desorptio eli kuivuminen. Tätä voidaan kuvata sorptio- eli tasapainokäyrillä. (Björkholtz 1997, s. 59–60)

Rakennusosien kosteusteknistä toimivuutta voidaan parantaa hygroskooppisilla materiaaleilla kosteusolosuhteiden vaihdella. Hygroskooppisten lämmöneristeiden kosteuskapasiteetti tasoittaa kosteusvirtauksia ja -tasoja, mikä mahdollistaa

höyrynsulkumuovin korvaamisen diffuusioavaimella ilmansulkupaperilla. Diffuusioavoin rakenne mahdollistaa rakenteen kuivumisen sekä ulko- että sisäpuolelle auttaen tasaamaan ja parantamaan sisäilmaolosuhteita. Hygroskooppisten rakenteiden positiivisia vaikutuksia sisäilmaan ja sisäilman kosteuteen on saatu esimerkiksi Tapanilan Ekotalon kenttäkokeilla vuonna 2000. Kokeissa todettiin höyrynsulullisen rakenteen kosteuskuorman nostavan huonetilan vesihöyryn osapainetta öisin selkeästi enemmän kuin hygroskooppisesti avoimessa rakenteessa (Ojanen 2016, s. 4–9). Peuhkuri ym. (2004, s. 12–13) saivat vastaavia tuloksia tutkiessaan eristemateriaalien kykyä toimia kosteuden puskuroijana vakio-tilassa ja dynaamisella kuormituksella. Selluvillan todettiin tasaavan suhteellisen kosteuden heilahteluita rakenteessa ja pienentävän suhteellisen kosteuden vaihtelun ääripäitä. Sisäilman suhteellisen kosteuden osalta huomattiin sama vaimentava vaikutus. Näin ollen suuren puskurikapasiteetin omaavia materiaaleja kuten selluvillaa sisältävien rakenteiden voidaan olettaa kestävän paremmin korkean kosteuden aiheuttamia vaurioita kuin rakenteiden, joissa käytetään mineraalivillaa.

Eristeet reagoivat kosteuteen eri tavoin (Romppainen 2010, s. 19). Lämmöneristeiden hygroskooppisuus vaihtelee eristetyypin mukaan. Toiset lämmöneristeet eivät sido ollenkaan kosteutta tai sitovat sitä erittäin vähän. Mineraalivillat, solulasi, muovikuitueristeet ja solumuovieristeet lukeutuvat tällaisiin eristeisiin (RIL 255-1-2014 2014 s. 261).

Orgaanisista kuiduista valmistetut luonnonkuitueristeet voivat sitoa ja luovuttaa kosteutta tehokkaasti, eli niiden kosteuskapasiteetti on suuri. Näin ollen ne voivat sitoa ilmasta paljon kosteutta (Romppainen 2010, s. 19; RIL 255-1-2014 2014 s. 261). Tämä on hyvä asia tarkasteltaessa rakenteiden kosteusteknistä toimintaa. Suuren kosteuskapasiteetin omaava eriste voi jopa vähentää kosteusvaurion vaaraa tasaamalla vesihöyrynä olevan kosteuden kulkeutumista rakenteen läpi. Orgaaninen eriste sietää runsaitakin kosteusvaihteluita ilman, että eristävyys kärsii (Romppainen 2010, s. 19). Vinha ym. (2005, s. 96) tuovat esiin, että hygroskooppisten materiaalien osalta suhteellisen kosteuden muutos kuivan ja 97 %:n suhteellisessa kosteudessa ilmastoitujen koekappaleiden välillä vaikuttaa lämmönjohtavuuden arvoon 10–20 %.

Epäorgaaniset eristeet sen sijaan eivät ole hygroskooppisia. Ne eivät kykene juurikaan sitomaan tai luovuttamaan kosteutta, sillä niiden sisältämät kuidut eivät itsessään sido

kosteutta. Kosteuden noustessa myös eristyskyky heikkenee. Tämä tulee ottaa huomioon eristeen valinnassa ja sijoittelussa (Romppainen 2010, s. 19). Vinhan ym. (2005, s. 96) tutkimuksen mukaan mineraalivilloilla suhteellisen kosteuden vaikutuksesta lämmönjohtavuus ei juurikaan noussut.

4.2 Lämpökapasiteetti

Kappaleen kyky sitoa ja varastoida lämpöä itseensä on lämpökapasiteetti eli lämmönvaraamiskyky. Tilavuuslämpökapasiteetti saadaan, kun otetaan huomioon aineen tiheys ja ominaislämpökapasiteetti. Eri rakennusmateriaalien lämmönvaraamiskyky on riippuvainen materiaalin lämpökapasiteetista, ja lämmönsiirtymisnopeus sekä tehokkuus riippuvat lämpenemiskertoimesta. Tehollinen lämpökapasiteetti ei kasva materiaalin saavuttaessa tehollisen paksuutensa. Rakenteen tehollisella paksuudella kuvataan ainekerroksen suurinta mahdollista paksuutta, jolla on vaikutusta aineen tai rakenteen lämmönvaraamiskykyyn ja -luovutuskykyyn. Suuren lämpökapasiteetin omaavat rakenteet voivat varastoida itseensä sisäilman väliaikaista yllilämpöä esimerkiksi auringon aiheuttamaa säteilylämpöä päiväsaikaan. Hygroskooppisen materiaalin tapaan suuren lämpökapasiteetin omaavat materiaalit pystyvät kosteuden sijaan puskuroimaan sisäilman lämpövaihteluita. Lämpökapasiteetin hyödyntäminen energiatalouden näkökulmasta riippuu eristeen lämpökapasiteetin lisäksi myös eristeen ja sisäilman välisistä rakenteista ja verhoiluista. (Siikanen 2014, s. 58–59)

4.3 Ilmavirtaukset ja konvektio eristeessä

Ilmatiiveydellä on monenlaisia vaikutuksia rakenteen toimintaan. Rakennuksen ulkovaipassa oleva ilman- tai höyrynsulku mahdollistaa ilmatiiveyden. Rakenteeseen tarvitaan vähintään yksi ilmansulkuun toimiva kerros, joka yleensä sijaitsee lämmöneristyksen lämpimällä puolella. Sen tehtävänä on estää rakenteen läpi puolelta toiselle hallitsemattomasti virtaava ilma. Ilmansulku ei kuitenkaan estä eristemateriaalin sisällä tapahtuvaa konvektiota. (RIL 255-1-2014 2014, s. 46–47)

Tuuli, savupiippuvaikutus, lämmitys ja ilmanvaihto aiheuttavat ilmanpaine-eroja. Edellä mainittujen tekijöiden aiheuttamaa ilman virtausta kutsutaan pakotetuksi konvektioksi. Luonnollinen konvektio on pystyrakenteissa, kuten seinissä tai ikkunoissa tapahtuvaa

pystysuoraa ilmavirtausta, joka johtuu tiheyseroista. Tiheyserot ilmassa ja niiden synnyttämät paine-erot aiheutuvat lämpötilaeroista. Puupohjaiset eristeet ovat mineraalieristeisiin verrattuna tiiviimpiä konvektion suhteen (Romppainen 2010, s. 19). Suomen rakennusinsinööriliitto RIL 249-2015 (2015 s. 154) tuo julkaisussaan esiin, että luonnollinen konvektio on lämpötilaerojen vaikutuksesta syntyvää ilmavirtausta eristeen sisällä. Se vaikuttaa eristeen eristävyyskykyyn, sillä se heikentää eristeen lämmöneristävyttä. Lisäksi sillä on vaikutusta rakenteen kosteusteknisiin tekijöihin, sillä kosteus voi kerääntyä ilmavirtausten seurauksena yhteen kohtaan rakennetta. Luonnollinen konvektio riippuu eristeen ilmanläpäisevyydestä ja lämmönjohtavuudesta sekä eristysratkaisusta ja lämpötilaerosta tarkastelun kohteena olevan eristeen alueella. Sitä esiintyy hyvin ilmaa läpäisevillä lämmöneristeillä, kuten kivi- ja lasivillalla sekä puukuitueristeillä. Riski luonnolliseen konvektioon kasvaa samalla, kun sen ilmanläpäisevyys ja yhtenäinen paksuus kasvavat. Tiheämpi eriste, eristekerroksen paksuuden pienentäminen ja vesihöyryä läpäisevä kalvo voivat auttaa ennaltaehkäisemään sisäistä konvektiota. Erityinen riski pakotettuihin ilmavirtauksiin löytyy puutteellisesta tai huolimattomasta eristämisestä. Varsinkin erilaiset raot ja eristekerroksen rikkonaisuus saavat aikaan sisäistä konvektiota. Luonnollista konvektiota voidaan vähentää yhtenäisellä tuulensuojauksella tehokkaasti (Suomen rakennusinsinööriliitto RIL 249-2015 2015, 154).

5 PUHALLETTAVAT ERISTEET

Puhallettavia eristeitä voidaan puhaltaa myös onteloihin, mutta kappaleessa käsitellään vaakasuoria yläpohjia vapaasti puhalletuilla eristeillä. Ontelopuhalluksessa eristeen ominaisuudet kuten tiheys ja ilmanläpäisevyys voivat erota merkittävästi annetuista arvoista ja niiden ominaisuudet onkin standardien mukaan ilmoitettava erikseen. Puukuitueristettä voidaan myös puhaltaa yläpohjaan ja seinärakenteisiin liiman kanssa, jolloin muun muassa painuma ja ilmanläpäisevyys muuttuvat. Taulukossa 5 on annettu vapaasti puhallettujen eristeiden ominaisuuksia kirjallisuudesta ja taulukossa 6 on yleisimpiä Suomessa käytettävien tuotteiden valmistajien ilmoittamia CE-merkintään vaadittavia arvoja.

Taulukko 5. Vapaasti puhallettavien eristeiden ominaisuuksia (RIL 255-1-2014).

	Lasivilla	Kivivilla	Puukuitueriste
Tiheys ρ [kg/m ³]	15–33	33–77	37
Lämmönjohtavuus λ [W/mK]	0,034–0,042	0,038–0,042	0,038–0,042
Ominaislämpökapasiteetti C_p [J/kgK]	850	850	2000
Ilmanläpäisevyys $L \cdot 10^{-4}$ [m ³ /msPa]	3,4	2,8	2,4
vesihöyrynläpäisevyys $\delta_\rho \cdot 10^{-12}$ [kg/msPa]	190	190	157
vesihöyrynläpäisevyys $\delta_v \cdot 10^{-6}$ [m ² /s]	25,7	25,7	21
Diffuusiovastuskerroin μ	1	1	1,2

Taulukko 6. Suomen suurimpien eristevalmistajien ilmoittamia arvoja (Isover 2022b; Isover 2022c; Paroc 2022b; Paroc 2022c; Ekovilla 2022b; Saint-Gobain Finland 2022)

	Isover InsulSafe	Isover InsulSafe	Paroc BLT9	Paroc BLT6	Ekovilla puhallusvilla
Tiheys ρ [kg/m ³]	23	15	40	33	26–36
Lämmönjohtavuus λ_D [W/mK]	0,036	0,041	0,041	0,041	0,038
Ilmanläpäisevyys $L \cdot 10^{-6}$ [m ³ /m ² *s*Pa]	250	400	130	160	125
Ilmanläpäisyn ominaisvastus A_{Fr} [kPa*s/m ²]	4	2,5	7,7	6,3	8
Paloluokitus [Euroluokka]	A1	A1	A1	A1	B-s2,d0
Diffuusiovastuskerroin μ	1	1	1	1	1,3
Painuma	S1	S1	S2	S2	10 %

5.1 Mineraalivilla

Mineraalivillaeristeet ovat lämmöneristeitä, jotka muodostuvat epäorgaanisista kuiduista ja sideaineesta, joka on orgaanista. Suomessa valmistetaan kivi- ja lasivillaa. Mineraalivilloja valmistetaan erikokoisina levyinä ja puhallusvillana. Puhallusvillaa käytetään pääasiassa yläpohjien lämmöneristyksessä. Mineraalivillan tiheys vaihtelee raaka-aineesta ja valmistusmenetelmästä riippuen. Puhallettuna sen tiheys on 10–35 kg/m³. Kivivillan tiheys lasivillan verrattuna on noin kaksinkertainen. (Siikanen 2009, s. 217–222)

Suomessa kivivillan valmistus aloitettiin 1940-luvun alussa. Kivivillan pääasialliset raaka-aineet ovat emäksiset kivilajit. Ne sulatetaan valmistusprosessin aikana ja sula kivimassa lingotaan. Linkouksessa sinkoutuvat pisarat venyvät kuiduiksi. Kivivillan kuitujen pituus on noin 2–4 mm ja keskipaksuus 3–12 μm . Sideaineena kuituihin lisätään fenolihartsia ja öljyä sitomaan pölyä ja parantamaan veden hylkimistä. (Siikanen 2009, s. 217–222)

Suomessa lasivillan valmistus aloitettiin vuonna 1941. Lasivilla valmistetaan kvartsihiekkasta, soodasta ja kalkkikivestä ja siitä 50–60 prosenttia on kierrätyslasia. Valmistusprosessin aikana lasi sulatetaan massaksi ja lingotaan kuituaiheiksi. Ne pitenevät kuiduiksi voimakkaassa ilmapirrassa. Lasivillan kuitujen pituus on noin 5–10 mm ja keskipaksuus 3–12 µm. Sideaineena kuituihin lisätään fenolihartsia ja öljyä sitomaan pölyä ja parantamaan veden hylkimistä. (Siikanen 2009, s. 217–222)

Mineraalivillan painuma on puhallettuna noin viisi prosenttia. Mineraalivillan ei ole todettu mätänevän tai lahoavan, mutta kosteus- ja lämpötilaolosuhteiden ollessa epäsuotuisat siinä voi esiintyä sieni- ja homekasvustoja (Siikanen 2009, s. 217–222). Mineraalivillan kuituihin ei imeydy nestemäistä vettä, vaikka vesihöyry meneekin sen läpi. Toisin kuin voisi ajatella, on haitallista, että mineraalivilloilla on huono kastuvuus, sillä rakenteisiin muodostunut kosteus pääsee kuivumaan tämän takia hitaasti (Rinne 2018, s. 101).

Kun mineraalivilla kuumenee, sen sideaineet hajoavat ja haihtuvat. Näin alkaa käydä noin 200 °C:ssa. Kuidut alkavat pehmetä, mikäli lämpötila jatkaa nousemistaan. Lasivilla sintrautuu 650–750 °C:ssa ja kivivilla 800–1000 °C:ssa. Mineraalivillan kuidut eivät pala, mutta öljy ja muut sideaineet sen sijaan palavat. Tämä ei kuitenkaan vaikuta merkittävästi tuotteiden palo-ominaisuuksiin niiden vähäisen määrän vuoksi. (Siikanen 2009, s. 217–222)

Vaikka mineraalivillat ovat osoittautuneet tehokkaiksi eristeiksi, kritisoidaan niitä nykyään niiden ympäristöhaittojen vuoksi. Niiden valmistamiseen tarvitaan runsaasti energiaa eivätkä ne hengitä. Mineraalivillat eivät ole kierrätys- tai polttokelpoisia. Niiden hävittäminen on mahdollista ainoastaan kaatopaikalle. Lisäksi mineraalivillojen käsittelyssä irtoaa kuituja, jotka ärsyttävät silmiä ja hengityselimiä (Rinne 2018, s. 101). Kibertin (2008, s. 296) mukaan lasi- ja mineraalivillat ovat herättäneet huolta sisäilman laadussa, koska materiaalia häiritessä siitä irtoaa pieniä kuituja. Maailman terveysjärjestön (WHO) syöpään erikoistunut virasto IARC (The International Agency for Research on Cancer) on lisännyt lasivillan mahdolliseksi syöpää aiheuttavaksi aineeksi.

Mineraalivillan ilmanläpäisevyys on yleensä suuri ja siksi se tulee asentaa ilmatiiviiden rakennekerroksien väliin parhaan eristävyys saavuttamiseksi (Siikanen 2009, s. 218). Mineraalivillan eristävyys perustuu sen rakenteeseen, joka on huokoinen. Huokoisuuden

ansiosta eristeen sisällä oleva ilma, jolla on alhainen lämmönjohtavuus, pysyy paikallaan. Lämpö siirtyy kuivassa mineraalivillassa johtamalla, säteilemällä ja konvektion vaikutuksesta. Johtumista tapahtuu sekä kuituja pitkin, että ilmahuokosten kautta. Kiinteiden kuitupintojen välillä tapahtuu säteilyä. Mineraalivillan tiheys ja koostumus vaikuttavat eri siirtymätapojen osuuteen. Säteilyn ja johtumisen osuus lisääntyy lämpötilan noustessa. Samaan aikaan konvektion osuus pienenee. Mineraalivilla läpäisee helposti ilmaa huokoisen rakenteensa vuoksi. Puhallettavaa mineraalivillaa käytettäessä tarvitaan erillinen tuulensuojalevy, joka estää ilman liikkeen rakenteessa (Siikanen 2009, s. 219).

5.1.1 CE-merkintä

Harmonisoidussa tuotestandardissa (hEN) SFS-EN 14064-1:2018 määritellään mineraalivillasta valmistettujen puhallusvillatuotteiden vaatimukset, kun käyttökohteita ovat paikalla tehtävät tuuletetut yläpohjat, runkorakenteet ja muuratut rakoseinät. Standardissa määritellään tuoteominaisuudet mukaan lukien testausten menettelyt ja merkinnät. Saadakseen CE-merkinnän tuotteeseensa on valmistajan noudatettava standardista yhdenmukaistettua osaa, joka määritetään liitteessä ZA. Opastava liite ZA määrittelee standardin suhteen EU:n direktiiveihin. Taulukossa 7 on esitetty määriteltävät tuoteominaisuudet, joista harmaalla on merkitty liitteessä ZA vaaditut yhdenmukaistetut osat (SFS-EN 14064-1:2018). Kuten taulukosta käy ilmi, ilmanläpäisevyys ei kuulu mineraalivilloilla tuotestandardissa CE-merkintään vaadittaviin ilmoitettaviin ominaisuuksiin (Ojanen ym. 2014, s. 43). Standardipaketissa EN 14064 on kaksi osaa, joista ensimmäinen osa on harmonisoitu. Toinen osa, jota ei ole harmonisoitu, käsittää soveltamisalaan kuuluvat asennetut tuotteet. Lisäksi siinä määritellään tuotteen tarkastukset, testit ja vaatimustenmukaisuuden arvioinnin säännöt, joita tarvitaan asentajan ilmoituksessa (SFS-EN 14064-2).

Taulukko 7. Standardissa SFS-EN 14064-1:2018 esitetyt vaatimukset

Ominaisuus	Testimenetelmä	Velvoittava liite k.o. standardissa	Yksikkö
Lämmönvastus ja lämmönjohtavuus	EN 12667	Liite A	R_D, λ_D
Painuma	EN 14064-1	Liite J	Si
Palokäyttäytyminen	EN 13501-1:2007 +A1:2009 EN 15715	Liite F Liite G	Euroluokka
Ilmavirranvastus	EN 29053:1993 menetelmä A	Liite E	AFri
Vedenimukyky	EN 1609:2013 menetelmä A	Liite D	Wp
Vesihöyryn-läpäisevyys	Voidaan olettaa olevan 1		μ
Vaarallisten aineiden päästöt	Ei vielä saatavilla		
Jatkuva kytevä palo	Ei vielä saatavilla		

5.2 Puukuitueriste

Suomessa puhallettavan puukuituvillan eli selluvillan valmistus aloitettiin 1970-luvun lopulla. Pohjois-Amerikassa selluvillaa on käytetty 1920-luvulta lähtien (Siikanen 2009, s. 42; Rinne 2018, s. 103). Puukuitueristettä on saatavana puhallusvillan lisäksi myös eri paksuisina levyinä (Rinne 2018, s. 103). 80 % siitä on kierrätyspaperia, joka on hienonnettu ja käsitelty. Loput 20 % selluvillan massan painosta on lahon- ja palonestoaineita. Näinä aineina käytetään booraksia ja boorihappoa (Siikanen 2009, s. 42). Rinne (2018, s. 103) tuo esiin, että puukuitueristeeseen lisätään 14–25 prosenttia erilaisia aineita. Booraksin lisäksi käytetään vesilasia, ammoniumpolyfosfaattia tai alumiinisulfaattia. Ne estävät lisäksi mikrobikasvustoa. Booraksin käytöstä on kiistelty, mutta suomessa myytävien puukuitueristeiden käytössä ei ole havaittu vapautuvan ihmiselle vaarallisia yhdisteitä. Puukuitueristeelle on myönnetty päästöluokitus M1 (Rinne 2018, s. 103).

Vapaasti puhalletun selluvillan tiheys on noin 30 kg/m^3 ja lämmönjohtavuus asennustavan mukaan $0,038\text{--}0,042 \text{ W/mK}$ paikoilleen asennettuna. Vapaata ilmaa puhalletun selluvillan tilavuudesta on noin 85–92 prosenttia. Selluvillan etuna on se, että se kykenee tasaamaan kosteuden liikkumista rakenteessa (Siikanen 2009, s. 42). Rinteen (2018, s. 101–103) mukaan puukuitueriste voi kastua yllättävän paljon ilman, että eristyskykyä menetetään. Se on hygroσκοoppinen ja näin ollen se pystyy vastaanottamaan ja luovuttamaan kosteutta. Palonestoaineiden ansiosta puukuitueriste ei pala, vaan hiiltyy pinnasta tulipalon aikana. Pintaan muodostunut hiili tekee palamattoman suojan sisemmille kerroksille. Eristeeseen sitoutunut vesi höyrystyy tulipalon aikana laskien näin lämpötilaa. Vanhan puukuitueristeen voi kompostoida (Siikanen 2009, s. 42). Ekovillan (2022a, s. 3) mukaan selluvillan hiiltymisnopeus on 50...150 mm tunnissa, kun massiivipuulla hiiltymisnopeus on 48 mm/tunti ja liimapuulla 42 mm/tunti.

5.2.1 CE-merkintä

EOTA:n julkaisemassa EAD 040138-01-1201 arviointiasiakirjassa eli harmonisoidussa teknisessä spesifikaatiossa on määritelty ETA-hyväksyntään tarvittavat lämmöneristeen tekniset vaatimukset paikalla valmistettaville kasvikuitupohjaisille puhallettaville lämmön- ja ääneneristeille. Taulukossa 8 on esitetty EAD:ssa määritetyt vaatimukset. (EOTA 2018, s. 2–4)

Taulukko 8. Paikalla valmistettujen kasvikuitupohjaisten puhallettavien tuotteiden EAD:ssä vaaditut tekniset ominaisuudet. (EOTA 2018)

Ominaisuus	Testimenetelmä	Yksikkö
Palokäyttäytyminen	EN 13501-1:2007 +A1:2009 EN 15101 Liite C	Euroluokka
Biologinen vastustuskyky	EAD Liite B tai EN 15101-1:2013 Liite F	
Äänen absorptio	EN 15101-1:2013	a_w
Lämmönjohtavuus	EAD Liite A	$\lambda_{D(23,50)}$
Vesihöyryn-läpäisevyys	EN 12086:2013	μ
Vedenimukyky	EN 1609:2013 menetelmä A	Wp
Korroosionmuodostuskyky	EN 15101-1:2013 Liite E	
Tiheys ja painuma	EAD kappale 2.2.8	[kg/m ³] %
Kriittinen kosteuspitoisuus (vaadittu Ruotsissa)	BFS 2011:6	
Ilmavirranvastus	EN 29053 (ISO 9053) menetelmä A	Asteittain 1 kPa·s/m ²
Hygroskooppiset sorptio- ominaisuudet	EN ISO 12571:2013	

6 YLÄPOHJAN ENERGIATEKNINEN SUUNNITTELU

Rakenteiden lämpö- ja energiatekninen suunnittelu pitää sisällään lämmöneristyksen suunnittelun ja sisäilman lämpöoloihin sekä muuhun energiankulutukseen vaikuttavien tekijöiden suunnittelun. Uuden rakennuksen suunnitteluvaiheessa laaditaan energiaselvitys, jota päivitetään projektin edetessä. Ennen rakennuksen käyttöönottoa pääsuunnittelija varmentaa energiaselvityksen. Energiaselvitys pitää sisällään rakennuksen kokonaisenergiankulutuksen laskennan (E-luku), energiankulutuslaskennan lähtötiedot ja tulokset, lämpimän kauden huonelämpötilan ja mahdollisen jäädytystehon laskennan, rakennuksen lämpöhäviön määräysten mukaisuuden osoittamisen, lämmitystehon laskennan ja energiatodistuksen. Rakennusfysiikan suunnittelun piiriin kuuluu etenkin lämmönläpäisykertoimien laskenta lämpöhäviön määräystenmukaisuuden osoittamiseen liittyen. (RIL 255-1-2014 2014, s. 25)

Energiatehokkaan rakentamisen takaamiseksi on tehtävä yhteistyötä arkkitehtuurin, rakennetekniikan ja talotekniikan saralla. Lisäksi yhteistyöllä pyritään saavuttamaan mahdollisimman optimaalinen lopputulos elinkaarilaadun ja -talouden näkökulmasta. Rakennesuunnittelussa kaiken pohjana ovat rakenteiden kantavuuden ja siten turvallisuuden lisäksi myös energiatehokkuuden ja sisäilman laadun vaatimukset ja tavoitteet. Erilaisilla laskentamenetelmillä ja ohjelmilla voidaan todentaa energiatehokkuuden ja rakennusfysikaalisten tavoitteiden täyttyminen. Rakennusprojektin alkuvaiheessa määritellään tekniset arvot, kuten U-arvot, jotka vastaavat rakennuksen tavoitteeksi asetettua energiatehokkuusluokkaa. Niiden avulla voidaan suunnitella lämmönhallintaa ja laskea rakennuksen alustavaa energiankulutusta. Jotta rakennuksesta saataisiin toimiva, tulee sen tiiviys ja kosteus- sekä lämpötekniiset asiat suunnitella erityisellä huolella. Lämmöneristyksen ja tiiviyn suunnittelu liittyvät olennaisesti toisiinsa ja niiden vaiheittain etenevä suunnittelu vaatii sekin yhteistyötä rakennesuunnittelun, taloteknisen suunnittelun ja arkkitehtisuunnittelun kanssa (RIL 249-2015 2015, s. 147–148).

6.1 Lämmöneristyksen suunnittelu

Rakennuksen lämmöneristyksen suunnitteluun kuuluu rakennuksen lämpöhäviöiden määräystenmukaisuuden osoittaminen, lämmöneristeen ja sen asennustavan valinta, tuulensuojauksen ja ilmatiiveyden suunnittelu, kylmäsiltojen ja pintalämpötilojen tarkastelu, putki- ja hormieristyksen suunnittelu ja routaeristyksen suunnittelu. Tavanomaisesti rakennusosien lämpötekniisyys suunnitellaan niin, että niiden lämmönläpäisykertoimet eli U-arvot täyttävät annetut määräykset. Rakennusosien lämpöhäviöiden määräystenmukaisuutta osoittaessa U-arvojen laskenta on keskeisessä osassa. Nykyisin on kuitenkin mahdollista valita lämmöneristyksestään heikompi rakennusosa ja kompensoida sen aiheuttama lämpöhäviö jonkun muun rakennusosan avulla tai jollain toisella osa-alueella. (RIL 255-1-2014 2014, s. 26)

Lämmöneristeen valinta tulee tehdä siten, että ne ovat asetettujen vaatimusten mukaisia ja käyttötarkoitukseen sopivia. Lämmöneristeiden ominaisuuksien tulee säilyä koko käyttöiän ajan. Lämmöneristettä valittaessa tulisi huomioida ainakin lämpötekniiset ominaisuudet, ilmanläpäisevyys, kosteustekniiset ominaisuudet, ääni- ja palotekniiset ominaisuudet, asennettavuus ja riski työvirheille, kuormituskestävyys, pitkäaikaiskestävyys ja ympäristöystävällisyys. Tärkein lämmöneristeen lämpötekniisistä ominaisuuksista on eristeen lämmöneristyskykyä kuvaava lämmönjohtavuus, joka määrittää tarvittavan eristepaksuuden. Eristepaksuudet ovat kasvaneet merkittävästi, sillä U-arvovaatimukset rakennusosille ovat tiukat. Yläpohjissa suositellaan käytettävän kuivana puhallettavia irtoeristeitä, sillä ne täyttävät kattoristikoiden muodostamat kolot, mahdollistaen yhtenäisen lämmöneristekerroksen. Irtoeristeiden heikkous on kuitenkin niiden suuri ilmanläpäisevyys, joka voi johtaa eristekerroksen sisäiseen konvektioon. Irtoeristettä kuuluu puhaltaa eristetyypin painuman mukaan suurempi kerros, jotta painuman jälkeen eristekerroksen paksuus vastaa suunnitelmia. Painuminen voi aiheuttaa onkaloita kattotuolien vinosauvojen alapuolelle, mikä voi johtaa rakenteen lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan heikkenemiseen. Painumaan voidaan kuitenkin vaikuttaa asennuksessa puhaltamalla tiheämpi kerros ongelmakohtiin. Myös sideaineen käyttö auttaa painumien hallinnassa. (RIL 255-1-2014 2014, s. 26–27)



Kuva 5. Yläpohjaan päässeen tuulen vaikutuksesta eristeet ovat siirtyneet kokonaan osasta rakennetta.

Rakenteiden ilmatiiveyden ja tuulensuojauksen oikeanlaisella suunnittelulla ja toteutuksella varmistetaan ennen kaikkea rakenteiden kosteustekninen toimivuus. Erillisellä tuulensuojalla suojataan rakenteen lämmöneristys jos riskinä on, että ilmavirrat voivat vaikuttaa haitallisesti rakenteen lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan. Vaippaa voidaan suojata tuulen vaikutuksilta myös pienentämällä lämmöneristeen ilmanläpäisevyyttä. Tuuletetuissa yläpohjissa voidaan käyttää erillisiä tuulenhajaimia suojaamaan lämmöneristeen reunoja. Näin voidaan estää kuvan 5 kaltainen tuulen vaikutus eristeeseen. (RIL 255-1-2014 2014, s. 47)

6.2 Yläpohjan olosuhteet

Rakennuksen ulkovaipan nykyaikaisetkin rakenneratkaisut saattavat päästää etenkin myrskyjen aikana vettä rakenteiden sisään saumoista ja liitoksista. Rakennuksen ikääntyessä vuodot yleensä lisääntyvät ja se saattaa aiheuttaa rakenteiden toiminnalle ja käyttäjien turvallisuudelle ja terveydelle huomattavia riskejä. Rakennus tulisikin suunnitella niin kantavien rakenteiden kuin rakennusfysikaalisen toimivuuden kannalta

varmatoimisiin ja vikasietoisiin ratkaisuihin. Esimerkiksi yläpohjarakenteessa vuotavan vesikatteen aiheuttama kosteuskuorma pystytään ohjaamaan aluskatteen avulla pois rakenteista. (RIL 255-1-2014 2014, s. 22–23)

Tuuletetun yläpohjatilan lämpötilaan ei vaikuta yläpohjan kautta tuleva rakennuksen lämpö, vaan määrääviä tekijöitä ovat tuuletus, auringon säteily ja säteilylämmönsiirto ympäristön kanssa. Eristepaksuuksia pitäisi vähentää ja lämpövirtaa yläpohjan läpi pitäisi kasvattaa huomattavasti, että sillä olisi merkitystä ullakkotilan lämpötilatasoon. Yläpohjan tai muunkaan ulkovaipan kosteustekninen toiminta ei voi perustua turhiin lämpöhäviöihin perustuviin olosuhteisiin. Tyypillisesti yläpohjan kosteusongelmia aiheuttaa vesikatteen ja sen läpivientien detaljien vuodot, tuulen aiheuttama veden ja lumen kulkeutuminen rakenteisiin, toimimaton tuuletus tai kostean sisäilman vuodosta yläpohjaan. Sisätilojen alipaineisuus ja hyvä ilmatiiveys ovat edellytyksenä toimiville yläpohjille, mutta tässäkin tapauksessa rakennuksen täytyy kokonaisuutena olla toimiva. (Viitanen ym. 2008, s. 12–13)

6.2.1 Ilmavirtaukset ja konvektio tuuletustilassa

Vaikka ullakon ilmavirtausten ajatellaan yleisesti johtuvan luonnollisesta konvektiosta vesikaton ja eristekerroksen välissä, voi ullakon tuuletuksesta johtuva pakotettu konvektio lisätä yläpohjan lämpöhäviötä (Parker ym. 1991, s. 48–54). Rakenteiden läpi muodostuvia ilmavirtauksia voi aiheuttaa savupiippuvaikutus sekä LVI-laitteiden ja tuulen aikaansaamat paine-erot rakenteiden eri puolilla (Siikanen 2014, s. 34–35). Virtausten voimakkuutta on kuitenkin hankala arvioida ullakkotilan ilmavirtauksien monimutkaisuuden vuoksi. Ilmavirtauksiin vaikuttaa tuuletusaukkojen alueet, tuulen nopeus, lämpötilaero ja ullakon geometria (Parker ym. 1991, s. 48–54). CFD-mallinnusten mukaan vesikatteen ja eristeen välisellä ilmatilan koolla on merkitystä ilman vaihtuvuuteen ja ilmavirtausten jakautumiseen, mutta ei niinkään ullakon ilman lämpötilaan. Auringon säteilyllä vesikattoon havaittiin olevan huomattava vaikutus ullakon ilman lämpötilaan ja ilmavirtauksiin. Viimeisten vuosikymmenten aikana tehdyt useat tutkimukset kestäviä ja energiatehokkaita yläpohjarakenteita koskien ovat tulleet päätelmään, jossa ullakkotilaa suositellaan tuuletettavaksi homeen kasvun välttämiseksi ja lämmitys- ja viilennystarpeen vähentämiseksi, mutta ullakkotilan tuuletus on nähty myös mahdolliseksi ongelman lähteeksi. Kylmissä ja leudoissa olosuhteissa ullakkotilan tuuletuksella pyritään kontrolloimaan yläpohjan kosteutta ja lämpimissä olosuhteissa

sillä pyritään lisäksi viilentämään kattoa ja parantamaan lämpötekniisiä ominaisuuksia (Tariku & Iffa 2020, s. 1–2).

Erityisesti kylmänä vuodenaikana lämpötila- ja kosteuspitoisuuserojen ollessa suuria sisä- ja ulkoilman välillä on rakennuksessa vallitsevilla ilmanpainesuhteilla merkitystä rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan. Ilmanpainesuhteista johtuvaa luonnollista konvektiota esiintyy myös tuulettamattomissa ja huonosti tuuletetuissa ullakkotiloissa ja sen voimakkuus riippuu muun muassa ullakkotilan korkeudesta, lämpötilaeroista ja katon jyrkkyydestä. Konvektion kuljettama ilmavirta kuljettaa mukanaan kosteutta, mikä voi kylmään kattopintaan osuessaan tiivistyä vedeksi (Siikanen 2014, s. 34–35). Luonnollinen konvektiovirtaus ullakkotilaan voi syntyä eristeen yläpinnalla tai vesikattorakenteen alapinnalla niiden lämpötilan mukaan. Talvella verikattorakenteen alapinnan lämpötila voi kuitenkin nousta huomattavasti eristeen yläpinnan lämpötilaa korkeammaksi auringon säteilyn vuoksi (Tariku & Iffa 2020, s. 17).

Esimerkiksi tuulen suunta ja voimakkuus, rakennuksen korkeus ja muoto sekä ympäröivä maasto vaikuttavat paine-erojen suuruuteen. Tuulen suunnassa esiintyy kattorakenteissa ylipainetta ja suojaisalla lappeella tai tasakatossa esiintyy alipainetta eli imua. Tuulen aiheuttamat paine-erot saattavat kasvaa suuriksi lyhyellä tarkastelujaksolla. (Siikanen 2014, s. 37)

6.2.2 Kosteus

Junttilan (2014, s. 101) tekemien tietokonemallinnusten mukaan yläpohjarakenteiden kosteusteknisen toimivuuden varmistamiseksi pitäisi ensisijaisesti pyrkiä estämään ilma- ja sadevuodot rakenteisiin, jonka jälkeen voidaan yläpohjan tuuletusta lisätä kohtalaiselle tasolle. Mitä vähäisempi yläpohjan tuuletus oli, sitä tärkeämmäksi vesi- ja ilmatiiveys muodostui. Myös lähellä vesikatetta oleva ohut lämmöneristyskerros lisäsi kosteusteknistä toimivuutta etenkin tulevaisuuden ilmastossa, mutta se ei ole kustannustehokas ratkaisu.

Rakennuksen ulkovaippa on jatkuvasti altis vaihtelevan ulkoilman ja sisäilman luomalle dynaamiselle potentiaalierolle ja siksi olosuhteet eivät käytännössä yleensä vastaa laskennallisia tasapainotiloja. Materiaaliominaisuudet mitataan usein pelkästään standardiolosuhteissa, jotka vastaavat tyypillisiä käyttöolosuhteita. Laskennassa

käytetään yleisesti hyväksytyjä teorioita, mutta ne eivät kata kaikkia olosuhdeyhdistelmiä. Tärkeimmät kosteuden siirtymiseen vaikuttavat muuttujat huokoisessa materiaalissa ovat vesihöyryn osapaine, vesipitoisuus, kapillaaripaine ja lämpötila. Yksittäisten mekanismien tunnistaminen on vaikeaa, koska potentiaalit voivat vaikuttaa samaan tai eri suuntaan riippuen olosuhteista. Rakennusfysiikassa ei vallitse täydellistä konsensusta kosteusteorian suhteen vaikuttavien muuttujien suuren määrän syystä. On esimerkiksi kyseenalaista käyttää vesihöyryn liikkumiseen rakenteiden sisällä standardiolosuhteissa ilman lämpötilaeroa mitattua vesihöyryn läpäisykerrointa δ_p [kg/(Pa·m·s)], vaikka sen arvo on lämpögradientista riippuva. (Peuhkuri 2007, s. 207–208)

Esimerkiksi lämmöneristyskerroksen kasvattamisen aiheuttama rakenteen lämpötilagradienttiin muutos vaikuttaa kosteustekniseen toimivuuteen. Lämpöjakauman muutos vaikuttaa myös vesihöyryn osapainegradientteihin ja siten rakenteen kuivumiskykyyn. Homogeenisen rakennusmateriaalin kuten lämmöneristeen paksuuden kasvattaminen esimerkiksi 300 mm:stä 600 mm:iin pienentää lämpögradientin puoleen. Tämän takia lämpötilasta riippuvaiset rakenteen läpi kulkevat kosteusvirrantiheydet alenevat. Olennaista on kuitenkin se, kuinka paljon on välttämätöntä siirtää kosteutta ulos rakenteen toimivuuden kannalta. Kun rakennus toimii kokonaisuutena oikein, on sisäilmasta peräisin oleva kosteuden määrä normaalisti hyvin pieni esimerkiksi rakennusaikana kertyneeseen alkukosteuteen ja sen edellyttämään kuivumiskykyyn tai muihin satunnaisiin kosteuskuormiin verrattuna. Kosteusteknisesti toimivien rakenteiden suunnittelussa on olennaista tiedostaa, kuinka suuria satunnaisia kuormia rakenteisiin kohdistuu ja kuinka paljon rakenteen tulee sietää muiden rakennusosien virheistä aiheutuvia kosteuskuormia. (Viitanen ym. 2008, s. 7–8)

7 VÄHÄHIILINEN RAKENTAMINEN

Ympäristöministeriö (2022) esittelee vuonna 2017 teettämässään selvityksessä tiekartan, jonka tavoitteena on vähentää rakentamisen ja rakennusmateriaalien hiilijalanjälkeä. Tämän selvityksen pohjalta edetään kolmessa vaiheessa kohti CO₂-päästöjen ohjausta. Ensimmäisessä vaiheessa (Testaus ja menetelmät) vuonna 2017 suoritettiin ohjausjärjestelmän vaikutusarvioinnit, hiilijalanjäljen laskentamallin ja päästötietokannan kehittäminen, osaamisen ja työkalujen kehittäminen sekä testaus julkisissa rakennushankkeissa ja yksityisellä sektorilla. Toisessa vaiheessa (Ohjausjärjestelmän laatiminen) vuonna 2019 valmisteltiin säädösohjauksia ja mahdollisia kannusteita, kytkentää kaavoitukseen ja energiaohjaukseen, pilottihankkeiden laajentamista sekä rakennusten päästötietojen seuranta ja tilastointia. Viimeisessä vaiheessa (Ohjaus käyttöön) vuoteen 2025 mennessä tavoitteena on saada aikaan mahdollinen ilmoitusvelvollisuus ennen sitovia raja-arvoja, mahdollisuus rakennuskannan vaiheittaiseen ohjaukseen kytkentään sekä rakennuskannan päästötietojen seuranta (Ympäristöministeriö 2022). Vuonna 2018 julkaistiin ensimmäinen arviointimenetelmä, josta saadun lausuntokierroksen palautteen, koekäytön, level(s)-testauksen ja pohjoismaisen yhteistyön tuoman kokemuksen pohjalta julkaistiin vuonna 2019 päivitetty luonnos. Vuosien 2019–2020 aikana päivitettyä arviointimenetelmää testattiin yli 40 rakennushankkeessa. Vuonna 2020 lausuntokierros päätti koekäyttövaiheen. Lausunnoille saatetun asetusluonnoksen pohjana on käytetty tätä työtä ja testauksissa saatuja kokemuksia (Oikeusministeriö 2022). Ympäristöministeriön (2022) mukaan lopullinen ohje arviointimenetelmään julkaistaan sitten, kun asetus astuu voimaan.

Suomi on sitoutunut merkittäviin ilmastovähennyksiin EU:n ja kansainvälisten ilmastosopimusten kautta. Päästöjä on jo koitettu vähentää säädösohjauksella energiatehokkuuden parantamiseksi uudis- ja korjausrakentamisessa sekä uusiutuvan energiankäytön lisäämiseksi. Tehokkaat keinot päästöjen ja energiankulutuksen laskemiseksi alkavat olla käytetty rakennuksen käytön aikana, joten seuraavaksi kohteena on rakennusmateriaalien valmistuksen aikana aiheutuneet päästökuormat. (Bionova Oy 2017, s. 2–8)

Siirryttäessä entistä energiatehokkaampiin rakenteisiin ja vähäpäästöisempiin lämmitysmuotoihin korostuu valmiiksi merkittävä rakennusmateriaalien hiilijalanjäljen

suhteellinen osuus rakennuksen elinkaari päästöissä entisestään. Rakennuksen elinkaaren alkupäähän painottuva rakennusmateriaalien päästövähennyspotentiaali on huomattava. Myös muita merkittäviä materiaalin vaikutuksia ympäristöön, kuten muun muassa luonnonvarojen kulutus sekä rehevöittävät ja happamat päästöt tulee ennen pitkää huomioida. (Bionova Oy 2017, s. 2–8)

Rakennusmateriaalien valmistus, kuljetus, työmaatoiminnot, kunnossapito ja korjaus, materiaalien vaihto, energian ja veden käyttö, rakennuksen purkaminen ja materiaalien loppukäsittely muodostavat yhdessä rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen kokonaisuudessaan. Tällä hetkellä Suomessa ei säännöstellä rakennuksen koko elinkaaren päästöjä, vaan rakennuksen päästölaskenta on vapaaehtoista ja siihen kannustaa kaupalliset ympäristöluokitusjärjestelmät. Ongelmallista on, että rakennustuotteiden CO₂-päästötietoja löytyy kyllä useistakin eri lähteistä, mutta ne ovat laadultaan toisistaan poikkeavia. Vertailukelpoisuuden vuoksi tietojen tulisi perustua yhteiseen standardiin (EN 15804). Toinen ongelma on se, että alalta puuttuu riittävä osaaminen ja työkalut hiilijalanjäljen laskentaan. (Bionova Oy 2017, s. 2–11)

7.1 Elinkaariarviointi

Rakennuksen elinkaari jakaantuu useisiin toisiinsa liittyviin ja peräkkäisiin vaiheisiin. Elinkaariarvioinnin yksiselitteisyyden ja tarkkuuden takaamiseksi elinkaaren vaiheet määritetään EN-standardeissa. Arviointi jaetaan moduuleihin A-D, joiden alamoduulit on numeroitu. (Häkkinen & Kuittinen 2020, s. 70)

Ensimmäinen vaihe A1-A3 on tuotevaihe, joka kattaa ennen rakennuksen käyttöä syntyvät vaikutukset. Tällaisia ovat rakennustuotteiden valmistuksessa käytettävien raaka-aineiden hankinnasta, niiden kuljetuksesta tehtaalle ja tehtaassa valmistusprosesseissa syntyvät päästöt. Näiden päästöjen arvioiminen on suhteellisen helppoa ja tarkkaa. Toisen vaiheen A4-A5 eli rakentamisvaiheen päästöt muodostuvat tuotteiden kuljettamisesta tehtaalta työmaalle ja lisäksi kaikista työmaan toiminnoista siihen saakka, kunnes rakennus valmistuu. (Häkkinen & Kuittinen 2020, s. 70–71)

Käyttövaiheen B päästöt jakautuvat koko rakennuksen käytön ajalle. Tätä on vaikea arvioida etukäteen luotettavasti. Siksi käyttövaiheen arviointi tehdäänkin erilliselle arviointijaksolle. Sen aikana syntyviä päästöjä muodostuu monesta eri lähteestä B1-B7.

B1 on tuotteiden käytöstä aiheutuvat päästöt, kuten ilmanvaihtokoneesta tai lämpöpumpuista vuotavat kylmäaineet. B2 päästöt syntyvät kunnossapidosta, kuten siivouksesta tai piha-alueiden hoidosta. B3 on korjauksiin ja B4 osien vaihtoon liittyvät päästöt. Näihin sisältyy materiaalien kuluminen ja energia. B5 on laajamittaiset korjaukset, kuten rakennuksen käyttötarkoituksen muuttaminen ja niistä aiheutuvat päästöt. B6 sisältää energian käytön koko arviointijakson ajalta. B7 on veden käytöstä aiheutuneet päästöt, mutta ei kuitenkaan lämpimän käyttöveden lämmitykseen käytettävää energiaa, sillä se sisältyy energian käyttöön B6. (Häkkinen & Kuittinen 2020, s. 71)

Moduuli C muodostuu elinkaaren lopulla syntyvistä päästöistä. C1 on työkoneiden käytöstä purkuvaiheessa syntyvät päästöt. C2 muodostuu kun purkujätettä kuljetetaan jatkokäsittelyyn. Eri materiaalit voidaan purkamisen jälkeen hyödyntää eri tavoin, jolloin purkujätteen käsittelystä aiheutuvat päästöt kuuluvat alamoduuliin C3. C4 sisältää purkujätteen loppusijoituksen päästöt. (Häkkinen & Kuittinen 2020, s. 71)

Moduuli D sisältää arviot elinkaaren ulkopuolelle jäävistä hyödyistä ja haitoista. Esimerkiksi materiaalin kierrätys ja rakennustuotteiden uudelleenkäyttö voivat tuoda merkittäviä hyötyjä verrattuna uuden tuotteen valmistukseen. (Häkkinen & Kuittinen 2020, s. 71)

Elinkaarimallin mukaisia päästötietoja on saatavilla kansallisessa päästötietokannassa (www.CO2data.fi), jotka kuvaavat Suomessa käytettyjen rakennustuotteiden päästöjä tuoteryhmittäin useammasta lähteestä kootusti. Vähähiilisuuden arvioinnissa voi käyttää myös rakennustuotteiden ympäristöselosteessa olevia tuotekohtaisia tarkkoja arvoja, jos käytettävät tuotteet on päätetty. (SYKE)

7.2 Hiilijalanjälki

Hiilijalanjälki tarkoittaa jonkin tuotteen tai palvelun potentiaalista vaikutusta ilmastonmuutokseen. Se ilmaistaan hiilidioksidiekvivalentteina CO_{2e}, joka muodostuu tuotejärjestelmän kasvihuonekaasupäästöjen ja -nielujen summasta (Häkkinen & Kuittinen 2020, s. 48–49). C_{jalanjälki} pitää sisällään kaikki rakennuksen elinkaaren aikana syntyneet kasvihuonekaasupäästöt ja se ilmoitetaan hiilidioksidiekvivalenttien painona (kgCO_{2e}) (Ympäristöministeriö 2021a, s. 16). Kaavan lyhenne GWP tulee sanoista

Global Warming Potential ja se on yleisesti tunnettu. Verrattaessa kasvihuonekaasupäästön määrällistä vaikutusta (kgCO_2e) ilmaston lämpenemiseen ja hiilidioksidin vaikutusta sadan vuoden aikajaksolla nykyhetken ilmastokoostumuksessa saadaan vaikutuspotentiaali ilmaston lämpenemiseen. Kasvihuonekaasuja poistuu ilmakehästä sitoutuessa rakennusmateriaalien raaka-aineisiin. Tästä voidaan laskea kasvihuonekaasujen poistuma ($-\text{kgCO}_2\text{e}$). Kaava 19 pitää sisällään koko elinkaaren aikaiset prosessit, joista aiheutuu eloperäisiä ja fossiilisia kasvihuonekaasupäästöjä ja kasvihuonekaasujen poistumia (Ympäristöministeriö 2021b, s. 13). Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki $C_{\text{jalanjälki}}$ voidaan laskea kaavalla (Ympäristöministeriö 2021a, s. 16; Ympäristöministeriö 2021b, s. 13):

$$C_{\text{jalanjälki}} = GWP_{\text{valmistus}} + GWP_{\text{vaihdot}} + GWP_{\text{jätteenkäsittely}} + GWP_{\text{loppusijoitus}} + GWP_{\text{kuljetukset}} + GWP_{\text{työmaa}} + GWP_{\text{käyttöenergia}}, \quad (19)$$

missä $GWP_{\text{valmistus}}$ on rakennustuotteiden raaka-aineiden hankinnasta, kuljetuksista ja valmistuksesta (A1-A3) aiheutuva kasvihuonekaasupäästö, GWP_{vaihdot} on rakennustuotteiden vaihdoista aiheutuva kasvihuonekaasupäästö (B4), $GWP_{\text{jätteenkäsittely}}$ on rakennustyömaalla (A5), rakennustuotteita vaihdettaessa (B4) ja purkutyömaalla (C3) syntyvän rakennus- ja purkujätteen käsittelystä aiheutuva kasvihuonekaasupäästö, $GWP_{\text{loppusijoitus}}$ on rakennus- ja purkujätteen loppusijoituksesta aiheutuva kasvihuonekaasupäästö (A5), (B4), (C4); $GWP_{\text{kuljetukset}}$ on rakennustuotteiden kuljetuksista valmistuspaikalta rakennustyömaalle (A4), (B4) ja rakennus- ja purkujätteen kuljetuksista purkupaikalta jätteenkäsittelyyn aiheutuva kasvihuonekaasupäästö (A5), (B4), (C2), $GWP_{\text{työmaa}}$ on rakennustyömaalla (A5), rakennustuotteita vaihdettaessa (B4) ja purkutyömaalla (C1) kulutetusta energiasta aiheutuva kasvihuonekaasupäästö ja $GWP_{\text{käyttöenergia}}$ on rakennuksen käytön aikana kulutetusta energiasta aiheutuva kasvihuonekaasupäästö (B6).

7.3 Hiilikädenjälki

Hiilikädenjälki tarkoittaa sellaisia rakennushankkeista aiheutuvia ilmastohyötyjä, joita ei syntyisi ilman hanketta (Häkkinen & Kuittinen 2020, s. 49; Ympäristöministeriö 2021a, s. 28). Näihin sisältyy vältetyt ja poistetut kasvihuonekaasupäästöt, jotka syntyvät esimerkiksi rakennusosien uudelleenkäytöstä, materiaalien kierrätyksestä tai rakennuksessa tuotetusta ylimääräisestä uusiutuvasta energiasta. Lisäksi rakennustuotteisiin mahdollisesti varastoitunut eloperäinen tai tekninen hiili lisää positiivisia ilmastovaikutuksia (Ympäristöministeriö 2021b, s. 24). Myös C_k ädenjälki ilmoitetaan hiilidioksidiekvivalenttien painona (kgCO_2e). Sitä ei vähennetä hiilijalanjäljestä, vaan se ilmoitetaan negatiivisena hiilidioksidiekvivalentteina (Ympäristöministeriö 2021a, s. 28). C_k ädenjälki arviointi sisältää ilmastohyötyjä, joiden arviointi on mahdollista olemassa olevien EN-standardien laskentasäännöillä. C_k ädenjälki voidaan laskea kaava 20 käyttäen:

$$C_k\text{ädenjälki} = GWP_{\text{uudelleenkäyttö ja kierrätys}} + GWP_{\text{kierrätyspolttoaine}} + GWP_{\text{polttolaitos}} + GWP_{\text{uusiutuva energia}} + GWP_{\text{hiilivarasto}} + GWP_{\text{karbonatisoituminen}}, \quad (20)$$

missä $GWP_{\text{uudelleenkäyttö ja kierrätys}}$ on rakennusosien ja –tuotteiden tai siirtokelpoisten rakennusten uudelleenkäytöllä sekä materiaali-kierrätyksellä vältetty kasvihuonekaasupäästö (D1), $GWP_{\text{kierrätyspolttoaine}}$ on materiaalin hyödyntämisellä vältetty kasvihuonekaasupäästö, kun materiaali on käytetty tekniset vaatimukset täyttävänä kierrätyspolttoaineena (D2), $GWP_{\text{polttolaitos}}$ on materiaalin hyödyntämisellä vältetty kasvihuonekaasupäästö, kun materiaali on hyödynnetty polttolaitoksessa, jonka energiatehokkuuden hyötysuhde on yli 65 prosenttia (D2), $GWP_{\text{uusiutuva energia}}$ on rakennuksessa tai sen tontilla tuotetulla ylimääräisellä uusiutuvalla energialla vältetty kasvihuonekaasupäästö (D3), $GWP_{\text{hiilivarasto}}$ on eloperäisen tai teknisen hiilivaraston kautta vältetty kasvihuonekaasupäästö (D4) ja

$GWP_{\text{karbonatisoituminen}}$ on sementtipohjaisten materiaalien
enimmäismääräisellä karbonatisoitumisella poistettu
kasvihuonekaasupäästö (D5).

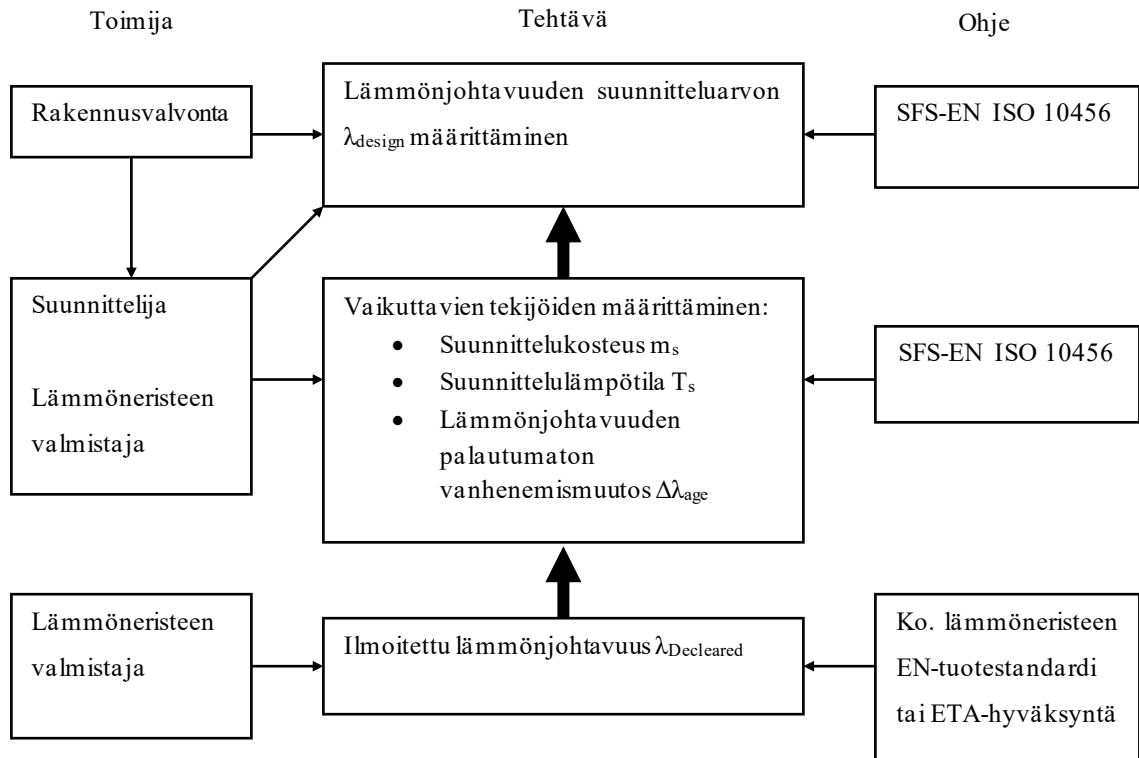
8 LÄMMÖNLÄPÄISYKERTOIMEN LASKENTA

8.1 SFS-EN-standardien mukainen laskenta

CEN:n tekninen komitea CEN/TC88 (Thermal insulating materials and products) vastaa tuotestandardien ja CEN/CT89 (Thermal performance of buildings and building components) suunnittelustandardien valmistelusta. Lämmöneristeen CE-merkinnän edellytyksenä on tuotestandardien noudattaminen. Eristevalmistajat ilmoittavat tuotteidensa standardien määräämät tekniset tiedot, kuten lämmönjohtavuuden ilmoitetun arvon $\lambda_{\text{Declared}}$, jota käytetään suunnittelun lähtötietona. Noudattamalla määriteltyjä hyväksyttäviä menettelyjä, voidaan lämmöneristeelle saada eurooppalainen tekninen hyväksyntä (ETA) ja oikeus CE-merkintään, vaikkei eristeelle olisikaan olemassa olevaa soveltuvaa tuotestandardia. (RIL 225-2004 2005, s. 7–8)

8.1.1 Lämmönjohtavuuden suunnitteluarvon määrittäminen

Aiemmin laskennassa käytetty RakMK:n osan C4 mukainen normaalin lämmönjohtavuus λ_n on korvattu standardissa SFS-EN ISO 10456 määritettyyn lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoon λ_{design} . Kuvassa 6 olevassa kaaviossa näkyy suunnittelussa käytettävän λ_{design} arvon määrittämisen vaiheet. (RIL 225-2004 2005, s. 7–15)



Kuva 6. Eurokoodin mukainen lämmönjohtavuuden suunnitteluarvon määrittäminen. (mukaillen RIL 225-2004 2005, s. 16)

Standardissa SFS-EN ISO 10456 määritellään lämpötekniisten arvojen muuntamiseen tarvittavat kaavat (21, 22), kun suunniteltava olosuhdeyhdistelmä (λ_2 , R_2) poikkeaa ilmoitetuista arvoista (λ_1 , R_1) (SFS-EN ISO 10456):

$$\lambda_2 = \lambda_1 * F_T * F_m * F_a, \quad (21)$$

$$R_2 = \frac{R_1}{F_T * F_m * F_a}, \quad (22)$$

missä F_T on lämpötilamuunnos,
 F_m on kosteusmuunnos ja
 F_a on vanhenemismuunnos.

RIL:n (225-2004 2005, s. 19–20) mukaan Suomessa käytetään λ_{design} määrittäessä suunnittelulämpötilana 10 °C, mikäli suunniteltava rakennusosa rajoittuu toiselta puolelta johonkin RakMK:n osan C3 määrittelemään rakennuksen tilaan ja toiselta ulkoilmaan tai molemmilta puolilta RakMK:ssa määriteltyyn tilaan. Standardissa kuitenkin suositellaan suunnitteluarvojen perustumista rakennusosan materiaalissa

olevaan keskilämpötilaan suunnitellun mukaisissa olosuhteissa. Lämpötilamuunnos F_T lasketaan yhtälöllä (23) (SFS-EN ISO 10456):

$$F_t = e^{f_T(T_2-T_1)}, \quad (23)$$

missä f_T on lämpötilan muuntokerroin,
 T_1 on ensimmäisen olosuhdeyhdistelmän lämpötila ja
 T_2 on toisen olosuhdeyhdistelmän lämpötila

Standardin SFS-EN ISO 10456 liitteessä A on esitetty lämpötilan muuntokertoimien arvoja eri lämmöneristemateriaaleille. Muuntokertoimelle voidaan antaa useampia muuntokertoimia eristemateriaalin ominaisuuksien mukaan. Kertoimeen vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi lämmönjohtavuus, eristelevyn paksuus ja eristekerroksen tiheys. Taulukossa 9 on esitetty standardissa ilmoitetut lämpötilan muuntokertoimet puhalletulle mineraalivillalle sekä selluvillalle. (SFS-EN ISO 10456)

Taulukko 9. Standardin SFS-EN ISO 10456 liitteessä A ilmoitettuja lämpötilan muuntokertoimia puhalletuille mineraali- ja selluvilloille.

Tuotetyyppi	Tiheys ρ kg/m ³	Lämmönjohtavuus λ W/(m·K)	Muuntokerroin f_T 1/K
Mineraalivilla irtotäytteenä	kaikki	0,035	0,0046
		0,040	0,0056
		0,045	0,0062
		0,050	0,0069
Selluloosakuitu irtotäytteenä	< 40 kg/m ³	kaikki	0,0040
	≥ 40 kg/m ³	kaikki	0,0035

Kosteuden muuntotekijän määrittämiseen on annettu kaksi kaavaa (24 ja 25). Jos kosteuspitoisuus on annettu massaosuutena, käytetään kaavaa 24 ja tilavuusosuutena annettaessa käytetään kaavaa 25. Taulukossa 10 on annettu kosteuden muuntokertoimia puhalletuille mineraali- ja selluloosaeristeille. On kuitenkin suositeltavaa käyttää valmistajan ilmoittamia varmennettuja lämpö- ja kosteusteknisiä arvoja. (SFS-EN ISO 10456)

$$F_m = e^{f_U(U_2 - U_1)}, \quad (24)$$

missä f_U on kosteuden muuntokerroin,
 U_1 on ensimmäisen olosuhdeyhdistelmän kosteuspitoisuus [kg/kg] ja
 U_2 on toisen olosuhdeyhdistelmän kosteuspitoisuus [kg/kg].

$$F_m = e^{f_\psi(\psi_2 - \psi_1)}, \quad (25)$$

missä f_ψ on kosteuden muuntokerroin,
 ψ_1 on ensimmäisen olosuhdeyhdistelmän kosteuspitoisuus [m^3/m^3] ja
 ψ_2 on toisen olosuhdeyhdistelmän kosteuspitoisuus [m^3/m^3].

Taulukko 10. Standardissa SFS-EN ISO 10456 ilmoitettuja kosteuden muuntokertoimia puhalletuille mineraali- ja selluvilloille.

Materiaali	Tiheys	Kosteus- pitoisuus 23 °C lämpötilassa ja 50% suhteellisessa kosteudessa		Kosteus- pitoisuus 23 °C lämpötilassa ja 80% suhteellisessa kosteudessa		Kosteuden muuntokerroin			
		ρ kg/m ³	U kg/kg	ψ m ³ /m ³	U kg/kg	ψ m ³ /m ³	U kg/kg	f_U	ψ m ³ /m ³
Mineraalivilla irtotäytteenä	15...60		0		0			<0,15	4
Selluloosakuitu irtotäytteenä	20...60	0,11		0,18		<0,2	0,5		

Materiaalin vanhenemiseen vaikuttaa sen tyyppi, päällyste, ponneaine, rakenne, paksuus ja lämpötila. Kokeellisesti vahvistettujen teoreettisten mallien avulla voidaan vanhenemisen vaikutus tietyille materiaaleille. Kuitenkaan vanhenemiselle ajan funktiona ei ole olemassa yksinkertaistettuja sääntöjä. Vanheneminen voidaan ottaa huomioon jo ilmoitetussa lämpötekniisessä arvossa, jolloin sitä ei enää saa huomioida uudelleen (SFS-EN ISO 10456). Umpisoluiset muovieristeet, joissa käytetään alun perin ponneaineena muuta kuin ilmaa, kuten PUR-, XPS- ja PF-lämmöneristeet, voivat olla

lämmönjohtavuuden suhteet vanhenevia. Tämä johtuu soluissa olevien kaasuseosten koostumuksen muuttumisesta iän funktiona kaasujen diffuusion takia (RIL 225-2004 2005, s. 27).

Eurokoodin mukaan luonnollisen konvektion syntymiseen huokoisessa materiaalissa vaikuttaa permeabiliteetti, paksuus ja lämpötilaero. Kylmässä ilmastossa on suurempi riski konvektiolle, koska lämpötilaero kasvaa suuremmaksi. Rayleighin luku Ra_m kuvaa luonnollisen konvektion voimakkuutta ja se voidaan kyseessä olevan standardin käyttötarkoituksessa määrittää yhtälöstä (SFS-EN ISO 10456):

$$Ra_m = 3 * 10^6 \frac{dk\Delta T}{\lambda}, \quad (26)$$

missä ΔT on lämpötilaero lämmöneristeen pintojen välillä [K],
 d on lämmöneristeen paksuus [m],
 k on lämmöneristeen permeabiliteetti [m^2] ja
 λ on lämmöneristeen lämmönjohtavuus ilman konvektiota [$W/m \cdot K$].

Permeabiliteetti voidaan määrittää yksidimensioisissa vakio-olosuhteissa kaavalla (SFS-EN ISO 10456):

$$\frac{\Delta P}{d} = \frac{\eta}{k} * \frac{V}{A}, \quad (27)$$

missä ΔP on paine-ero [N/m^2],
 η on ilman dynaaminen viskositeetti [$Pa \cdot s$] ja
 V on ilman tilavuusvirta [m^3/s].

Permeabiliteetti voidaan laskea myös standardin ISO 9053 mukaisesti ilmoitetun tuotteen ilmavirranvastuksen r avulla kaavalla (SFS-EN ISO 10456):

$$k = \frac{\eta}{r}. \quad (28)$$

Rayleighin luvun virallinen määritelmä esitetään kuitenkin kaavassa (SFS-EN ISO 10456):

$$Ra_m = \frac{g\beta\rho c_p}{\nu} * \frac{dk\Delta T}{\lambda}, \quad (29)$$

missä g on maan vetovoiman kiihtyvyys [m/s^2],
 β on ilman lämpölaajenemiskerroin [$1/K$],
 ρ on ilman tiheys [kg/m^3],
 c_p on ilman ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa [J/kgK] ja
 ν on ilman kinemaattinen viskositeetti [m^2/s].

Taulukko 11. Kriittiset arvot Rayleighin luvulle.

Lämpövirran suunta	Ra_m
Vaakasuuntaan	2,5
Pystysuuntaan, avoin yläpinta	15
Pystysuuntaan, yläpinta suojattu tuulelta	30

Luonnollisen konvektion korjausta ei tule suorittaa, mikäli Rayleighin luku ei ylitä taulukossa 11 annettua kriittistä arvoa. Jos kriittinen arvo ylitetään, tulee suorittaa yksityiskohtainen analyysi tai mittaus konvektion vaikutuksen määrittämiseksi, koska yleisesti hyväksyttyä menetelmää konvektion määrittämiseen ei tällä hetkellä ole olemassa.

8.1.2 Lämmönläpäisykerroimen laskenta

Yksinkertaistetussa laskentamenetelmässä lasketaan ensin jokaisen homogeenisen tai epähomogeenisen kerroksen lämmönvastus rakennusosassa. Yksittäiset lämmönvastukset lasketaan yhteen ja tarvittaessa lisätään pintavastukset, jolloin muodostuu kokonaislämmönvastus. Lopuksi lämmönläpäisykerroin voidaan laskea kaavalla (SFS-EN ISO 6946:2017):

$$U = \frac{1}{R_{tot}}, \quad (30)$$

missä U on lämmönläpäisykerroin [$W/m^2 \cdot K$] ja
 R_{tot} on kokonaislämmönvastus [$m^2 \cdot K/W$].

Lämmönläpäisykerrointa koskevat korjaukset on tehtävä kyseisen rakennusosan mukaan ja se lasketaan standardin liitteessä F määritetyn kaavan y mukaan. Korjausta ei kuitenkaan tarvitse tehdä, mikäli kokonaiskorjaus jää alle kolmeen prosenttiin lämmönläpäisykerroimesta. Lopputuloksena esitettävän lämmönläpäisykerroimen yhteydessä toimitetaan laskennassa käytetyt lähtötiedot ja lopputulos pyöristetään kahteen merkitsevään numeroon. (SFS-EN ISO 6946:2017)

Jos homogeeniselle kerrokselle on annettu lämmönjohtavuuden suunnitteluvarvo lämmönvastuksen suunnitteluvarvon sijaan, voidaan kerroksen lämmönvastus laskea yhtälöstä (SFS-EN ISO 6946:2017):

$$R = \frac{d}{\lambda}, \quad (31)$$

missä d on rakenneosan materiaalikerroksen paksuus [m] ja
 λ on materiaalin lämmönjohtavuuden suunnitteluvarvo [$\text{W/m}\cdot\text{K}$].

Kohtisuoraan lämpövirtaan nähden olevista tasapaksuista lämpötekniisesti homogeenisista ainekerroksista koostuvan rakenneosan kokonaislämmönvastus saadaan yhtälöstä (SFS-EN ISO 6946:2017):

$$R_{tot} = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se}, \quad (32)$$

missä R_{si} on sisäpuolinen pintavastus [$\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$],
 $R_1, R_2 \dots R_n$ on lämmönvastuksien suunnitteluvarvoja eri kerroksille [$\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$] ja
 R_{se} on ulkopuolinen pintavastus [$\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$].

Taulukko 12. Tyypillisiä pintavastuksia tasomaisille pinnoille, jotka ovat kosketuksissa ilman kanssa. (SFS-EN ISO 6946:2017)

Pintavastus ($\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$)	Lämpövirran suunta		
	Ylöspäin	Vaakasuoraan	Alaspäin
R_{si}	0,10	0,13	0,17
R_{se}	0,04	0,04	0,04

Taulukossa 12 on annettu tasomaisille pinnoille pintavastuksen arvoja, joita voidaan käyttää, ellei tarkempia tietoja ole käytettävissä. Vaakasuoraan olevia arvoja käytetään, jos lämpövirran suunta ei poikkea vaakatasosta yli 30 astetta. Standardin SFS-EN ISO 6946:2017 liitteessä C on menettelyt tilanteeseen, jossa pinta ei ole tasomainen tai reunaehdot eivät muuten täyty.

Yksinkertaistettua menetelmää ei voida käyttää rakenteisiin, joissa metalli aiheuttaa kylmäsilan eristekerroksen läpi tai tapauksissa, joissa lämmönvastuksen ylä- ja alalikiarvon suhde ylittää arvon 1,5. Jos rakenteessa on metallikiinnikkeitä, voi yksinkertaistettua menetelmää käyttää jättämällä ne huomioimatta kokonaislämmönvastuksessa ja korjata tulosta kaavan y mukaan.

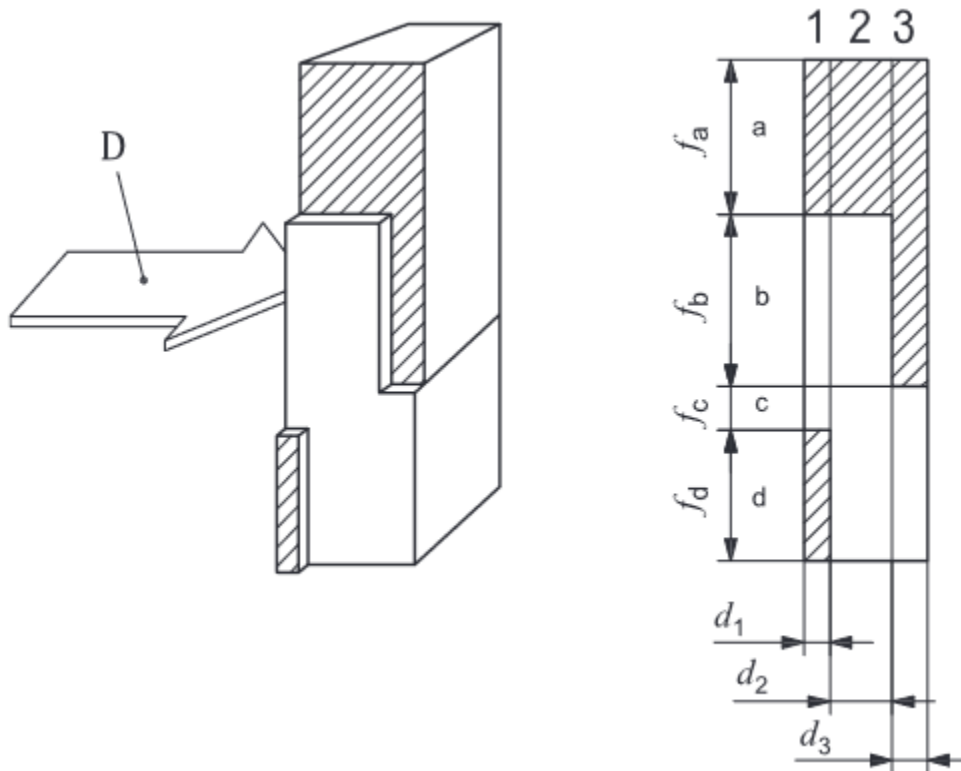
Kohtisuoraan lämpövirtaan nähden olevista lämpöteknisesti homogeenisista ja epähomogeenisista ainekerroksista koostuvan rakenneosan kokonaislämmönvastus saadaan laskemalla ylä- ja alalikiarvon keskiarvo (SFS-EN ISO 6946:2017):

$$R_{tot} = \frac{R_{tot;upper} + R_{tot;lower}}{2}, \quad (33)$$

missä $R_{tot;upper}$ on kokonaislämmönvastuksen ylälikiarvo [$m^2 \cdot K/W$] ja $R_{tot;lower}$ on kokonaislämmönvastuksen alalikiarvo [$m^2 \cdot K/W$].

Laskettaessa likiarvoja rakennusosa tulee jakaa kerroksiin ja osuuksiin kuvan 7 mukaisesti siten, että se jakautuu lämpöteknisesti homogeenisiin osiin m_j . Kuvan 7 rakenneosa on jaettu ainekerroksiin 1, 2 ja 3 sekä osuuksiin a, b, c ja d ja nuoli D kuvastaa lämpövirran suuntaa. Osuutta m ($m = a, b, c, \dots, q$) kohtisuorassa leikkauksessa komponentin pintoihin nähden oleva pinta-alaosuus on f_m . Ainekerroksen j ($j = 1, 2, \dots, n$) kohtisuorassa rakennusosan pintaa nähden oleva paksuus on d_j . Näin ollen osalla m_j on lämmönjohtavuus λ_{mj} , paksuus d_j , pinta-alaosuus f_m ja lämmönvastus R_{mj} . Pinta-alaosuus on osa kokonaispinta-alaa, jolloin (SFS-EN ISO 6946:2017):

$$f_a + f_b + \dots + f_q = 1. \quad (33)$$



Kuva 7. Lämpötekniisesti epähomogeenisen rakenneosan ainekerrokset ja osuudet. (SFS-EN ISO 6946:2017)

Kokonaislämmönvastuksen yläkiiarvo määritetään olettamalla lämpövirran olevan yksiulotteinen ja kohtisuorassa rakennusosaan nähden. Yläkiiarvo saadaan yhtälöllä:

$$\frac{1}{R_{tot;upper}} = \frac{f_a}{R_{tot;a}} + \frac{f_b}{R_{tot;b}} + \dots + \frac{f_q}{R_{tot;q}}, \quad (34)$$

missä $R_{tot;a}$, $R_{tot;b}$, ... , $R_{tot;q}$ on yhtälön 8 mukaan lasketut kokonaislämmönvastukset jokaiselle osuudelle ja f_a , f_b , ... , f_q on pinta-alaosuudet jokaiselle osuudelle.

Kokonaislämmönvastuksen alakiiarvo määritetään olettamalla kaikkien rakenneosan pintojen kanssa yhdensuuntaisten pintojen olevan isotermisiä pintoja. Jos ilmakerrosta vastaan on epätasainen pinta, voidaan laskelmissa lisätä kapeampien osuuksien paksuutta muuttamatta lämmönvastusta tai kaventaa leveämpiä osuuksia, jolloin lämmönvastuskin pienenee. Ekvivalentti lämmönvastus R_j lasketaan jokaiselle lämpötekniisesti epähomogeeniselle kerrokselle kaavalla (SFS-EN ISO 6946:2017):

$$\frac{1}{R_j} = \frac{f_a}{R_{aj}} + \frac{f_b}{R_{bj}} + \dots + \frac{f_q}{R_{qj}}, \quad (35)$$

missä R_j on ekvivalentti lämmönvastus [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$] ja R_{aj} , R_{bj} , ... , R_{qj} on lämmönvastus jokaiselle lämpöteknisesti epähomogeenisen ainekerroksen osuudelle [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$].

Tämän jälkeen alalikiarvo voidaan määrittää yhtälöllä 33. Vaihtoehtoinen menetelmä, jolla päästään samaan lopputulokseen, on käyttää ekvivalenttia lämmönjohtavuutta (SFS-EN ISO 6946:2017):

$$R_j = \frac{d_j}{\lambda_{eq;j}}, \quad (36)$$

missä ekvivalentti lämmönjohtavuus määritetään yhtälöstä:

$$\lambda_{eq;j} = \lambda_{aj} * f_a + \lambda_{bj} * f_b + \dots + \lambda_{qj} * f_q, \quad (37)$$

missä $\lambda_{eq;j}$ on ainekerroksen j ekvivalentti lämmönjohtavuus.

Jos epähomogeeninen ainekerros sisältää ilmakerroksia, voidaan se käsitellä materiaalina, jonka ekvivalentti lämmönjohtavuus saadaan yhtälöstä (SFS-EN ISO 6946:2017):

$$\lambda_{eq;j} = \frac{d_j}{R_g}, \quad (38)$$

missä R_g on standardin SFS-EN ISO 6946:2017 liitteen D mukaan määritelty ilmakerroksen lämmönvastus.

8.1.3 Lämmönläpäisykertoimen korjaukset

Standardin SFS-EN ISO 6946:2017 mukaan lasketulle lämmönläpäisykertoimelle tehdään tarvittaessa korjaukset koskien lämmöneristeessä olevia ilmarakoja, lämmöneristyskerrosta läpäiseviä mekaanisia kiinnikkeitä ja käännetyille katoille

eristeeseen kulkeutuvaa vettä. Korjattu lämmönläpäisykerroin saadaan yhtälöstä (SFS-EN ISO 6946:2017):

$$U_c = U + \Delta U, \quad (39)$$

missä U_c on korjattu lämmönläpäisykerroin [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$] ja ΔU on lämmönläpäisykerroimen korjaustekijä [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$].

Lämmönläpäisykerroimen korjaustekijä saadaan yhtälöstä (SFS-EN ISO 6946:2017):

$$\Delta U = \Delta U_g + \Delta U_f + \Delta U_r, \quad (40)$$

missä ΔU_g on ilmarakojen korjaustekijä [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$],
 ΔU_f on mekaanisten kiinnikkeiden korjaustekijä [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$] ja
 ΔU_r on käännettyjen kattojen korjaustekijä [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$].

Ilmaraolla tarkoitetaan lämmöneristeessä olevia ilmarakoja tai eristyksen ja viereisen rakenteen väliin jääviä ilmarakoja, joita ei ole piirustuksissa, mutta niitä esiintyy todellisessa rakenteessa. Ilmaraot saattavat lisätä rakennusosan säteily- ja konvektiolämmönsiirtoa riippuen ilmaraon koosta suunnasta ja sijainnista. Rakenteesta ja sen epäsäännöllisyydestä johtuvat mittapoikkeamat, lämmöneristeen leikkaamisessa ja asentamisessa syntyvät poikkeamat ja lämmöneristetuotteiden pienet mittavaihtelut aiheuttavat ilmarakoja. Myös esimerkiksi laastiroiskeista aiheutuva tasomaisuuden poikkeama voi aiheuttaa rakenteeseen ilmarakoja. Kuitenkin vain lämmöneristeen läpi ulottuvat ilmaraot aiheuttavat korjausta vaativan suurenemisen lämmönläpäisykerroimeen. Asentamalla lämmöneriste useampaan kerrokseen saumat limitettyinä voi välttää lämmönläpäisykerroimen korjaustoimenpiteet. korjaustekijä voidaan laskea yhtälöstä (SFS-EN ISO 6946:2017):

$$\Delta U_g = \Delta U'' * \left(\frac{R_1}{R_{tot}} \right)^2, \quad (41)$$

missä R_1 on ilmarakoja sisältävän kerroksen lämmönvastus [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$],
 R_{tot} on kokonaislämmönvastus huomioimatta lämpösilloja [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$] ja
 $\Delta U''$ on taulukossa 13 annettu korjauskertoimen [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$].

Taulukko 13. Ilmarakojen korjauskertoimia. (SFS-EN ISO 6946:2017)

Taso	Ilmaraon kuvaus	$\Delta U''$ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$
0	Lämmöneristeessä ei ole ilmarakoja tai on vain vähäisiä ilmarakoja, joilla ei ole merkittävää vaikutusta lämmönläpäisykerroimeen.	0,00
1	On lämmöneristeiden läpäiseviä ilmarakoja, jotka eivät aiheuta ilman kiertokulkua lämmöneristeiden lämpimän ja kylmän puolen välillä.	0,01
2	On lämmöneristeiden läpäiseviä ilmarakoja, jotka aiheuttavat ilman kiertokulkua lämmöneristeiden lämpimän ja kylmän puolen välillä.	0,04

Mekaanisten kiinnikkeiden vaikutusta voidaan arvioida yksityiskohtaisella laskennalla käyttäen standardin ISO 10211 mukaista menettelyä, jossa saadaan kiinnikkeen kohdalle yksittäinen paikallinen lämmönläpäisykerroin χ . Tällöin mekaanisten kiinnikkeiden korjaustekijäksi saadaan (SFS-EN ISO 6946:2017):

$$\Delta U_f = n_f * \chi, \quad (42)$$

missä χ on paikallinen lämmönläpäisykerroin [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$] ja
 n_f on kiinnikkeiden määrä neliömetrille.

Mekaanisten kiinnikkeiden vaikutusta pystytään arvioimaan myös likimääräisellä menettelyllä, jota voidaan käyttää jos kiinnikkeitä ei huomioida muilla menetelmillä. Eristekerrosta lävistävien kattokiinnikkeiden, elementtien kiinnityshakasten tai muiden mekaanisten kiinnikkeiden lämmönläpäisykerroimen korjaustekijä saadaan kaavalla (SFS-EN ISO 6946:2017):

$$\Delta U_f = \alpha \frac{\lambda_f A_f n_f}{d_0} \left(\frac{R_1}{R_{T,h}} \right)^2, \quad (43)$$

missä α on kiinnikkeestä riippuva kerroin,
 λ_f on kiinnikkeen lämmönjohtavuus [$\text{W/m}\cdot\text{K}$],
 A_f on yhden kiinnikkeen poikkipinta-ala [m^2],
 d_o on kiinnikkeen ympärillä olevan lämmöneristyskerroksen paksuus [m],
 R_1 on kiinnikkeen ympärillä olevan lämmöneristyskerroksen lämmönvastus [$\text{m}^2\cdot\text{K/W}$] ja
 $R_{T,h}$ on kylmäsiltoja huomioimaton rakenneosan kokonaislämmönvastus [$\text{m}^2\cdot\text{K/W}$].

Kerroin α saadaan kiinnikkeen mukaan seuraavasti (SFS-EN ISO 6946:2017):

$$\alpha = 0,8, \text{ jos kiinnike läpäisee kokonaan lämmöneristyskerroksen,} \quad (44)$$

$$\alpha = 0,8 * \frac{d_1}{d_o}, \text{ jos kiinnike läpäisee osittain lämmöneristyskerroksen,} \quad (45)$$

missä d_1 on lämmöneristyskerroksen läpäisevän kiinnikkeen pituus [m].

Tämä korjausmenettely koskee vain lämmitettyjä ja suulakepuristetulla polystyreenillä (XPS) eristettyjä käännettyjä kattoja. Korjaus on tarpeen, koska sadevesi kulkeutuu lämmöneristyksen ja vedeneristysmateriaalin väliin. Käännetyn katon lämmönläpäisykertoimen korjaustekijä saadaan yhtälöstä (SFS-EN ISO 6946:2017):

$$\Delta U_r = p * f * x * \left(\frac{R_1}{R_{tot}} \right)^2, \quad (46)$$

missä p on lämmityskauden keskimääräinen sademäärä, joka perustuu sijaintiin liittyviin tietoihin (esimerkiksi sääasema) tai annettuun paikallisiin, alueellisiin tai kansallisiin määräyksiin tai muihin kansallisiin asiakirjoihin tai standardeihin [mm/vrk],

f on vuotokerroin, mistä selviää osuus sademäärästä, joka saavuttaa vedeneristysmateriaalin,

x on kerroin vedeneristeelle päässeän veden aiheuttamalle lisääntyneelle lämpöhäviölle $[(W \cdot \text{vrk}) / (m^2 \cdot K \cdot \text{mm})]$,

R_1 on lämmönvastus vedeneristeen yläpuoliselle lämmöneristeelle $[m^2 \cdot K/W]$ ja

R_{tot} on kokonaislämmönvastus ennen korjausta $[m^2 \cdot K/W]$.

8.2 RIL 225-2004 mukainen laskenta

RIL:n ohjetta (225–2004 2005, s. 9) käytetään laskettaessa eristeiden lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoja ja rakennusosien korjattuja lämmönläpäisykertoimia yhdessä standardien SFS-EN ISO 6946, SFS-EN ISO 10456 ja SFS-EN ISO 13370 kanssa. Ohjeen päätehtävinä on avustaa standardeissa suunnittelijalle päätettäväksi jätettyjen kysymysten ratkaisussa ja täydentää standardeja huomioiden myös RakMK:n osissa C3 ja C4 esitettyjä asiaan liittyviä määräyksiä ja ohjeita. Ohjeella tähdätään Suomen ilmasto-oloissa ja rakennuskannassa toimivaan hyvän ja fysikaalisesti oikein perustein tapahtuvan suunnittelun toteutumiseen.

8.2.1 Lämmönjohtavuuden suunnitteluarvon määrittäminen

Ohjeessa lämmöneristeet tai muut rakennusaineet jaetaan kolmeen eri ryhmään. Ryhmään 1 kuuluvat EN-tuotestandardin tai ETA-hyväksynnän täyttävät lämmöneristeet, joiden ilmoitettu lämmönjohtavuus on ilmoitettu ja valvottu hyväksynnän vaatimusten mukaisesti. Ryhmään 2 kuuluvat ryhmään 1 kuulumattomat muut rakennusaineet tai -tuotteet, joiden lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo on valvottu ja määritetty EN-tuotestandardin tai ETA-hyväksynnän mukaisesti. Ryhmään 3 kuuluvat rakennusaineet tai -tuotteet, joiden tekninen hyväksyntä ei kata lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoa tai joilla ei ole eurooppalaista teknistä hyväksyntää. (RIL 225-2004 2005, s. 14–15)

Ryhmän yksi lämmöneristeet vaativat standardin SFS-EN ISO 10456 mukaisen laskennan huomioiden kuitenkin ohjeessa esitettäviä ohjeita vanhenemismuunnosta, suunnittelulämpötilaa ja -kosteutta koskien. Ryhmän kaksi rakennusaineille on teknisessä hyväksynnässä annettu lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo, joten suunnittelijan tarvitsee huomioida vain hyväksynnässä asetetut ehdon suunnitteluarvoa koskien. Ryhmän kolme rakennusaineiden lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoksi valitaan taulukkoarvo standardista EN 12524. (RIL 225-2004 2005, s. 15)

Lämmöneristeet jaetaan ominaisuuksiensa mukaan hygroskooppisiin ja lievästi hygroskooppisiin. Hygroskooppisiin eristeisiin kuuluvat lämmöneristeet, jotka voivat sitoa kosteutta yli 2 % kuivapainosta. Muun muassa pellavaeristeet ja puukuitueristeet kuuluvat hygroskooppisiin eristeisiin. Lievästi hygroskooppisiin eristeisiin kuuluvat lämmöneristeet, jotka voivat sitoa kosteutta korkeintaan 2 % kuivapainosta. Muun muassa mineraalivillat, solumuovieristeet kuten XPS ja EPS, polyesterikuitueriste ja kevytsora kuuluvat lievästi hygroskooppisiin eristeisiin. Yläpohja, pois lukien käännetty katto, on maanpinnan yläpuolinen rakennusosa, joka suunnitellaan toimivaksi kuivana ja kuivumiskykyiseksi. Lievästi hygroskooppisten lämmöneristeiden kosteuspitoisuus kuivana pysyvässä rakennusosassa on vähäinen, eikä sillä ole vaikutusta lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoa määrittäessä. Hygroskooppisille lämmöneristeille tehdään kosteuden vaikutuksen huomioon ottava lisäys $\Delta\lambda_{hyg}$, kun se suunnitellaan kuivana pysyvään rakennusosaan. Lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoksi saadaan (RIL 225-2004 2005, s. 22–23):

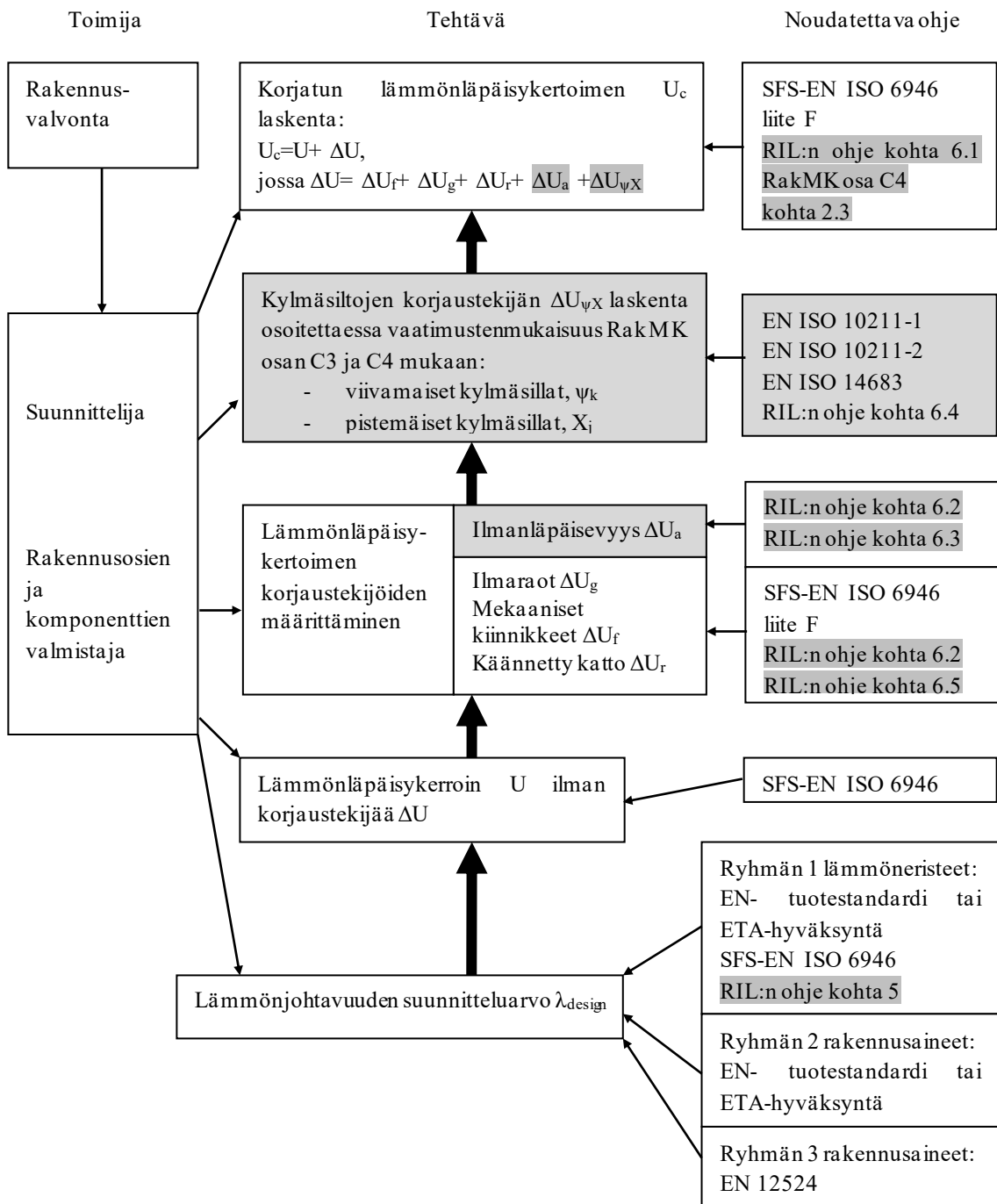
$$\lambda_{design} = \lambda_D * F_T * F_m * F_a + \Delta\lambda_{hyg}, \quad (47)$$

missä $\Delta\lambda_{hyg} = 0,001$ (W/m·K).

Ohjeessa annetaan useille lämmöneristeille muuntokertoimia, muuntotekijöitä ja kosteudelle alttiille rakennusosille lämmönjohtavuuden lisäyksiä. Ne eivät kuitenkaan kosketa puhalluseristeisiä rakennusten yläpohjia.

8.2.2 Lämmönläpäisykertoimen laskenta ja korjaukset

Rakennusosan korjatun lämmönläpäisykertoimen laskeminen tapahtuu kuvassa 8 olevan kaavion mukaisesti. Kuvassa esitetyt harmaapohjaiset tekstit ovat täydennyksiä ja täsmennyksiä RIL:n ohjeessa standardin SFS-EN ISO 6946 rinnalle, jonka mukaista menettelyä myös ohje noudattaa. (RIL 225-2004 2005, s. 16–17)



Kuva 8. RIL:n soveltamisohjeen mukainen rakennusosan korjatun lämmönläpäisykertoimen laskenta. (mukaillen RIL 225-2004 2005, s. 17)

Kuten kuvassa 8 olevasta kaaviosta huomataan, korjatun lämmönläpäisykertoimen U_c laskenta suoritetaan standardissa SFS-EN ISO 6946 määritetyn kaavan (39) mukaan. Ero muodostuu ΔU laskennassa käytettävien lisätermien ΔU_a ja $\Delta U_{\psi X}$ käytöstä kaavan (48) mukaisesti (RIL 225-2004 2005, s. 28):

$$\Delta U = \Delta U_g + \Delta U_f + \Delta U_r + \Delta U_a + \Delta U_{\psi X}, \quad (48)$$

missä ΔU_a on ilmanläpäisevyyden korjaustekijä [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$] ja $\Delta U_{\psi X}$ on kylmäsiltojen korjaustekijä [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$].

Kylmäsiltojen lisätermi $\Delta U_{\psi X}$ voidaan jättää pois kaavasta, koska ohje on suunniteltu toimimaan yhdessä Suomessa aikaisemmin käytetyn RakMK:n osan C3 kanssa. Kylmäsiltoja otetaan huomioon vasta rakennusvaiheen ominaislämpöön tehtävänä lisäyksenä aiemman U_c -arvon sijaan. (RIL 225-2004 2005, s. 40)

Kokonaan poistuneen Suomen rakennusmääräysten mukaisessa mitoituksessa otettiin lämmöneristemateriaalin ilmanläpäisevyys huomioon normaalin lämmönjohtavuuden arvon lisäkertoimessa tyyppihyväksyntää myönnettäessä tai lämmönläpäisykertoimen lisäyksenä, ellei sitä huomioitu lämmönjohtavuudessa. Nyt käytössä olevien eurooppalaisten standardien mukaisessa mitoituksessa sitä ei kuitenkaan ole huomioitu. Myöskään eristeen suojaustavan vaikutusta ei ole pakollista huomioida nykyisin hyväksyttävässä suunnittelussa. (RIL 225-2004 2005, s. 31–32)

Lisätermin ΔU_a ohjetta sovelletaan rakenteisiin, joissa on käytetty hyvin ilmaa läpäisevää lämmöneristettä, jonka lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvo on 0,025 $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ja 0,060 $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ välillä. Lämmöneristeen suunta voi olla pystysuoraan vaakasuoraan tai kallistettu. Ohjeessa on huomioitu myös pakotetun konvektion vaikutus eristävyteen ja sen vuoksi siinä on määritelty lämmöneristykselle kaksi suojaustapaa a ja b. Suojaustavassa a lämmöneristys on olennaisesti ulkopuolisilta ilmvirtauksilta suojatussa ilmansulun ja tuulensuojan väliin muodostuvassa kotelorakenteessa. Suojaustavassa b lämmöneristys on toiselta puolelta kiinni ilmansulusta, mutta toinen pinta on suojaamattomana ilmatilaa tai -väliä vasten. Lisätermi ΔU_a voidaan laskea kaavalla (RIL 225-2004 2005, s. 28–39):

$$\Delta U_a = \Delta U_a'' * (R_I/R_T)^2, \quad (49)$$

missä $\Delta U_{a''}$ on lämmöneristeen ilmanläpäisevyyden vaikutuksen huomioon ottava korjauskerroin [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$],
 R_I on ilmaa läpäisevän lämmöneristeen muodostaman kerroksen lämmönvastus [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$] standardin SFS-EN ISO 6946 mukaan ja
 R_T on rakennusosan kokonaislämmönvastus [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$] standardin SFS-EN ISO 6946 mukaan.

Lämmöneristeen ilmanläpäisevyyden vaikutuksen huomioon ottava korjaustekijä $\Delta U_{a''}$ voidaan määrittää taulukon 14 avulla tai se voidaan ratkaista tarkoitukseen soveltuvaa fysikaalista mallia ja ratkaisumenetelmää käyttäen. Lämmöneristeen valmistaja ilmoittaa yleensä avohuokoisille lämmöneristeille ilmanläpäisevyyden tai ilmavirtauksen ominaisvastuksen. Ellei valmistaja ilmoita arvoja, voidaan käyttää taulukossa 15 annettuja arvoja. Mikäli lämmöneristeen lämmönjohtavuus on suurempi kuin $0,060 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}$ tai ilmanläpäisevyys on suurempi kuin $1000 \cdot 10^{-6} [\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}]$ on sille suoritettava erillinen virtaustekninen tarkastelu. (RIL 225-2004 2005, s. 35–37)

Taulukko 14. lämmöneristeen ilmanläpäisevyyden vaikutuksen huomioon ottava korjauskerroin $\Delta U_{a''}$ yläpohjan vaakasuoralle lämmöneristykselle (mukaillen RIL 225-2004 2005, s. 36).

Lämmöneristysten suojaustapa	Lämmöneristeen		korjauskerroin $\Delta U_{a''}$ [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]
	Ilmanläpäisevyys L [$\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$]	Ilmavirran ominaisvastus R_a [$\text{kPa} \cdot \text{s}/\text{m}^2$]	
a	$100 \cdot 10^{-6}$	20	0
	$200 \cdot 10^{-6}$	5	0,005
	$400 \cdot 10^{-6}$	2,5	0,005
	$800 \cdot 10^{-6}$	1,25	0,010
b	$50 \cdot 10^{-6}$	20	0
	$100 \cdot 10^{-6}$	10	0,005
	$200 \cdot 10^{-6}$	5	0,010
	$400 \cdot 10^{-6}$	2,5	0,010
	$800 \cdot 10^{-6}$	1,25	0,020

Taulukko 15. Puhallettavien lämmöneristeiden ilmanläpäisevyyden keskimääräisiä arvoja (mukaiillen RIL 225-2004 2005, s. 38).

Lämmöneriste	Tiheys ρ [kg/m ³]	Ilmanläpäisevyys L [m ³ /m ² ·s·Pa]	Ilmavirran ominaisvastus Ra [kPa·s/m ²]
Irtopuhallettava puukuitueriste	30	$120 \cdot 10^{-6}$	8
	45	$50 \cdot 10^{-6}$	20
Irtopuhallettava lasivillaeriste	23	$700 \cdot 10^{-6}$	1,4
	28	$500 \cdot 10^{-6}$	2
Irtopuhallettava kivivillaeriste	35	$400 \cdot 10^{-6}$	2,5
	40	$250 \cdot 10^{-6}$	4

8.3 COMBI- ja FRAME-hankkeiden tutkimustulokset

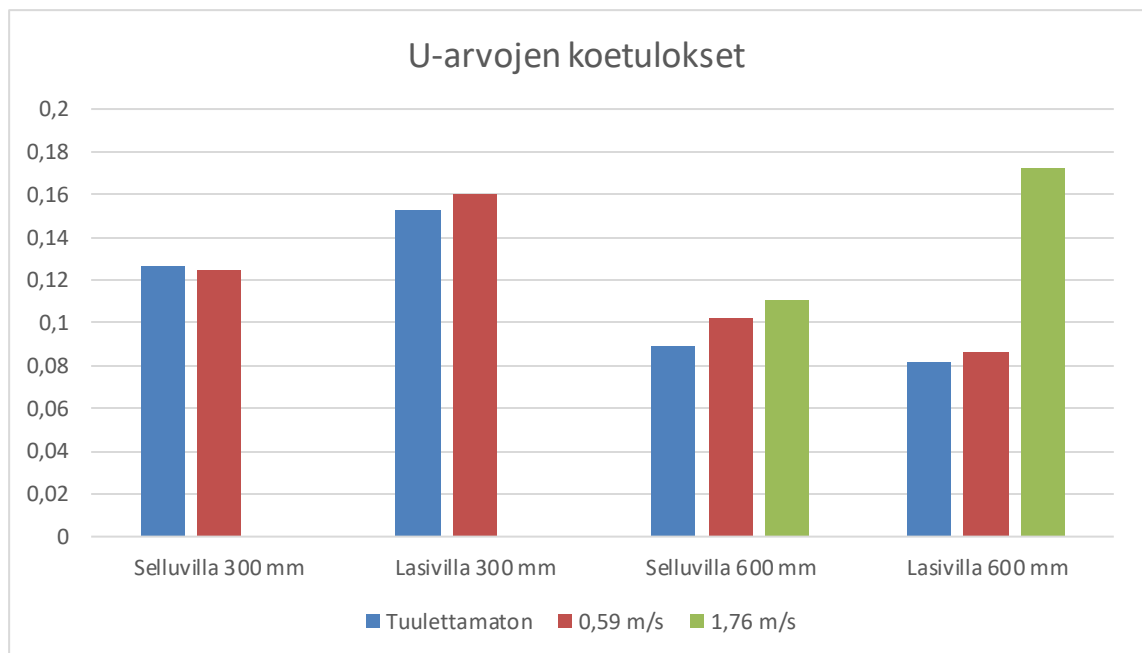
FRAME-tutkimuksessa selvitettiin tulevaisuuden ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutusta rakennuksen rakenteiden rakennusfysikaaliseen toimintaan. Tutkimuskokonaisuuden yhtenä osana oli kokeellinen tutkimus yläpohjaan puhallettavien lämmöneristeiden sisäisestä konvektiosta ja sen vaikutuksista koerakenteiden lämmönläpäisykertoimeen. (Pakkanen 2012, s. 1)

Kokeet suoritettiin Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan osaston pakkashuoneessa. Pakkashuoneen sisään sijoitetun lämpökammion yläpinta eristettiin tutkittavalla materiaalilla, joten mittaukset suoritettiin erikseen jokaiselle materiaalille ja materiaalipaksuudelle. Kokeiden aikana lämpötiloja seurattiin pakkashuoneessa, lämpökammiossa ja eristeen sisällä hyödyntäen kalibroituja termolankoja ja puolijohdeantureita. Lisäksi kokeen toisessa osassa mitattiin lämpökammion lämmitystehoa. Kokeen ensimmäisessä osassa tarkasteltiin lämpötilakenttiä eristeen sisällä. Toisessa osassa määriteltiin lämpövirtoja koerakenteiden läpi. Kokeiden eri vaiheiden aikana eristeen pinnalle puhallettiin suuruudeltaan keskimäärin 0,59 m/s eristeen suuntainen laminaarinen ilmavirta ja eristeen pintaan kohtisuoraan puhaltava turbulenttinen keskimäärin 1,76 m/s suuruinen ilmavirtaus. (Pakkanen 2012, s. 2–37)

Kokeita suoritettiin 300 mm ja 600 mm paksuuksille puhallettavalle puukuitueristeille, puhallettavalle lasivillalle ja lasivillalevyille sekä levypuhallus hybridinä lasivillalle.

Puhallettavan lasivillan asennus onnistui valmistajan ilmoittamiin tiheyksiin molemmilla kerrospaksuuksilla, kun taas selluvillaa asennettaessa tiheys kasvoi kerrospaksuuden kasvaessa suuremman painuman takia. Puhalluseristeet asennettiin kokeessa koerakenteeseen käsin, jonka vuoksi eristeiden rakenne jää merkittävästi erilaiseksi kuin koneellisesti puhallettaessa. Kokeessa suoritettujen ilmanläpäisevyyskokeiden tulokset poikkesivat valmistajien antamista arvoista ja osittain kirjallisuudessa esiintyvistä arvoista. (Pakkanen 2012, s. 22–59)

Ensimmäisen tutkimusvaiheen tuloksissa määritetyt lämpötilakentät korreloivat hyvin ilmanläpäisevyyden arvoihin. Kokeessa käytettyjen tuulensuojakalvojen huomattiin estävän tehokkaasti kylmän ilman sekoittuminen lämmöneristeeseen sisään, mutta se ei poistanut sisäisen konvektion aiheuttamaan lämpövirran kasvua. Kokeen toisessa vaiheessa koelaitteiston mukaiselle rakenteelle määritettiin koeaukon läpi johtuneen lämpövirran ja lämpötilaeron avulla lämmönläpäisykertoimet eri lämmöneristeille ja olosuhteille. Taulukossa 16 esitettävissä U-arvojen tuloksissa on lämmöneristeeseen lisäksi koelaitteistossa olevan vanerin lämmönvastus. (Pakkanen 2012, s. 38–37)

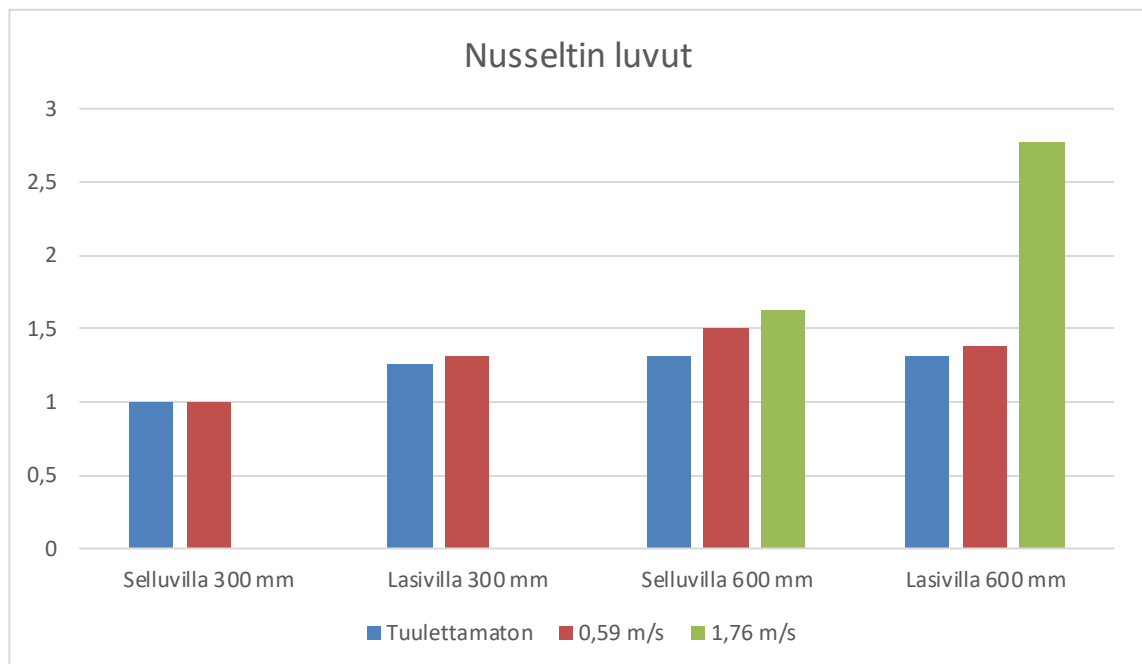


Kuva 9. Frame-hankkeessa saatuja U-arvoja koerakenteelle eri olosuhteissa (mukaillen Pakkanen 2012, s. 45–48).

Kokeessa havaittiin sisäistä konvektiota lämmöneristeessä lähes kaikissa eri olosuhteissa. Koerakenteen lämmönläpäisykertoimet poikkesivat teoreettisesta arvostaan keskimäärin +11 % tuulettumattomassa, +18 % laminaarisessa 0,59 m/s

suuruudessa ilmavirtauksessa ja +32 % turbulenttisessa 1,76 m/s suuruudessa ilmavirtauksessa. Käytettäessä levyvillaa sisäpinnassa 1/3...1/2 verran eristepaksuudesta puhallettavan lasivillan kanssa, voidaan parantaa huomattavasti rakenteen lämmöneristyskykyä. (Pakkanen 2012, s. 55–59)

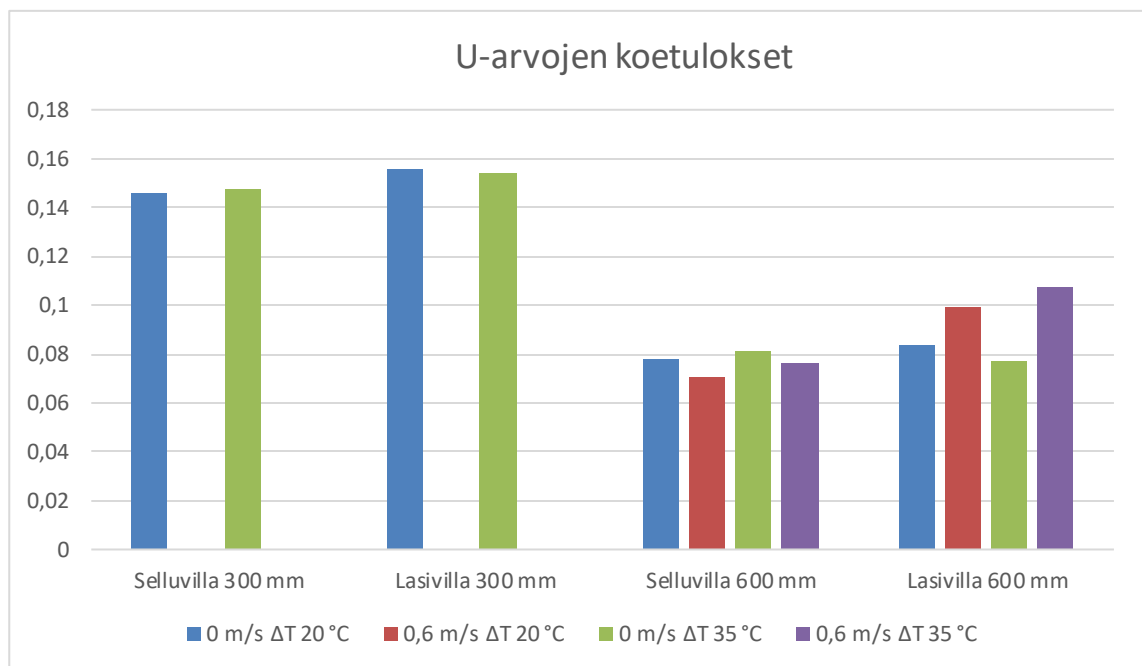
Tutkimuksessa laskettujen modifioitujen Rayleighin lukujen arvot jäivät standardissa SFS-EN ISO 10456 annetun raja-arvon alle. Siitä huolimatta sisäistä konvektiota havaittiin melkein kaikissa koerakenteissa. Tutkimuksessa suositellaankin raja-arvon pienentämistä 5,0. Nusseltin luku taas kuvaa sisäisen konvektion määrää rakenteessa. Luvun ollessa 1,0 rakenteessa ei tapahdu konvektiota, kun taas luvun ollessa 1,5 on rakenteen läpi kulkevasta lämpövirrasta 50 % sisäisen konvektion aiheuttamaa. (Pakkanen 2012, s. 55–60)



Kuva 10. Frame-hankkeessa saatuja Nusseltin lukuja koerakenteelle eri olosuhteissa (mukaiillen Pakkanen 2012, s. 52).

Pakkasen (2012, s. 60) mukaan 600 mm paksuisilla puhalluseriteisillä yläpohjarakenteilla voi lämpövirta rakenteen läpi kasvaa merkittävästi sisäisen konvektion takia. Sisäisen konvektion vähentäminen on helpointa tehdä ilmanläpäisevyyttä vähentämällä, joka taas pienenee lämmöneristeen tiheyden kasvaessa tai sidosainetta lisäämällä.

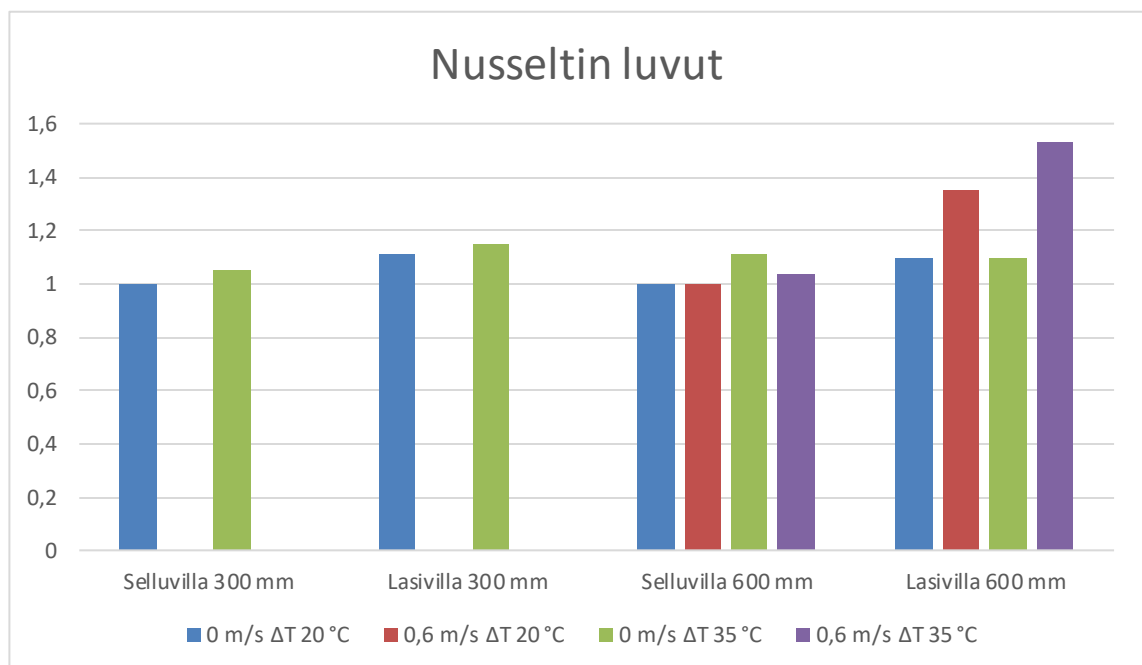
COMBI-hankkeessa tutkittiin palvelurakennusten energiatehokkuuden parantamiseen liittyviä vaikutuksia. Hankkeen yhtenä osana oli jatkaa tutkimuksia paksuja vaakasuoria puhalluseristettäviä rakenteita koskien, koska FRAME-hankkeessa jäi paljon avoimia kysymyksiä, kuten käsin asennettu eriste, pieni tutkimusaukon pinta-ala ja kattoristikoiden vaikutus. Uudessa tutkimuksessa käytettiin uutta EN ISO 8990 -standardin täyttävää calibrated hot-box menetelmää hyödyntävää laitteistoa, jonka avulla tutkimusaukkoa pystyttiin kasvattamaan 5 m² FRAME:ssa käytetyn 1,44 m² sijaan. Lisäksi tutkimuksissa lämmöneristeen asennettiin villanpuhallukseen tarkoitetulla laitteistolla. Kokeita tehtiin rakenteilla ilman kattoristikoita ja kattoristikkojen kanssa. Kokeissa tutkittiin yhteensä 24 erilaista rakennetta, joissa lämmöneristeenä käytettiin puhallettavaa lasivillaa tai selluvillaa. Kokeissa tutkittiin myös 0,6 m/s suuruisen lämmöneristeen pinnan suuntaisen ilmavirran vaikutusta. Kuvassa 11 on esitetty kokeen tuloksia rakenteille, joissa on käytetty kattoristikkoa. (Kivioja 2020, s. 1–6)



Kuva 11. COMBI-hankkeessa saatuja U-arvoja kattoristikollisille koerakenteille eri olosuhteissa. (mukailten Kivioja 2020, s. 6)

Kiviojan (2020, s. 5–7) mukaan konvektion aiheuttama lämpövirran lisäys vaihteli koko tutkimuksessa puukuitueristekerroksilla 0...16 % välillä, lasivillalla ristikon kanssa 10...53 % välillä ja lasivillalla ilman ristikkoa 38...63 % välillä. Selluvillalla ei juurikaan huomattu sisäistä konvektiota 20 ° lämpötilaerolla, mutta lasivillalla sitä alkoi

esiintyä huomattavasti. Ristikoiden ei havaittu lisäävän sisäistä konvektiota selluvillalla, mutta normaali kylmäsiltavaikutus oli olemassa. Lasivillassa sen sijaan ristikot pienensivät sisäistä konvektiota 11...36 %. Lämpötilakentistä pystyttiin havaitsemaan ilman virtaavan keskellä rakennetta ylöspäin ja reunoista alaspäin. Eristeen ominaisuuksilla oli selkeä vaikutus sisäiseen konvektioon. Lasivillassa esiintyi sisäistä konvektiota yhtä tapausta lukuun ottamatta aina enemmän kuin selluvillalla. Erot olivat suurimmat ristikkottomissa kokeissa, jolloin lasivillassa havaittiin 61 % enemmän sisäistä konvektiota. Selluvillassa sisäiseen konvektioon vaikutti eniten lämpötilaeron kasvu, kun taas ilmavirralla ei havaittu mitään vaikutuksia. Eristekerroksen paksuuden kasvattamisella ei ollut vaikutusta selluvillalla eikä lasivillalla. Lasivillalla ilmavirran lisääminen eristeen pinnalle nosti sisäistä konvektiota. Huomioitavaa on myös, että ristikoiden lisääminen pienensi ilmavirran vaikutusta. Lasivillalla lämpötilaerolla ei ollut suurta vaikutusta tuulettamattomassa tilanteessa, mutta suuren lämpötilaeron ja ilmavirtauksen yhteisvaikutus nosti lämpövirtaa 17–18 %. FRAME-hankkeeseen verrattaessa vaikutti selluvillan asennustavan vaihtamisella koneelliseksi olevan suuri merkitys sisäisen konvektion määrään pienemiseen toisin kuin lasivillalla, jonka tuloksissa ei näkynyt suurta muutosta. Kuvassa 12 on esitetty tutkimuksessa määritetyjä Nusseltin lukuja ristikkorakenteisissa mittauksissa.



Kuva 12. COMBI-hankkeessa saatuja Nusseltin lukuja kattoristikollisille koerakenteille eri olosuhteissa. (mukaillen Kivioja 2020, s. 7)

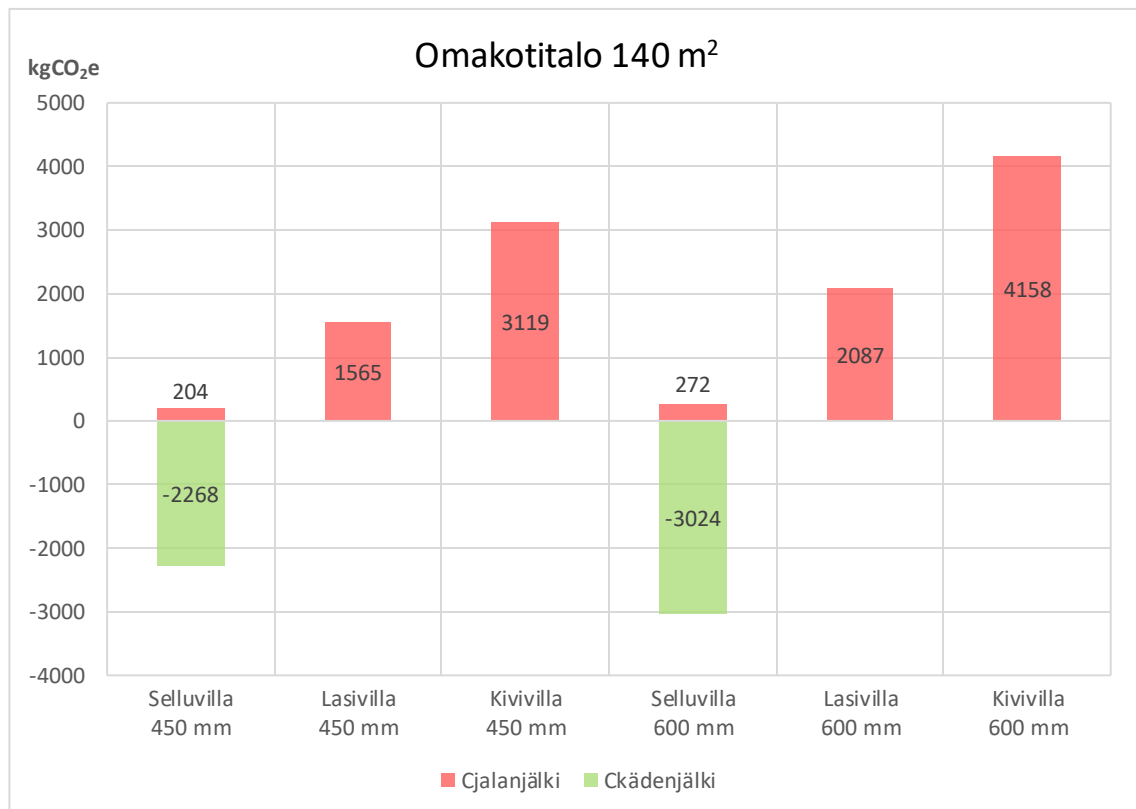
Myös COMBI-hankkeessa modifioidut Rayleighin luvut jäivät alle raja-arvon ollessaan 2,4...9,5 välillä, vaikka sisäistä konvektiota esiintyi 80 % tapauksista. Tapauksissa, joissa sisäistä konvektiota ei esiintynyt, oli Ra_m 2,6...3,4 välillä. Kuten useiden muidenkin tutkimusten tuloksissa todetaan, myös tässä suositellaan Rayleighin luvun raja-arvon laskemista 5,0. Tutkimustulokset osoittautuivat johdonmukaisiksi materiaalien suhteen, joten tuloksia voidaan käyttää samankaltaisten rakenteiden tutkimisessa. Tulokset eivät kuitenkaan yleisesti päde kaikille puhallettaville eristeille, koska mikrorakenne voi vaihdella materiaalista riippuen tiheyden ollessa kuitenkin sama. (Kivioja 2020, s. 6–9)

9 TULOKSET

Saadut tulokset on laskettu 140 m² omakotitalon ja 3000 m² maatalousrakennuksen tyypillisille lämmöneristyksen paksuuksille. Omakotitaloissa käytetään yleisesti 450–600 mm ja maatalousrakennuksissa 300–400 mm eristyspaksuutta. Saatuja EN-standardien ja RIL:n soveltamisohjeen mukaisia tuloksia verrataan COMBI-hankkeen tulosten pohjalta laskettuihin arvoihin.

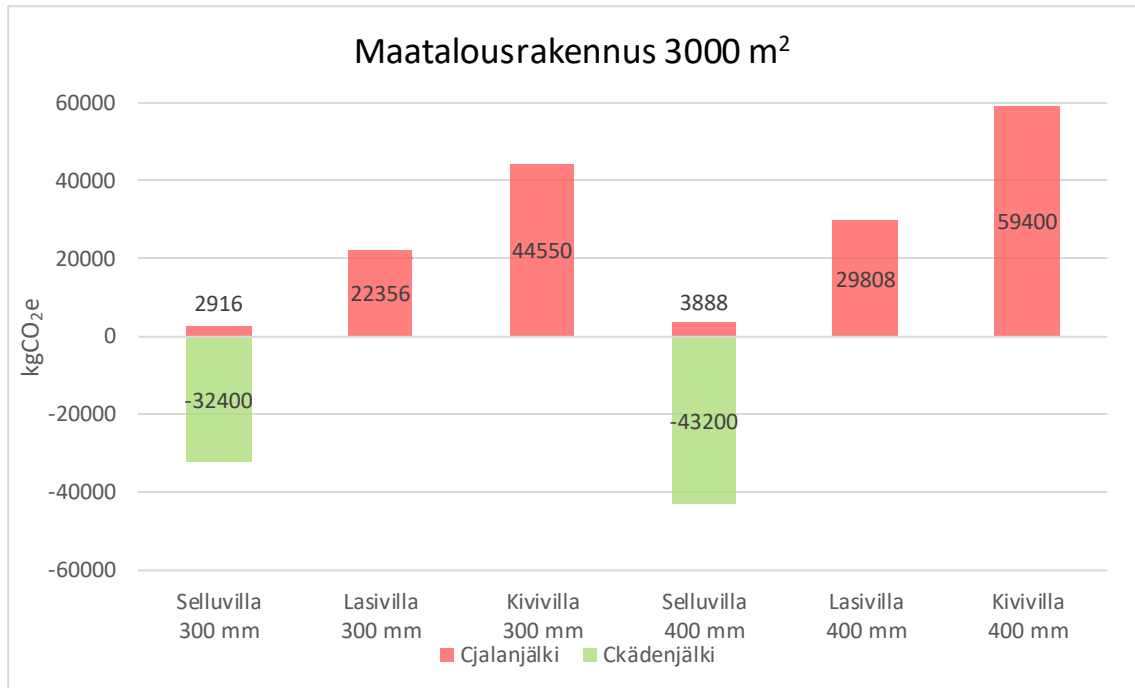
9.1 Vähähiilisuuden arviointi

Vähähiilisuuden arviointi on laskettu vähähiilisen tiekartan mukaisella elinkaarimallilla käyttäen Suomen ympäristökeskuksen ylläpitämällä CO2data.fi -sivustolla annettuja tuotevaiheen A1-A3 arvoja. Laskenta tehtiin vain yläpohjassa olevalle eristeelle. Laskelmissa ei oteta huomioon käyttövaiheen ja elinkaaren loppuvaiheen päästöjä tai yläpohjan rakenteista aiheutuvia päästöjä.



Kuva 13. Omakotitalon yläpohjan eristeen hiilijalan- ja hiilikädenjälki.

Kuvista 13 ja 14 näkyy, että selluvillan hiilijalanjälki on huomattavasti pienempi kuin lasi- tai kivivillalla. Kivivillan hiilijalanjälki on kaikista suurin. Ainoastaan selluvillalla on hiilikädenjälki. Selluvillan hiilikädenjälki on suurempi kuin lasivillan hiilijalanjälki ja lähes yhtä suuri kuin kivivillan hiilijalanjälki.



Kuva 14. Maatalousrakennuksen yläpohjan eristeen hiilijalan- ja hiilikädenjälki.

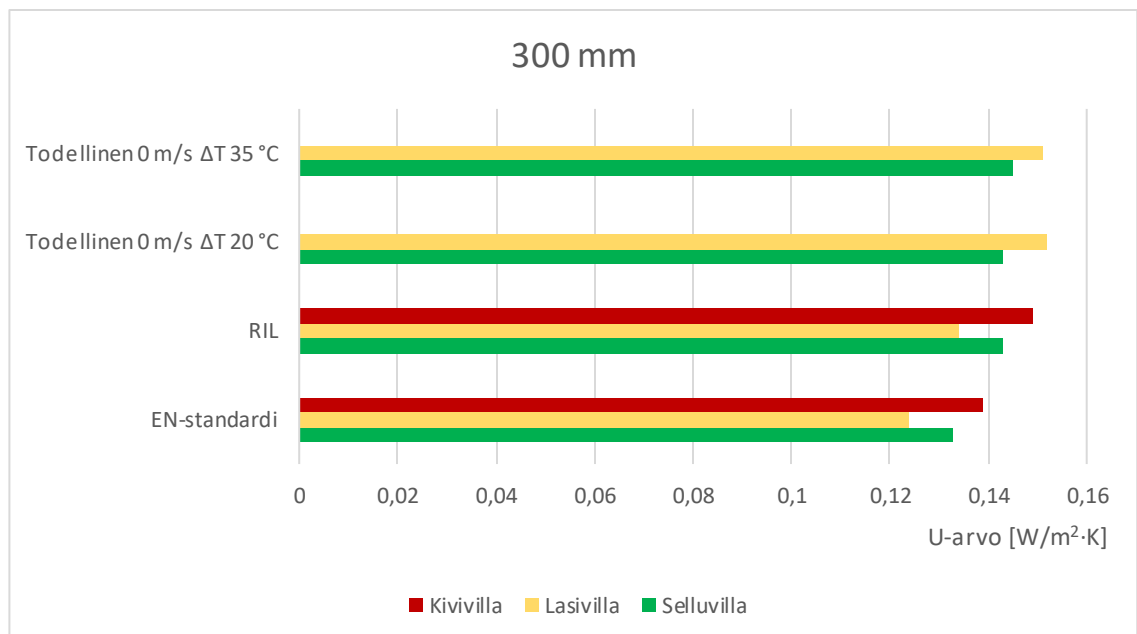
9.2 U-arvot

Lämmönläpäisykertoimet eli U-arvot on laskettu käyttäen taulukon 16 mukaista rakennetta. Rakenteessa on huomioitu kipsilevy, koolaus ja ilmarako, kattotuolin alapaarre ja lämmöneriste. Todellisia olosuhteita kuvaavassa laskennassa on kattotuolin alapaarten ja lämmöneristeen tilalla käytetty COMBI-hankkeen tuloksista laskettuja lämmönvastuksia kyseisille rakenteen osille. Koerakenteessa oli mukana alapaarten lisäksi myös kattoristikon vinosauvat, joita ei huomioitu tässä työssä sillä niiden mittoja ei ollut saatavilla. Standardin ja RIL:n mukaisessa laskennassa käytettiin taulukossa 6 esitettyjä Suomessa yleisimmin käytettyjen puhallettavien lämmöneristeiden valmistajien ilmoittamia arvoja. Lasivillalle käytettiin tiheyden 23 kg/m³ mukaisia arvoja ja kivivillalle BLT9 mukaisia arvoja.

Taulukko 16. Yläpohjan U-arvojen laskennassa huomioidut kerrokset

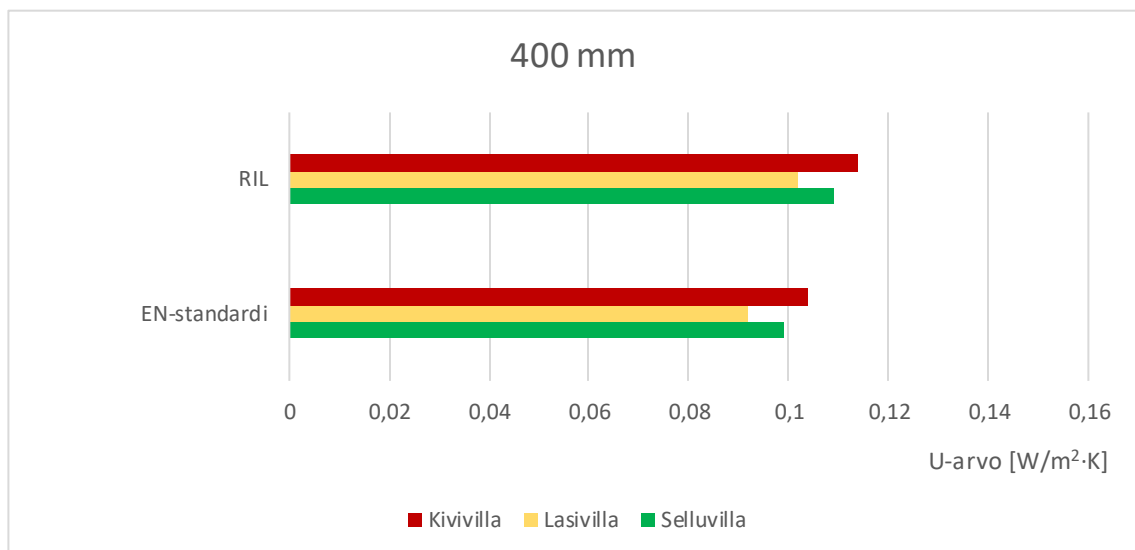
Kerros	Paksuus	Lämmönjohtavuus tai lämmönvastus
Gyproc GN 13	12,5 mm	lämmönvastus 0,06 m ² ·K/W
Koolaus 22x100k300	22 mm	lämmönjohtavuus 0,12 W/m·K
Ilmarako	22 mm	lämmönvastus 0,16 m ² ·K/W
Höyrynsulku	0,2 mm	ei huomioida laskennassa
Kattotuoli 100x50k900	100 mm	lämmönjohtavuus 0,12 W/m·K
Lämmöneriste	300 mm 400 mm 450 mm 600 mm	lämmönjohtavuus valmistajan mukaan

300 mm lämmöneristepaksuudelle laskettiin standardin ja RIL:n mukaisen U-arvon lisäksi sellu- ja lasivillalle koetuloksiin pohjautuvat todelliset arvot ilmavirrattomalle 20 °C ja 35 °C lämpötilaerolle. 20 °C lämpötilaero kuvaa 20 °C sisälämpötilaa ja 0 °C ulkolämpötilaa. 35 °C lämpötilaero kuvaa 20 °C sisälämpötilaa ja -15 °C ulkolämpötilaa.



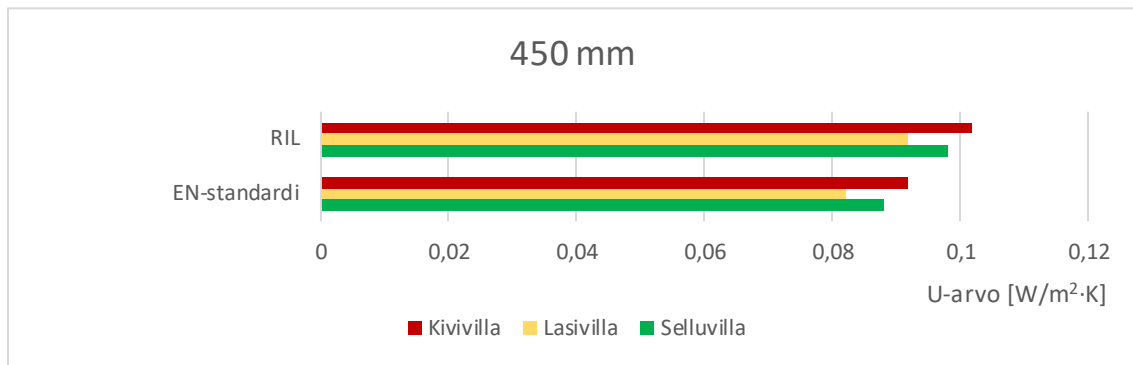
Kuva 15. 300 mm paksuisen eristekerroksen U-arvot.

Kuten kuvasta 15 huomataan, standardin mukainen mitoitus antaa paremman U-arvon kuin todellista tilannetta kuvaavat laskelmat. Standardin mukaan laskettaessa selluvilla saa 9,0 % ja lasivilla 22,6 % paremman U-arvon kuin todellisen tilanteen huonoin arvo. Selluvillalla RIL:n ohjeen mukainen U-arvo on lähellä todellisia tilanteita, kun taas lasivillalla RIL:n mukainen laskenta antaa todellista tilannetta parempia U-arvoja. RIL:n ohjeen mukaan laskettaessa selluvilla saa 1,4 % ja lasivilla 13,4 % paremman U-arvon kuin todellisen tilanteen huonoin arvo. RIL:n ohjeen mukaan laskettaessa saa selluvilla 7,5 %, lasivilla 8,1 % ja kivivilla 7,2 % huonommat arvot kuin standardin mukaan laskettaessa. Lasivillalla lämpötilaeron kasvulla ei ole merkitystä U-arvoon 300 mm eristepaksuudella, mutta selluvillalla on havaittavissa pieni nousu. Myös kivivillalla on RIL:n ohjeen mukaa laskiessa huonompi U-arvo kuin standardien mukaan laskettaessa.



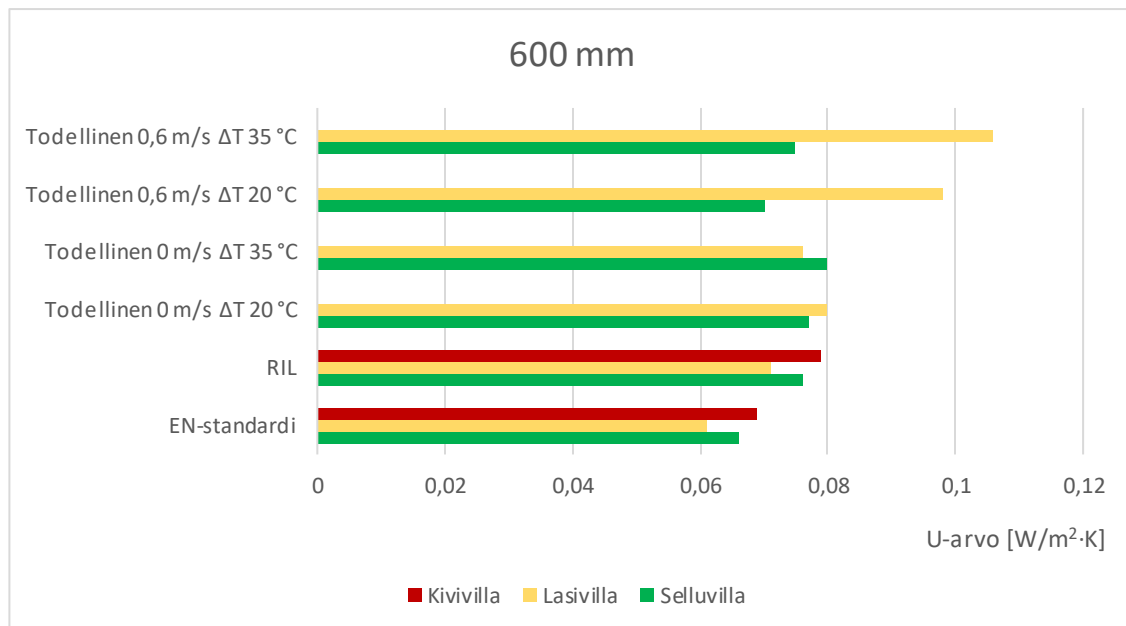
Kuva 16. 400 mm paksuisen eristekerroksen U-arvot.

Kuvassa 16 on esitetty sellu-, lasi- ja kivivillan U-arvot 400 mm eristekerrokselle standardin ja RIL:n ohjeen mukaisesti laskettuna. RIL:n ohjeen mukaan laskettaessa lämmönläpäisykertoimeen vaikuttaa standardissa määriteltyjen asioiden lisäksi myös ilmanläpäisevyydestä riippuva korjaustekijä. Kivivillalla saavutetaan huonoimmat U-arvot. RIL:n ohjeen mukaan laskettaessa saa selluvilla 10,1 %, lasivilla 10,9 % ja kivivilla 9,6 % huonommat arvot kuin standardin mukaan laskettaessa.



Kuva 17. 450 mm paksuisen eristekerroksen U-arvot.

Standardin ja RIL:n ohjeen mukaisesti 450 mm eristepaksuudelle lasketut arvot kaikille eristemateriaaleille nähdään kuvassa 17. RIL:n ohjeen mukaan laskettaessa saa selluvilla 11,4 %, lasivilla 12,2 % ja kivivilla 10,9 % huonommat arvot kuin standardin mukaan laskettaessa.



Kuva 18. 600 mm paksuisen eristekerroksen U-arvot.

Kuvassa 18 esitetyissä tuloksissa otetaan huomioon lämpötilaeron lisäksi sellu- ja lasivillalle tapaukset, joissa eristeen yläpintaan on johdettu 0,6 m/s suuruinen pinnan suuntainen ilmavirta. Standardin mukaiset U-arvot eivät vastaa todellisia tapauksia. RIL:n ohjeen mukaan laskettaessa saa selluvilla 15,2 %, lasivilla 16,4 % ja kivivilla 14,5 % huonommat U-arvot kuin standardin mukaan laskettaessa. RIL:n ohjeen mukaan laskettaessa selluvillan tulokset vastaavat hyvin todellisia tilanteita. Lisätessä ilmavirtaus selluvillan U-arvo pieneni verrattuna ilmavirrattomaan tilanteeseen. Lasivillalla RIL:n ohjeen mukaan laskettaessa saadaan hieman todellista paremmat

tulokset ilmavirrattomassa tilanteessa ja huomattavasti todellista tilannetta paremmat U-arvot ilmavirran vaikuttaessa. Standardin mukaan laskettaessa selluvilla saa 21,2 %, lasivilla ilmavirrattomassa 31,2 % ja lasivilla ilmavirran kanssa 73,8 % paremman U-arvon kuin todellisen tilanteen huonoin arvo. Vastaavasti RIL:n ohjeen mukaan laskettaessa selluvilla saa 5,3 %, lasivilla ilmavirrattomassa 12,7 % ja lasivilla ilmavirran kanssa 49,3 % paremman U-arvon kuin todellisen tilanteen huonoin arvo.

10 JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET

Lämmöneristemateriaalin valinnalla pystytään helposti vaikuttamaan yläpohjan ja koko rakennuksen ympäristövaikutuksiin. Tuloksista nähdään, että selluvillalla on selvästi pienimmän hiilijalanjäljen lisäksi ainoana puhallettavana eristeenä positiivisia ympäristövaikutuksia eli sille voidaan laskea hiilikädenjälki. Tämä johtuu siitä, että selluvilla on orgaaninen materiaali ja se valmistetaan kierrätyspaperista. Lasi- ja kivivillan valmistusprosessi vaatii paljon energiaa, minkä vuoksi niiden hiilijalanjälki on suurempi. Lasivillan valmistuksessa käytetään 50 % kierrätyslasiä, mutta kivivillan valmistuksessa ei voida hyödyntää kierrätysmateriaaleja. Kivivillalla onkin kaikkein huonoimmat ympäristöarvot. Tuloksissa on huomioitu vain valmistuksen aikaiset päästöt, joten erojen voidaan olettaa kasvavan entisestään, kun elinkaareen lisätään loppusijoitus. Selluvilla pystytään kierrättämään tai käyttämään poltettavana energiana. Lasi- ja kivivilla päätyy käytön jälkeen kaatopaikalle. (Siikanen 2009, s. 217–222; Rinne 2018, s. 101)

U-arvon laskeminen on mahdollista suorittaa hyväksyttävästi monella tavalla. EN-standardien mukaiseen laskentaa siirryttäessä vastuu mitoituksessa käytettävistä arvoista siirtyi suunnittelijalle, minkä takia esimerkiksi ilmanläpäisevyyden huomioonottaminen on suunnittelijasta riippuvaista (RIL 225-2004 2005, s. 7). Kuten tuloksista huomataan, on suunnittelussa käytettävien olosuhteiden ja todellisten olosuhteiden oltava yhdenmukaiset, jotta lämmönläpäisykertoimen laskenta antaa luotettavia tuloksia.

Yksinkertaisimmillaan yläpohjan U-arvon laskennan voi rakennuslupaa hakiessa suorittaa ottamatta huomioon kattoristikoita tai muita epäjatkuvuuskohtia. Tässä työssä huomioitiin kipsilevyille tehtävä koolaus ilmarakoineen ja kattoristikon alapaarre. Todellisia tilanteita kuvaavissa laskelmissa käytetyistä COMBI-hankkeen tuloksista johdetuissa arvoissa on mukana myös kattotuolin vinosauvojen osuus, mikä aiheuttaa pientä virhettä.

EN-standardien mukaan luonnollisen konvektion korjausta ei tule suorittaa, mikäli R_{am} ei ylitä kriittistä arvoa, mikä on vapaasti puhalletuille yläpohjille 15 (SFS-EN ISO 10456). Monissa tutkimuksissa on suositeltu alemmaa raja-arvoa, koska sisäisen konvektion on todettu alkavan huomattavasti aiemmin. FRAME- ja COMBI hankkeissa ehdotettiin arvoa 5 (Kivioja 2020, s. 6–9; Pakkanen 2012, s. 55–60). Kuten tuloksista

nähdään, voi todellisissa rakenteissa lämmönläpäisykerroin olla huomattavasti suurempi kuin standardin mukaisessa mitoituksessa eristeen sisäisen konvektion vuoksi. Sisäiseen konvektioon vaikuttava ilmanläpäisevyys tulisikin ottaa huomioon myös EN-standardien mukaan laskettaessa, jotta laskennalliset arvot vastaisivat paremmin todellisia olosuhteita. Kun EN-standardien mukainen laskentatapa tuli Suomessa hyväksytyksi, suuren ilmanläpäisevyyden omaavien lämmöneristeiden laskennallinen tulos parani, vaikka itse tuote pysyi samana. Kuten tulokset osoittavat, tämä ei kuitenkaan vastaa todellisia tilanteita ja vääristyneet lämmönjohtavuuden arvot voivatkin vaikuttaa virheellisesti lämmöneristeen valintaan. Liian konservatiiviset laskennalliset U-arvot voivat aiheuttaa rakennuksen käytön aikaista ylimääräistä energiankulutusta.

Jatkossa U-arvoa laskettaessa olisi suositeltavaa käyttää RIL:n suunnitteluohjeen mukaista mitoitusta. Edes RIL:n ohje ei vastannut kaikilla materiaaleilla täysin todellisia tilanteita. U-arvoja laskettaessa selvisi, että selluvilla, jonka ilmanläpäisevyytenä käytettiin arvoa $125 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}]$, vastasi todellisia tilanteita hyvin RIL:n ohjeen mukaan laskettaessa. Sen sijaan lasivillalla, jonka ilmanläpäisevyytenä käytettiin arvoa $250 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}]$, todellisten tilanteiden tulokset eivät vastanneet laskennallisia tuloksia. RIL:n ohjeen mukaista ilmanläpäisevyyden huomioon ottavaa lisätermiä ΔU_a laskettaessa käytetään korjauskerrointa $\Delta U_a''$, joka ei vaikuta ottavan ilmanläpäisevyyden kasvua huomioon riittävän aggressiivisesti. Laskennassa virhettä saattaa aiheuttaa myös valmistajan ilmoittama ilmanläpäisevyyden arvo, joka on merkittävästi pienempi kuin monissa kirjallisuuden lähteissä.

Selluvillalla ilmanläpäisevyyden ilmoittamista edellytetään EAD-dokumentissa CE-hyväksynnän saamiseksi (EOTA 2018, s. 2–4). Mineraalivilloille on harmonisoitu tuotestandardi, jonka yhdenmukaistetussa osassa ei kuitenkaan vaadita ilmanläpäisevyyden ilmoittamista tuoteselosteessa (SFS-EN 14064-1:2018). Tämä johtaa siihen, että kaikki mineraalivillojen valmistajat eivät ilmoita tuotteidensa ilmanläpäisevyyksiä. Sen seurauksena myös RIL:n ohjeen mukainen mitoitus on haastavampaa, sillä esimerkiksi lasivillalle on kirjallisuudessa ilmoitettu ilmanläpäisevyyden arvoja välille $250 \dots 700 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}]$ (Isover 2022b; RIL 225-2004 2004; RIL 255-1-2014 2015). Mikäli kaikilta lämmöneristeen valmistajilta

vaadittaisiin samanlainen standardeihin perustuva ilmanläpäisevyyden arvon ilmoittaminen, olisi myös lämmöneristeiden vertailu ja suunnittelu tarkempaa.

Kivivillalle ei ollut saatavissa todellisten olosuhteiden vertailutuloksia. Sen mikrorakenne on kuitenkin samankaltainen kuin lasivillalla, mutta ilmanläpäisevyys huomattavasti pienempi ja saman suuntainen kuin selluvillalla. Olisikin mielenkiintoista saada vertailutulokset myös kivivillalle, mistä nähtäisiin, onko sen lämpötekniset ominaisuudet enemmän sellu- vai lasivillan kaltaista. Myös sellu- ja lasivillalle olisi mielekästä saada lisää vertailutuloksia eri eristepaksuuksille ja tiheyksille, jotta ilmanläpäisevyyden lisätermiä pystyttäisiin tarkentamaan. Vertailutuloksissa käytettiin suurimpana lämpötilaerona 35 °C, mikä vastaa -15 °C ulkolämpötilaa. Koska myös lämpötilaeron kasvulla havaittiin olevan merkitystä sisäisen konvektion määrään, olisikin hyvä saada lisää tuloksia suuremmilla lämpötilaeroilla. Lämmitystarpeen ollessa suurimmillaan on myös lämpötilaero suurin. Suomessa talvella jopa -30 °C lämpötilat ovat tyypillisiä, jolloin lämpötilaero kasvaa 50 °C. Olisikin laskennan kannalta mielekästä tietää lämpövirran kasvu myös lämmitystarpeen huippuhetkillä.

11 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli perehtyä puhallettavien eristemateriaalien lämpötekniisiin ominaisuuksiin ja lämmöneristykseen suunnitteluun. Lisäksi arvioitiin eristemateriaalien elinkaarimallin mukaisia ympäristövaikutuksia. Rakennuksen vähähiilisyyden arviointi on tarkoituksena ottaa käyttöön Suomessa vuoteen 2025 mennessä. Eristemateriaalin valinnalla pystytään helposti vaikuttamaan rakennuksen ympäristövaikutuksiin. Tämä korostuu etenkin silloin, jos rakennuksen vähähiilisyydelle annetaan tulevaisuudessa vaatimuksia.

Yläpohjan lämmöneristystä suunniteltaessa ei välttämättä kiinnitetä riittävästi huomiota valittavan eristemateriaalin ominaisuuksiin ja yläpohjassa vallitseviin olosuhteisiin. Lämmöneristys on mahdollista suunnitella hyväksyttävästi monella eri laskentatavalla, ja vastuu valinnoista on siirtynyt yhä enemmän yksittäiselle suunnittelijalle. Erilaisilla hyväksyttävillä laskentatavoilla voidaankin saada hyvin vaihtelevia tuloksia.

Tulosten mukaan RIL:n suunnitteluohjeen mukainen laskentatapa antaa huomattavasti paremmin todellisia olosuhteita vastaavia tuloksia kuin EN-standardien mukainen laskentatapa. RIL:n ohjeessa otetaan lämmöneristeen ilmanläpäisevyys huomioon lisäterminä korjattua lämmönläpäisykerrointa laskettaessa. Lisätermin suuruus riippuu ilmanläpäisevyyden suuruudesta ja ilmaa läpäisevän eristekerroksen lämmönvastuksen suhteesta kokonaislämmönvastukseen. Tulosten mukaan lisätermi on lähellä todellisia olosuhteita vastaavia arvoja selluvillan tapaisilla vähemmän ilmaa läpäisevillä eristemateriaaleilla. Vastaavasti lasivillan kaltaisilla hyvin ilmaa läpäisevillä materiaaleilla lisäkerroin jää riittämättömäksi etenkin, jos lämmöneristeen pintaan pääsee vaikuttamaan ilmavirtaus.

Suunnittelua ohjaavia määräyksiä tulisi yhdenmukaistaa ja Suomen kaltaisissa ilmasto-olosuhteissa ilmanläpäisevyyden huomioiminen tulisi olla pakollista suunnittelussa. Vaikka tällä hetkellä suunnittelu on mahdollista tehdä ilmanläpäisevyyttä huomioimatta, olisi suositeltavaa käyttää vastaisuudessa RIL:n suunnitteluohjetta.

LÄHDELUETTELO

Björkholtz, D., 1997. Lämpö ja kosteus: rakennusfysiikka. 2 painos. Saarijärvi: Rakennustieto Oy, 150 s. ISBN 951-682-432-3

Bionova Oy, 2017. Tiekartta rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen huomioimiseksi rakentamisen ohjauksessa [verkkodokumentti]. Helsinki: Ympäristöministeriö. Saatavissa: https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Tiekartta-rakennuksen-elinkaaren-hiilijalanjaljen-huomioonottamiseksi-rakentamisen-ohjauksessa-4B3172BC_4F20_43AB_AA62_A09DA890AE6D-129197.pdf/1f3642e1-5d58-8265-40c1-337deeab782d/Tiekartta-rakennuksen-elinkaaren-hiilijalanjaljen-huomioonottamiseksi-rakentamisen-ohjauksessa-4B3172BC_4F20_43AB_AA62_A09DA890AE6D-129197.pdf?t=1603260760602 [viitattu 6.9.2022]. 72 s.

BY64, 2021. Tuulettuvat julkisivut 2021. 2. painos. Helsinki: BY-Koulutus Oy, 141 s. ISBN 978-952-7314-11-1

Ekovilla Oy, 2022a. RT 103456 [verkkodokumentti]. Helsinki: Rakennustietosäätiö RTS. Saatavissa: <https://ekovilla.com/wp-content/uploads/2022/06/RT-103456.pdf> [viitattu 28.10.2022]. 4 s.

Ekovilla Oy, 2022b. Suoritustasoilmoitus 001EV2022/06/08 [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://ekovilla.com/wp-content/uploads/2022/06/Ekovilla-suoritustasoilmoitus-DoP-001EV20220608-fi.pdf> [viitattu 5.11.2022]. 2 s.

EOTA, 2018. EAD 040138-01-1201 IN-SITU FORMED LOOSE FILL THERMAL AND/OR ACOUSTIC INSULATION PRODUCTS MADE OF VEGETABLE FIBRES [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://www.eota.eu/download?file=/2017/17-04-0880/for%20ojeu/ead%20040138-01-1201_ojeu2018.pdf [viitattu 6.11.2022]. 17 s.

Gaskell, D.R., 2012. An Introduction to Transport Phenomena In Materials Engineering. 2. painos. New York: Momentum Press, 663 s. ISBN 978-1-60650-355-3

Hagentoft, C., 2001. Introduction to building physics. Lund: Studentlitteratur, 421 s. ISBN 91-44-01896-7

Hall, M.R. & Allison, D., 2010. Heat and mass transport processes in building materials. Teoksessa: Hall, M.R. (toim). Materials for Energy Efficiency and Thermal Comfort in Buildings, Woodhead publishing series in energy, number 44. United Kingdom: Woodhead Publishing Limited, 734 s. ISBN 978-1-84569-526-2

Hautala, M. & Peltonen, H., 2007. Insinöörin (AMK) fysiikka: Osa 1. 8 painos. Saarijärvi: Lahden Teho-Opetus Oy, 332 s. ISBN 978-952-5191-18-9

Häkkinen, T. & Kuittinen, M., 2020. Kohti vähähiilistä rakentamista: Opas arviointiin ja suunnitteluun. Helsinki: Rakennustieto Oy, 192 s. ISBN 978-952-267-344-2

Inkinen, P. & Tuohi, J., 1999. Momentti 1: Insinöörifysiikka. 11 painos. Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Otava, 491 s. ISBN 951-1-16598-4

Isover Oy, 2022a. Rakennekuvat YP1102 [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.isover.fi/dokumentit/rakennekuvat-pdf/yp1102-1.pdf> [viitattu 28.10.2022]. 5 s.

Isover Oy, 2022b. Suoritustasoilmoitus 0809-CPR-22001200-B202-2022/06/02 [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.isover.fi/dokumentit/dop/dop-0809-cpr-22001200-b202-2022-06-02-fi-sv-en.pdf> [viitattu 5.11.2022]. 4 s.

Isover Oy, 2022c. Suoritustasoilmoitus 0809-CPR-22001200-B204-2022/06/02 [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.isover.fi/dokumentit/dop/dop-0809-cpr-22001200-b204-2022-06-02-fi-sv-en.pdf> [viitattu 5.11.2022]. 4 s.

Junttila, H., 2014. Pientalojen puurakenteisten tuulettuvien yläpohjien lämpö- ja kosteustekninen toiminta. Diplomityö. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/23161/junttila.pdf?sequence=3&isAllowed=y> [viitattu 17.11.2022]. 129 s.

Kibert, C. J., 2016. Sustainable construction: green building design and delivery. 2 painos. New Jersey: John Wiley & Sons, 407 s. ISBN 978-0-470-11421-6

Kivioja, H. & Vinha, J. (2020). Hot-box measurements to investigate the internal convection of highly insulated loose-fill insulation roof structures. Teoksessa: Energy and buildings, volume 216, artikkeli 109934. Amsterdam: Elsevier B.V., S. ISSN 0378-7788.

Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109934> [viitattu 25.11.2022]

Lahtela, T., 2004. Ääneneristys puutalossa [verkkodokumentti]. Helsinki: Wood Focus Oy. Saatavissa: <https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/07/%C3%84%C3%A4neneristys-puutalossa-web.pdf> [viitattu 26.10.2022]. 114 s.

Lahtela, T., Kylliäinen, M., Lietzén, J., Kovalainen, V. & Talus, L., 2021. Ääneneristys puutalossa [verkkodokumentti]. Helsinki: Puuinfo Oy. Saatavissa: https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2021/05/Aanikirja_kokonainen-1.pdf [viitattu 28.10.2022]. 166 s.

Mankel, E., 2018. Thermal Energy. Teoksessa: Knaack, U. & Koenders, E. (toim.). Building Physics of the Envelope: Principles of Construction. Basel: Birkhäuser, S. 13-26. ISBN 978-3-0356-1145-8

Oikeusministeriö, 2022. Lausuntopyyntö: ehdotus ympäristöministeriön asetukseksi rakennuksen ilmast selvityksestä [verkkodokumentti]. Helsinki: Oikeusministeriö. Saatavissa:

<https://www.lausuntopalvelu.fi/FI/Proposal/Participation?proposalId=0b297461-cdee-4657-9a4e-d2791315257d> [viitattu 6.9.2022]

Ojanen, T., Pinto-Seppä, I., Koukkari, H. & Nykänen, E., 2014. Kehityspolut tulevaisuuden rakennusvaihtojen lämmöneristysratkaisuille. Espoo: VTT, 120 s. ISBN 978-951-38-8254-9

Ojanen, T., 2016. Dynaaminen puukuiturakenne [verkkodokumentti]. Espoo: VTT. Saatavissa: https://termex.fi/wp-content/uploads/2018/05/Dynaaminen_Puukuitueristerakenne_asiakasraportti-1.pdf [viitattu 10.11.2022]. 51 s.

Pakkanen, T., 2012. Sisäisen konvektion vaikutus yläpohjan lämmöneristävyyteen.

Diplomityö. Saatavissa:

<https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/21364/Pakkanen.pdf?sequence=3&isAllowed=y> [viitattu 20.11.2022]. 203 s.

Parker, D.S., Fairey, P.W. & Gu, L., 1991. A Stratified Air Model for Simulation of Attic Thermal Performance. Teoksessa: Graves, R. & Wysocki, D. (toim.) *Insulation Materials: Testing and Applications, 2nd Volume*. Philadelphia: ASTM, S. 44–72. ISBN 0-8031-1320-6

Paroc Oy, 2022a. Yläpohjat, Harjakatot, Kantava puuristikko,

Puhallusvillaeristysratkaisu [verkkodokumentti]. Saatavissa:

<https://structureselector.paroc.com/?bt=U2FsdGVkX192IATbd3t1%2FVs35hpVzKyZCPcR9mgz8f4%3D&ct=U2FsdGVkX1%2BbAWMVvVw1t11IGddikyCRoPFz1Yp6quU%3D&p=U2FsdGVkX185ja%2BJq9DI17VY4ek7qA%2BqaLeY%2F4lzoSU%3D&s=U2FsdGVkX1%2B%2Fvu4MYRmFzutZuWxsmRl8ojOW3OmYOQ8%3D&seg=U2FsdGVkX18abao9AL7rL4wY8F5ExOa%2BHCnV7skyJQI7dUj76euJ2Ms5yMxEJ69y&sol=19030260&t=U2FsdGVkX1%2BzpjKyCpQb3M8WDqyMyAUllmER5CvVcrIvGLfbdQnukZSJh%2FXPsmPn#preview> [viitattu 28.10.2022]. 1 s.

Paroc Oy, 2022b. Tuotetiedot Paroc BLT6 [verkkodokumentti]. Saatavissa:

<https://www.paroc.fi/-/media/uploaded-product-docs/2022/09/30/22/28/paroc-blt-6-fi-fi.ashx?dmc=1&ts=20221114t0706332035> [viitattu 5.11.2022]. 2 s.

Paroc Oy, 2022c. Tuotetiedot Paroc BLT9 [verkkodokumentti]. Saatavissa:

<https://www.paroc.fi/-/media/uploaded-product-docs/2022/02/18/20/24/paroc-blt-9-fi-fi.ashx?dmc=1&ts=20221114t0650197741> [viitattu 5.11.2022]. 2 s.

Peuhkuri, R., Rode, C. & Hansen, K., 2004. Moisture buffer capacity of different insulation materials [verkkodokumentti]. Saatavissa:

https://web.ornl.gov/sci/buildings/conf-archive/2004%20B9%20papers/115_Peuhkuri.pdf [viitattu 10.11.2022]. 14 s.

Peuhkuri, r., 2007. Kosteuden jakautuminen ulkovaipan eristemateriaaleissa. Teoksessa: Vinha, j. & Korpi, M (toim). *Rakennusfysiikka 2007: uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut, 18.-19.2007*, Tampere. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos, 368 s. ISBN 978-952-15-1847-8

Puuinfo, 2021. Paloturvallinen puutalo [verkkodokumentti]. Helsinki: Puuinfo Oy.
Saatavissa: https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2021/05/Palokirja_nettil_kokonainen.pdf [viitattu 30.10.2022]. 104 s.

Pyly, P., 2014. Uudet energiatehokkuusmääräykset korjausrakentamisessa – Opas taloyhtiöille. Helsinki: Kiinteistöalan Kustannus, 112 s. ISBN 978-951-685-352-2

RIL 225-2004, 2005. Rakennusosien lämmönläpäisykertoimien laskenta: Ohje standardien SFS-EN ISO 10456 ja SFS-EN ISO 6946 soveltamiseen. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto, 115 s. ISBN 951-758-448-2

RIL 249-2015, 2015. Energiatehokas asuinrakennus: Kohti lähes nollaenergiarakentamista. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, 250 s. ISBN 978-951-758-602-3

RIL 255-1-2014, 2014. Rakennusfysiikka 1: Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto, 500 s. ISBN 978-951-758-589-7

Rinne, H., 2018. Perinnemestarin materiaalioppi: Mistä on vanhat talot tehty. Helsinki: Werner Söderström Osakeyhtiö, 208 s. ISBN 978-951-0-43073-6

Romppainen, I., 2010. Lämmin puutalo: Ohjeet ilmanpitävään ja energiaa säästävään rakentamiseen. Helsinki: Rakennustieto, 68 s. ISBN 978-951-682-953-4

Saint-Gobain Finland Oy, 2022. U-arvojen laskenta, luonnollisen konvektion laskenta, materiaalitietoja [verkkolaskuri]. Saatavissa: <https://www.laskentapalvelut.fi> [viitattu 5.11.2022].

SFS-EN ISO 6946:2017, 2017. Building components and building elements. Thermal resistance and thermal transmittance. Calculation methods (ISO 6946:2017, Corrected version 2021-12). Suomen standardoimisliitto SFS: 23 + 24 s.

SFS-EN ISO 10456 + AC, 2008. Rakennusaineet ja -tuotteet. Lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet. Taulukoidut suunnitteluarvot ja menetelmät ilmoitetun lämpöteknisen

arvon ja lämpöteknisen suunnitteluarvon määrittämiseksi. Suomen standardoimisliitto SFS: 20 + 10 s.

SFS-EN 14064-1:2018, 2018. Thermal insulation products for buildings. In-situ formed loose-fill mineral wool (MW) products. Part 1: Specification for the loose-fill products before installation. 19 + 38 s.

SFS-EN 14064-2, 2010. Lämmöneristystuotteet rakentamiseen. Mineraalivillasta (MW) paikalla tehtävät puhallusvillaeristetuotteet. Osa 2: Asennettujen tuotteiden tuotestandardi. 8 + 11 s.

Siikanen, U. 2009. Rakennusaineoppi. 7 painos. Helsingissä: Rakennustieto Oy, 328 s. ISBN 978-951-682-942-8

Siikanen, U. 2014. Rakennusfysiikka – Perusteet ja sovelluksia. Tampere: Rakennustieto Oy, 256 s. ISBN 978-952-267-001-4,

SYKE, 2022. Rakentamisen päästötietokanta CO2data.fi [internetsivu]. Suomen ympäristökeskus. Saatavissa: https://www.hiilineutraalisuomi.fi/fi-FI/Tyokalut/Rakentamisen_paastotietokanta [viitattu 1.11.2022]

Tariku, F. & Iffa, E., 2020. Temperature, Airflow and Moisture Patterns in Attic Roofs [verkkodokumentti]. Burnaby: British Columbia Institute of Technology (BCIT). Saatavissa: <https://www.bchousing.org/publications/Temperature-Airflow-and-Moisture-Patterns-in-Attic-Roofs.pdf> [viitattu 15.11.2022]

Viitanen, H., Peuhkuri, R., Tanskanen, K. & Pjanen, T., 2008. Lausunto rakenteiden energiatehokkuuden parantamisen vaikutuksista rakenteiden kosteustekniseen toimivuuteen [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://ym.fi/documents/1410903/38439968/VTT-S-10816-08_YM_Selostus_MatEnKosteus_Final-648A4BF3_D2F6_4FEB_9DD4_8B90C1A49D2D-31293.pdf/ce13871b-a40a-b02d-52e3-aea672542bad/VTT-S-10816-08_YM_Selostus_MatEnKosteus_Final-648A4BF3_D2F6_4FEB_9DD4_8B90C1A49D2D-31293.pdf?t=1603260221562 [viitattu 18.11.2022]. 22 s.

Vinha, J., Valovirta, I., Korpi, M., Mikkilä, A. & Käkelä, P., 2005.

Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan osasto, talonrakennustekniikan laboratorio, Tutkimusraportti, vol. 129, 312 s. ISBN 978-952-15-2745-6

Ympäristöministeriö, 2021a. Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä 2021 (luonnos) [verkkodokumentti]. Helsinki: Ympäristöministeriö. Saatavissa:

<https://www.lausuntopalvelu.fi/FI/Proposal/DownloadProposalAttachment?attachmentId=15860> [viitattu 15.11.2022]

Ympäristöministeriö, 2021b. Rakennuksen ilmastaselvityksen perustelumuuisto (luonnos) [verkkodokumentti]. Helsinki: Ympäristöministeriö. Saatavissa:

<https://www.lausuntopalvelu.fi/FI/Proposal/DownloadProposalAttachment?attachmentId=15856> [viitattu 15.11.2022]

Ympäristöministeriö, 2022. Vähähiilisen rakentamisen tiekartta [verkkodokumentti]. Helsinki: Ympäristöministeriö. Saatavissa: <https://ym.fi/vahahiilisen-rakentamisen-tiekartta> [viitattu 6.9.2022]