

Juuso Parkkinen

**TIILI-VILLA-TIILI-  
ULKOSEINÄRAKENTTEEN  
RAKENNUSFYSIKAALINEN TOIMINTA**

Rakennetun ympäristön tiedekunta

Diplomityö

Toukokuu 2020

# TIIVISTELMÄ

Parkkinen, Juuso: Tiili-villa-tiili-ulkoseinärakenteen rakennusfysikaalinen toiminta  
Diplomityö  
Tampereen yliopisto  
Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma  
Toukokuu 2020

---

Rakennusten sisäilmaongelmat ovat saaneet viime vuosina paljon medianäkyvyyttä. Ongelmat ovat usein monien eri tekijöiden summa. Sisäilmaongelmien syntyyn myötävaikuttavat kuitenkin voimakkaasti rakenteiden kosteus- ja mikrobivauriot. Mikrobivauriot voivat vaikuttaa sisäilman laatuun heikentävästi siinä vaiheessa, kun vaurioituneen materiaalin ja sisäilman välillä on ilmayhteys, jota pitkin mikrobien aineenvaihduntatuotteet pääsevät siirtymään sisäilmaan rakennuksen ollessa alipaineinen ulkoilmaan nähden.

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin pääosin tiili-villa-tiili ulkoseinärakenteen kosteusteknistä toimintaa ideaalitulanteessa, jolloin rakenteen läpi ei oleteta tapahtuvan ilmavuotoja. Kyseisen ulkoseinärakenteen homehtumisherkkyden kannalta kriittiseksi kohdaksi määriteltiin kirjallisuuskatsauksen ja laskentatarkastelujen perusteella ikkunoiden alapuolinen seinärakenne, joka yhtenäisestä ulkoseinärakenteesta poiketen sisältää orgaanista puumateriaalia ikkunan alapuolisen puurungon muodossa. Ikkunan alapuolisen ulkoseinärakenteen osalta selvitettiin rakenteen kosteusteknistä toimintaa rakenteen ominaisuuksien muuttuessa. Muuttujina käytettiin kirjallisuuskatsauksen ja kuntotutkimuksien pohjalta havaittuja rakenneratkaisuja. Laskentatarkasteluissa varioidiin tuuletusraon tukkeutumisastetta, tuuletusraon paksuutta, tiiliverhouksen ominaisuuksia, viistosateen tunkeutumista tiiliverhouksen läpi sekä mahdollisen tuulensuojavillan paksuutta.

Ulkoseinärakenteen ominaisuuksien muuttumisen vaikutuksia rakenteen kosteustekniseen toimintaan arvioitiin Tampereen teknillisessä yliopistossa kehitetyllä rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmällä. Menetelmässä tarkastellaan rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa rakennusfysikaalisten testivuosien olosuhteissa. Toimintakriteerinä rakenteen ominaisuuksien muuttuessa käytettiin Suomalaisen homemallin määrittelemää homeindeksiä.

Tutkimuksessa tarkasteltiin myös ulkoseinärakenteen sisäkuoren ja ikkunakarmien läpi tapahtuvia ilmavuotoja erilaisilla rakennusvaipan yli vaikuttavilla paine-eroilla. Ilmavuotojen jakaantumista sisäkuoren läpi ja ikkunakarmien kautta tapahtuviin vuotoihin tarkasteltiin tilanteissa, joissa sisäkuoren ilmanläpäisevyys ja ikkunakarmeissa olevien rakojen mittasuhteet muuttuvat. Potentiaalia sisäilmaongelmien esiintymiselle arvioitiin laskennallisesti huomioiden tiili-villa-tiili –ulkoseinärakenteen kosteustekninen toiminta ja ilmavuotoreittien kautta siirtyvän ilman suuruusluokka. Epäpuhtauksien kulkeutumisen arviointi perustuu kirjallisuuskatsaukseen, jossa on mallinnettu erikokoisten partikkeleiden tunkeutumista rakojen läpi muuttuvissa painesuhteissa.

Tuloksien perusteella voidaan todeta vanhojen tiili-villa-tiili-ulkoseinärakenteiden kosteusteknisen toiminnan olevan heikkoa ja homekasvuston mahdollista tuuletusrakoon rajautuvissa ikkunan alapuolisissa puurungoissa. 2000-luvun alkupuolella rakenteessa yleistynyt tuulensuojavilla parantaa rakenteen kosteusteknisestä toimintaa merkittävästi. Kosteusteknistä toimintaa parantaa merkittävästi myös tuuletusraon ilmanvaihtuvuuden paraneminen ja tuuletusraon kasvattaminen 20 mm:stä 40 mm:iin. Tulevaisuuden ilmastossa tiili-villa-tiili-ulkoseinärakenne säilyy kosteusteknisesti toimivana, kun rakenteessa käytetään vähintään 50 mm paksua tuulensuojavillaa ja tuuletusraon ilmanvaihtuvuuteen ja erityisesti seinän alaosan tuuletusaukkojen avoimuuteen ja riittävyteen kiinnitetään huomiota.

Avainsanat: Tiili-villa-tiili –ulkoseinä, tiiliverhous, sisäkuori, tuuletusraon ilmanvaihtuvuus, rakennusvaippa, ilmavuoto, Suomalainen homemalli

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ABSTRACT

Parkkinen, Juuso: Hygrothermal Performance of an Insulated Brick Cavity Wall  
Master of Science Thesis  
Tampere University  
Master's Degree Programme in Civil Engineering  
April 2020

---

Building indoor air problems have caused a lot of discussion in different media over the last few years. Problems are often a combination of many different kind of factors. Indoor air problems are usually contributed by building dampness and mould damages. Mould damages can deteriorate the quality of indoor air when there is an air leakage between the damaged material and indoor air. In this kind of situation metabolites of the micro-organisms are able to transfer into the indoor air when the air pressure of the building is low compared to outdoors.

This thesis studies mainly hygrothermal performance of an insulated brick cavity wall in an ideal situation where there is no air leakage through the building envelope. Based on literature reviews and hygrothermal calculations the highest risk for mould growth in brick cavity wall is in the wall structures under the windows. These structures contain organic wooden material in the form of window frames. Thesis studies how different kind of variables effect the hygrothermal performance of this wall structure. Variables used in these hygrothermal calculations were the air change rate behind the brick veneer, cavity width, qualities of the brick veneer, the effect of wind driven rain penetration through the brick veneer and the possible wind barrier wool. Used variables were based on literature reviews and condition surveys.

The evaluation of the hygrothermal performance is based on a method that was invented in the Tampere University of Technology. In this method hygrothermal performance is observed in the condition of the building physical test years. Mould index of the Finnish mould growth model was used as a performance criterion when the qualities of the structure were changed.

This thesis also demonstrates two different kind of air leakages that occur through the brick cavity wall. Air leakages occur in the window frames and through the interior brick layer. Factors such as air pressure difference over the building envelope, dimensions of cracks and gaps in window frames and interior brick layer air tightness affect highly on the air flow through the exterior wall. Potential for indoor air problems is evaluated on calculations that are based on hygrothermal performance of the brick cavity wall and air leakages through the exterior wall. The evaluation of the particles that move along with air is based on models found from literature.

According to this study old brick cavity walls have a poor hygrothermal performance and mould growth is possible in the wooden window frames that are bounded to cavities. The most important element improving the hygrothermal performance of the brick cavity wall was the improvement of the cavity air change rate and the fact that the cavity width was increased from 20mm to 40mm. Wind barrier wool that became more common in the beginning of the 21'st century improved the hygrothermal performance of this structure significantly as well. In the future climate brick cavity wall can preserve its functional hygrothermal performance when the structure contains a minimum of 50mm wind barrier wool. It's also important to pay attention to the air change rate of the cavity and that the number of the ventilation holes in the bottom parts of the wall is adequate.

Keywords: Insulated cavity wall, brick veneer, inside leaf, cavity ventilation, building envelope, air leakage, Finnish mould growth model

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

# ALKUSANAT

Kiitos professori Juha Vinhalle työn ohjaamisesta ja tarkistamisesta. Kiitos Petteri Hutuselle laskentatarkasteluiden ohjaamisesta ja kommentoimisesta sekä laskentaohjelmiin perehdyttämisestä ja opastuksesta.

Kiitos työnantajalleni FCG Suunnittelu ja tekniikka Oy:lle työn mahdollistamisesta. Kiitos Juhani Piriselle alkuperäisen tutkimusaiheen ideoinnista ja suunnittelusta. Kiitos myös työkavereilleni heidän osoittamastaan mielenkiinnosta työtäni kohtaan.

Suurimmat kiitokset haluan osoittaa perheelleni ja lähipiirilleni, jotka ovat jaksaneet kannustaa ja tsemjata minua aina. Erityismaininnan ansaitsevat avopuolisoni Laura ja veljeni Teemu, joiden vertaistuki ja omat kokemukset ovat olleet kullannarvoisia tämän opettavaisen, mutta toisinaan myös hieman raskassoutuisen projektin aikana.

Kuopiossa, 24.5.2020

Juuso Parkkinen

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
1.1 Tutkimuksen tausta .....	1
1.2 Tutkimuksen sisältö ja tavoitteet .....	3
1.3 Tutkimusmenetelmät .....	3
1.4 Tutkimuksen rajaukset .....	5
2. ILMAN, LÄMMÖN JA KOSTEUDEN SIIRTYMINEN .....	6
2.1 Ilma ja ilmavirtaukset .....	6
2.2 Lämmön siirtyminen .....	10
2.2.1 Johtuminen .....	11
2.2.2 Lämmön konvektio .....	12
2.2.3 Lämpösäteily .....	14
2.3 Rakenteiden ja rakennekerrosten lämmöneristävyys .....	17
2.4 Kosteuslähteet ja rasitukset .....	18
2.5 Kosteus materiaalissa ja hygroskooppisuus .....	20
2.6 Kosteuden siirtyminen .....	23
2.6.1 Vesihöyryn konvektio .....	23
2.6.2 Vesihöyryn diffuusio .....	25
2.6.3 Kapillaarinen siirtyminen .....	28
3. ULKOSEINÄRAKENTEEN MATERIAALIOMINAISUUDET JA YMPÄRÖIVÄT OLOSUHTEET .....	33
3.1 Materiaaliominaisuudet .....	33
3.2 Ulkoilman olosuhteet .....	34
3.3 Sisäilman olosuhteet .....	35
3.4 Paine-erot sisä- ja ulkoilman välillä .....	37
3.5 Rakennusvaipan ilmanpitävyys .....	40
3.6 Home ja muut mikrobit .....	43
3.6.1 Mikrobivauriot rakenteissa .....	43
3.6.2 Mikrobin vaikutus sisäilmaan .....	44
3.6.3 Homehtumisriskin laskennallinen arviointi .....	45
4. TIILI-VILLA-TIILI-ULKOSEINÄRAKENNE .....	49
4.1 Rakenteessa havaitut vauriot .....	50
4.2 Rakenteen lämpö- ja kosteustekninen toiminta .....	55
4.2.1 Ilman ja epäpuhtauksien siirtyminen seinärakenteen läpi .....	56
4.2.2 Tuuletusraon ilmanvaihtuvuus .....	59
4.2.3 Tiiliverhouksen altistuminen viistosateelle .....	68
5. LASKENTATARKASTELUT .....	71

5.1	Rakenteiden kosteustekninen analysointi ja arviointi .....	71
5.2	Tarkasteluperiaatteet ja toimintakriteerit .....	72
5.3	Tiili-villa-tiili-ulkoseinärakenteen tarkastelut ja materiaalit.....	72
5.4	Tiili-villa-tiili-ulkoseinärakenteen laskentamalli .....	75
5.5	Ilmavuotojen laskentamalli .....	77
6.	LASKENNAN TULOKSET .....	80
6.1	Tiili-villa-tiili-ulkoseinärakenne.....	80
6.1.1	Ulkoseinärakenteen kriittinen tarkastelupiste.....	81
6.1.2	Tuuletusraon paksuuden ja ilmanvaihtuvuuden merkitys .....	85
6.1.3	Viistosateen tunkeutuminen tiiliverhouksen läpi .....	87
6.1.4	Tuulensuojavillan merkitys.....	89
6.1.5	Tiiliverhouksen merkitys.....	91
6.2	Ilmavuototarkastelut .....	92
6.3	Tulosten vertailu laskentaohjelmien välillä .....	95
7.	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	97
7.1	Tiili-villa-tiili-ulkoseinärakenne.....	97
7.2	Ilmavuototarkastelut .....	99
7.3	Laskentatarkasteluiden luotettavuus ja vertailtavuus .....	100
8.	YHTEENVETO .....	103
	LÄHTEET.....	106

LIITE 1: ULKOILMAN OLOSUHTEET

LIITE 2: PARAMETRIT JA MATERIAALIOMINAISUUDET

# MERKINNÄT JA LYHENTEET

$\alpha$	lämpösäteilyn absorptiokerroin	-
$\beta$	ilman lämpölaajenemiskerroin	1/K
$\beta_v$	pinnan kosteudensiirtokerroin	m/s
$\gamma_a$	ilman kinemaattinen viskositeetti	m <sup>2</sup> /s
$\gamma_c$	tukkeumakerroin	-
$\delta_v$	vesihöyrynläpäisevyys	m <sup>2</sup> /s
$\delta_p$	vesihöyrynläpäisevyys	kg/m·s·Pa)
$\varepsilon$	emissiviteetti	-
$\eta_a$	ilman dynaaminen viskositeetti (T = 10 °C)	≈ 17,5·10 <sup>-6</sup> s·Pa
$\theta$	kontaktikulma	°
$\lambda$	lämmönjohtavuus	W/(m·K)
$\mu$	diffuusiovastuskerroin	-
$\nu$	vesihöyrypitoisuus	kg/m <sup>3</sup>
$\rho$	säteilyn heijastuskerroin	-
$\rho$	tiheys	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_a$	ilman tiheys (T = 20 °C)	≈ 1,2 kg/m <sup>3</sup>
$\rho_w$	veden tiheys (T = 0 °C)	≈ 1000 kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	pintajännitys	N/m
$\sigma$	Stefan-Boltzmannin vakio	5,67·10 <sup>-8</sup> W/(m <sup>2</sup> ·K <sup>4</sup> )
$\tau$	säteilyn läpäisykerroin	-
$\varphi$	suhteellinen kosteus	-
$\Phi$	lämpövirta	W, J/s
$a$	terminen diffusiviteetti	m <sup>2</sup> /s
$c$	ominaislämpökapasiteetti	J/(kg·K)
$d$	paksuus	m
$g$	kosteusvirran tiheys	kg/(m <sup>2</sup> ·s)
$g$	putoamiskiiktyvyys	9,81 m/s <sup>2</sup>
$h$	korkeus	m
$h_c$	konvektiivinen lämmönsiirtokerroin	W/(m <sup>2</sup> ·K)
$h_r$	säteilyn lämmönsiirtokerroin	W/(m <sup>2</sup> ·K)
$h_v$	veden höyrystymislämpö (T = 0 °C)	2500·10 <sup>-3</sup> J/kg
$k$	permeabiliteetti kaasuille ja nesteille	m <sup>2</sup>
$k_a$	ilmanläpäisevyys	m <sup>3</sup> /(m·s·Pa)
$k_f$	korjauskerroin	-
$k_w$	kosteudenjohtavuus	kg/(m·s·Pa)
$m$	massa	kg
$n$	ilmanvaihtuvuus	1/h
$n_{50}$	ilmanvuotoluku (paine-ero 50 Pa)	1/h
$p$	paine	Pa
$p_{atm}$	ilmakehän normaali ilmanpaine	101325 Pa
$q$	lämpövirran tiheys	W/m <sup>2</sup>
$q_{50}$	ilmanvuotoluku (paine-ero 50 Pa)	m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·h)
$r$	säde	m
$r_a$	ilmavirran tiheys	m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·s)
$s$	huokosalipaine	Pa
$s_d$	suhteellinen diffusiovastus	m
$t$	aika	s, h
$u$	kosteuspitoisuus (paino-osina)	kg/kg
$w$	kosteuspitoisuus	kg/m <sup>3</sup>
$x_p$	veden tunkeutumissyvyys	m
$z$	korkeus maanpinnasta	m

$A$	pinta-ala	$m^2$
$A_w$	veden imeytymiskerroin (kapillariteettikerroin)	$kg/(m^2 \cdot s^{1/2})$
$B_w$	veden tunkeutumiskerroin	$m/s^{1/2}$
$C_p$	tuulenpainekerroin	-
$D_a$	ilman vesihöyrynläpäisevyys	$m^2/s$
$D_{w,s}$	kapillaarinen kosteusdiffusiviteetti	$m^2/s$
$E$	pinnan emittoima säteilyteho	$W/m^2$
$E_b$	ideaalimustan pinnan emittoima säteilyteho	$W/m^2$
$F$	pintojen välinen näkyvyyskerroin	-
$F_D$	viistosateen jakaumakerroin	-
$F_E$	ulkoseinän viistosateelle altistumiskerroin	-
$F_L$	empiirinen vakio	$0,2 \text{ kg} \cdot \text{s}/\text{m}^3 \cdot \text{mm}$
$I$	säteilyn intensiteetti	$W/m^2$
$K_a$	ilmanläpäisykerroin	$m^3/(m^2 \cdot s \cdot \text{Pa})$
$L$	pituus, halkaisija	$m$
$M$	homeindeksi	-
$M_a$	ilman moolimassa	$28,96 \text{ kg/mol}$
$M_w$	veden moolimassa	$18,02 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$
$Nu$	Nusseltin luku	-
$Q$	lämpöenergia, energia	$J, Nm, Ws, kWh$
$R$	lämmönvastus	$m^2 \cdot K/W$
$R$	yleinen kaasuvakio	$8,314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot K)$
$R_a$	ilman tilavuusvirta	$m^3/s$
$Ra_m$	muunnettu Rayleigh'n luku	-
$Re$	Reynoldsin luku	-
$T$	lämpötila	$^{\circ}C, K$
$U$	lämmönläpäisykerroin	$W/(m^2 \cdot K)$
$U_c$	korjattu lämmönläpäisykerroin	$W/(m^2 \cdot K)$
$U_z$	tuulen nopeus	$m/s$
$V$	tilavuus	$m^3$
$WDR$	viistosademäärä (wind driven rain)	$mm$
$Z_v$	vesihöyrynvastus	$s/m$
$Z_p$	vesihöyrynvastus	$m^2 \cdot s \cdot Pa/kg$

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
FEM	elementtimenetelmä (finite element method)
FRAME	Future Envelope Assemblies and HVAC Solutions
HHL	homehtumisherkkyyssluokka
HTL	homekasvun taantumislukku
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto
VTT	Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy



# MÄÄRITELMÄT

Homeindeksi	Homeindeksi (M) kuvaa tarkasteltavan materiaalin pinnalla tapahtuvaa silmin tai mikroskopoimalla havaittavaa homekasvuston määrää. Indeksillä voi saada arvoja väliltä 0-6. Indeksillä ei oteta kantaa materiaalissa esiintyviin homelajeihin.
Höyrynsulku	Rakennusvaipassa oleva erillinen ainekerros, jonka vesihöyryn vastus on riittävän suuri estääkseen sisäilman vesihöyryn haitallisen diffuusiovirtauksen rakenteisiin. Kerroksellisissa vaipparakenteissa tarvitaan aina rakenteen lämpimällä puolella riittävän vesihöyrytiivis höyrynsulku. Höyrynsulku toimii usein samalla myös ilmansulkuna.
Ilmanläpäisevyys	Ilmanläpäisevyys ( $k_a$ ) ilmoittaa stationääritilassa laminaarisena virtauksena siirtyvän ilman tilavuuden, joka läpäisee kohtisuorasti pinta-alayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen tilanteessa, jossa ainekerroksen eri puolilla olevien ilmatilojen paine-ero on yksikön suuruinen.
Ilmanläpäisykerroin	Ilmanläpäisykerroin ( $K_a$ ) ilmoittaa stationääritilassa laminaarisena virtauksena siirtyvän ilman tilavuuden, joka läpäisee kohtisuorasti pinta-alayksikön suuruisen rakennusosan tilanteessa, jossa rakennusosan eri puolilla olevien ilmatilojen paine-ero on yksikön suuruinen.
Ilmansulku	Rakennusvaipassa oleva erillinen ainekerros, joka estää haitallisen ilmavirtauksen rakenteen läpi.
Ilmanvaihtuvuus	Ilmanvaihtuvuus kuvaa, kuinka monta kertaa ilma vaihtuu kokonaan tarkastelun kohteena olevassa tilassa ajan yksikköä kohti.
Ilmavuoto	Ilman virtaus eli konvektio rakennuksen vaipan läpi. Ilmavuotoja aiheuttaa paine-erot rakennuksen sisä- ja ulkopuolen välillä. Ilmavuodot pyrkivät tasaamaan paine-eroja.
Ilmanvuotoluku, $n_{50}$	Ilmanvuotoluku $n_{50}$ kuvaa, kuinka monta kertaa rakennuksen tilavuuden suuruinen ilmamäärä vaihtuu tunnissa, kun paine-ero rakennusvaipan yli on 50 Pa.
Ilmanvuotoluku, $q_{50}$	Ilmanvuotoluku $q_{50}$ on rakennusvaipan pinta-alalla normitettu luku, joka kuvaa ilmamäärän vaihtumista rakennusvaipan pinta-alaa kohden tunnissa, kun paine-ero rakennusvaipan yli on 50 Pa.
Isotrooppinen	Isotrooppisuudella tarkoitetaan suunnasta riippumatonta. Rakennusmateriaalit voivat olla isotrooppisia rakennusfysiikkalisten ominaisuuksien suhteen. Vastakohta isotrooppiselle on anisotrooppinen.

Kondensoituminen	Kondensoituminen tarkoittaa vesihöyryn tiivistymistä rakenteen sisällä tai pinnalla vedeksi tai jääksi, kun ilman vesihöyrypitoisuus on tarkasteltavassa kohdassa saavuttanut vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuuden.
Kriittinen RH	Kriittinen RH on raja-arvo ilman suhteelliselle kosteudelle, jonka ylittymisestä voi seurata haitallisia ilmiöitä kuten homeen kasvua rakenteessa. Raja-arvon suuruuteen vaikuttavat tarkasteltava ilmiö, ympäröivät olosuhteet, kuten lämpötila sekä tarkasteltava materiaali.
Rakennusvaippa	Rakennusosien kuten ulkoseinien, yläpohjan ja alapohjan muodostama kokonaisuus, jonka tehtävänä on erottaa rakennuksen lämmöneristetyt tilat ulkoilmasta.
Sisäilman kosteuslisä	Rakennuksen sisä- ja ulkoilman vesihöyrypitoisuuksien erotus, kun sisäilman vesihöyrypitoisuus on suurempi tai yhtä suuri kuin ulkoilmassa. Sisäilman vesihöyrypitoisuus voi olla myös alhaisempi kuin ulkoilman, jolloin kyseessä on sisäilman kosteusvaje.
Stationääritila	Stationääritilassa systeemin lämpötila ja eri aineiden pitoisuudet pysyvät muuttumattomina ja tasapainossa ajan kuluessa. Systeemiin siirtyy yhtä paljon lämpöä ja ainetta kuin systeemistä poistuu. Vastakohta stationääritilalle on epästationääritila
Suhteellinen kosteus	Ilman suhteellinen kosteus ( $\varphi$ ) ilmoittaa kuinka suuri osuus ilmassa on kosteutta vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuuden verrattuna tietyssä lämpötilassa.
Suomalainen homemalli	Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n ja Tampereen teknillisen yliopiston yhteistyönä kehitetty laskentamalli, jolla voidaan muuttuvissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa arvioida homeen kasvua erilaisten rakennusmateriaalien pinnoilla ajan funktiona.
Tuulensuoja	Tuulensuoja on materiaalikerros, jonka tehtävänä on estää tuulen aiheuttamien haitallisten ilmavirtauksien muodostuminen lämmöneristekerrokseen.
Vesihöyrypitoisuus	Vesihöyrypitoisuus ( $v$ ) ilmoittaa kuinka paljon ilmassa on vesihöyryä tilavuuteen suhteutettuna.
Vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuus	Vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuus ( $v_{\text{sat}}$ ) ilmoittaa vesihöyrypitoisuuden, jonka ilma voi sitoa itseensä tietyssä lämpötilassa. Ilman vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuus voidaan ilmoittaa myös vesihöyryn osapaineen avulla ( $p_{\text{sat}}$ ).
Viistosade	Viistosade (WDR) on tuulen aiheuttama sateen vaakasuuntainen komponentti. Viistosade aiheuttaa kosteuskuormituksen rakennuksen tuulenpuoleisille pystypinnoille.

# 1. JOHDANTO

## 1.1 Tutkimuksen tausta

Tarve ja kiinnostus tätä tutkimusta kohtaan muodostuvat tutkimuksen tekijän suorittamien kuntotutkimuksien ja niiden perusteella syntyneiden kokemusten ja havaintojen kautta rakennuksista, joissa ulkoseinärakenteena on käytetty tiili-villa-tiili –rakennetta. Kyseisessä seinärakenteessa tyypillisesti esiintyvät ongelmat ovat hyvin tiedostettuja, mutta varsinaista tarkempaa tutkimusta ja rakennusfysikaalisia laskentatarkasteluja liittyen tiili-villa-tiili –ulkoseinärakenteisiin ei ole juurikaan tehty. Tämän puuttuvan tiedon inspiroimana tässä tutkimuksessa on tarkoituksena käsitellä edellä mainitun rakenteen rakennusfysikaalista toimintaa, erilaisten rakenneratkaisujen ja vaurioiden vaikutusta sekä arvioida seinärakenteen läpi tapahtuvien ilmavuotojen suuruusluokkaa.

Lisäksi tutkimuksen tarpeellisuutta voidaan perustella myös aiheen ajankohtaisuudella. Esimerkiksi koulujen, päiväkotien ja palvelurakennuksien sisäilmaongelmat ovat saaneet viime vuosina paljon medianäkyvyyttä ja herättäneet runsaasti keskustelua. Sisäilmaongelmat ovat monisyisiä, mutta niiden syntymiseen myötävaikuttavat voimakkaasti rakennuksessa esiintyvät kosteus- ja mikrobivauriot. Vaikutuksiltaan merkittävien kosteus- ja mikrobivaurioiden esiintyvyyden on arvioitu olevan kouluissa ja päiväkodeissa 12-18 %, hoitolaitoksissa 20-26 %, toimistorakennuksissa 2,5-5 % ja asuinrakennuksissa 6-10 % kerrosalasta. Merkittävällä kosteus- ja mikrobivauriolla tarkoitetaan tässä yhteydessä rakennuksen käyttäjien suurta todennäköisyyttä altistua rakenteista ja materiaaleista vapautuville epäpuhtauksille. Näissä tapauksissa rakennuksen korjaustarve määritellään kiireelliseksi. (Reijula et al. 2012)

Tilastokeskuksen vuoden 2018 rakennuskantaselvityksen (2018) mukaan Suomen rakennuskanta käsittää kaikkiaan noin 1,5 miljoonaa rakennusta pois lukien kesämökit ja talousrakennukset. Näistä asuinrakennuksia on 85 %, loppuosan jakaantuessa muun muassa liike- toimisto-, hoito- ja opetusalan rakennuksiin, sekä erinäisiin teollisuus-, varasto- ja kokoontumisrakennuksiin. Suomalainen rakennuskanta muodostuu matalista rakennuksista: lukumääräisesti mitattuna 66 % on yksikerroksisia ja 95 % korkeintaan kaksikerroksisia rakennuksia. Suomen kansallisvarallisuudesta vuonna 2019 45 % prosenttia eli noin 500 miljardia euroa on sitoutunut rakennuksiin (ROTI 2019). Sisäilmaongelmia voidaan pitää merkittävänä sekä taloudellisesta, että kansanterveydellisestä nä-

kökulmasta tarkasteltuna, kun otetaan huomioon kosteus- ja mikrobivaurioituneiden rakennuksien osuus koko Suomen rakennuskannasta, sekä rakennuskannan merkittävä osuus Suomen kansallisvarallisuudesta.

Nykyisten sisäilmaongelmien lähtökohtana pidetään 1970-luvun alkupuolen öljykriisejä, joiden seurauksena rakennusten tiiviyyteen ja lämmöneristävyyteen alettiin kiinnittää enemmän huomiota kohonneiden lämmityskustannusten seurauksena. Vanhojen rakennusten ilmatiiviyttä ja energiatehokkuutta parannettiin ja uudet rakennukset rakennettiin aiempia tiiviimmiksi ymmärtämättä kuitenkaan ilmanvaihdon merkitystä. Parantuneen ilmatiiviyden aiheuttamaa tunkkaista sisäilmaa pyrittiin parantamaan ilmanpoistoa lisäämällä, jolloin rakennusten alipaineisuus kasvoi puuttuvien tuloilmakoneiden ja korvausilmareittien takia. Nykyaikana ilmanvaihdon ja etenkin korvausilman merkitys osana hallittua sisäympäristöä ymmärretään paremmin. Tästä huolimatta julkisissa rakennuksissa, joiden käyttö painottuu arkipäiviin, on usein tapana kustannussyihin vedoten sulkea tai säätää ilmanvaihto pienemmälle teholle iltaisin ja viikonloppuisin. Suljettu tai vajaalla teholla toimiva tuloilmanvaihto yhdessä jatkuvasti päällä olevien likaisten tilojen eli keittiön ja saniteettitilojen poistoilmanvaihdon kanssa muuttaa rakennuksen painesuhteita siten, että alipaineisuus ulkoilmaan nähden voi kasvaa voimakkaasti. Tämän seurauksena rakennekerrosten, rakenneliittymien ja viemäreiden kautta tapahtuva korvausilman sisäänotto eli hallitsemattomat ilmavuodot voimistuvat mahdollistaen sisäilman laadun heikkenemisen. (Seuri & Palomäki 2000)

Ilmavuotoreittien kautta kulkeutuvat epäpuhtaudet voivat olla orgaanisia tai epäorgaanisia hiukkasia. Orgaanisia hiukkasia, joille altistumisen on todettu aiheuttavan terveyshaittoja ovat muun muassa kosteusvaurioituneesta rakennusmateriaalista peräisin olevat mikrobien aineenvaihduntatuotteet. Epäorgaanisista hiukkasista esimerkiksi lämmöneristekerroksesta peräisin olevat mineraalivillakuidut voivat aiheuttaa tilojen käyttäjissä ärsytysoireita. (Seuri & Palomäki 2000) Kenttätutkimuksilla on kartoitettu yleisimpiä ilmavuotoreittejä pientaloissa ja kerrostaloissa vaipparakenteen yli, sisä- ja ulkoilman välillä. Tutkimuksen perusteella yleisimpiä ilmavuotoreittejä ovat ikkunat ja ovet, sekä näiden liittymät ulkoseinärakenteeseen. Ikkunoiden ja ovien osuus kaikista havaituista ilmavuodoista oli pientaloissa 65 % ja kerrostaloissa 89 %, rakennuksen ilmanvaihdon ollessa normaalitilassa. Lisäksi ilmavuotoja esiintyy pientaloissa ulkoseinien liittymisissä ylä- ja välipohjiin. (Vinha et al. 2009)

## 1.2 Tutkimuksen sisältö ja tavoitteet

Tässä tutkimuksessa keskitytään tarkastelemaan 1960-luvulta lähtien käytettyä, korkeintaan kahden kerroksen korkuista, tiili-villa-tiili-ulkoseinärakennetta ja sen lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa. Tarkasteluissa rakenteen oletetaan toimivan ideaalirakenteen tavoin eli rakenteen ei oleteta tapahtuvan ilmavuotoja. Todellisuudessa rakenne ei aina toimi suunnitellun ideaalitulanteen mukaisesti, vaan haitallisia vuotoreittejä tulee jossain määrin esiintymään rakenteen elinkaaren aikana. (RIL 255-1-2014) Tästä syystä tähän tutkimukseen sisällytetään myös epäideaalitulanteen tarkasteluita, joissa selvitetään vuotoreittien kautta kulkeutuvia ilmamääriä erikokoisten rakojen läpi vaihtelevissa painesuhteissa. Tarkasteltaessa rakennetta epäideaalitulanteessa on hyväksyttävä laskentatarkastelujen tuloksissa suurempi epävarmuus, kuin ideaalitulanteen tarkasteluissa. Tämän takia herkkyystarkasteluita tullaan suorittamaan ilmavuotoreittien koon, sisäkuoren ilmanpitävyyden, sekä rakennusvaipan yli vallitsevan paine-eron funktiona.

Tutkimuksen tavoitteena on pystyä tarjoamaan kuntotutkijoille, korjausrakennesuunnittelijoille ja muille sidosryhmille arvio vanhan sekä nykyohjeiden mukaisen tiili-villa-tiili –ulkoseinärakenteen lämpö- ja kosteusteknisestä toimivuudesta nykyilmastossa, sekä ennustettuun ilmastomuutokseen perustuvissa tulevaisuuden ilmastoissa. Tutkimuksen tavoitteena on myös arvioida erilaisten rakennusvirheiden ja vaurioiden, kuten tuuletusraon tukkeutumisen tai tiiliverhouksen sisältämien rakojen vaikutusta rakenteen toimivuuteen. Lisäksi tavoitteena on erilaisilla painesuhteilla määrittää ulkoseinän tyypillisten epätiiviyskohtien kautta kulkeutuvien ilmavirtauksien merkittävyyttä suhteessa muurattuun sisäkuoreen.

## 1.3 Tutkimusmenetelmät

Tutkimuksen kirjallisuuskatsauksessa esitetään jäljempänä tapahtuvaan laskennalliseen tarkasteluun oleellisesti liittyvien fysikaalisten ilmiöiden teoria. Lisäksi kirjallisuuskatsaus esittelee mallinnettavan ulkoseinärakenteen ja ulkoseinärakenteessa yleisesti havaittujen ongelmakohtien syyt ja seuraukset, sekä olosuhteet, joille rakenne todennäköisesti altistuu elinkaarensa aikana. Laskentatarkasteluita varten luotiin malli tyypillisesti 1960-1990-luvuilla, sekä 2000-luvulla käytetyistä tiili-villa-tiili-ulkoseinärakenteista. Seinärakenteeseen mallinnettavien ilmavuotoreittien sijoittuminen perustuu kirjallisuuskatsauksen sekä kuntotutkimusten myötä aistinvaraisesti, merkkiainekokeilla ja/tai lämpökameralla havaittuihin epätiiviyskohtiin.

Johtuen rakennusfysikaalisten ilmiöiden esiintymisestä muuttuvissa olosuhteissa ja usean erilaisen lämmön- ja kosteudensiirtymismuodon yhtäaikaista vuorovaikutuksesta ollaan hyvin nopeasti tilanteessa, jossa rakennusfysikaalisia ongelmia ratkotaan erilaisten laskenta- ja simulointiohjelmien avustuksella. Tässä tutkimuksessa tullaan käyttämään kahta erilaista ja toisistaan poikkeavaa rakennusfysikaalisiin laskentatarkasteluihin soveltuvaa laskentaohjelmaa. Ohjelmat ja niiden versiot ovat Comsol Multiphysics 5.4 ja WUFI Pro 6.3. Ohjelmiin viitataan myöhemmin tässä tutkimuksessa nimillä Comsol ja Wufi.

Laskentatarkastelut suoritettiin pääosin Comsolilla. Ideaalirakenteille suoritettiin lisäksi referenssilaskelmia Wufilla ohjelmien välisten tulosten arvioimiseksi ja mahdollisten erojen selvittämiseksi. Laskennalliset tarkastelut ajoittuivat syys-joulukuun 2019 välille ja ne suoritettiin Tampereen yliopiston rakennusfysiikan tutkimusryhmän tiloissa. Laskennallisissa tarkasteluissa ohjaajana toimi Petteri Huttunen.

Comsol on monifysikaalinen simulointiohjelmisto, joka perustuu osittaisdifferentiaaliyhtälöiden reunaehtojen approksimointiin numeerisella FEM (finite element method) –laskentamenetelmällä eli toisin sanoen elementtimenetelmällä. Elementtimenetelmän tarkoituksena on ratkaista riittävällä tarkkuudella matemaattisia ongelmia, kuten osittaisdifferentiaaliyhtälöitä yksinkertaistamalla niitä. Tämän kaltaisten epälineaaristen ongelmien ratkaisu muuttuu näin ollen iteratiiviseksi, kunnes riittävä tarkkuus on saavutettu. Alkuperäisen ongelman yksinkertaistuksen seurauksena ratkaisuksi saadaan lopulta approksimaatio alkuperäisen ongelman ratkaisusta. Approksimaation tarkkuus riippuu elementtien lukumäärästä, koosta ja muodosta. Elementtien koon pienentäminen ja tästä seuraava elementtiverkon tihentyminen parantaa laskentatarkkuutta, mutta lisää usein myös laskenta-aikaa. Ratkaisun saavuttamiseksi tulee tehdä optimointia näiden kahden asian välillä. Tässä tutkimuksessa ratkaistavat epälineaariset osittaisdifferentiaaliyhtälöt muodostuvat ilman, lämmön ja kosteuden siirtymisestä ulkoseinärakenteessa muuttuvissa ympäristön olosuhteissa.

Wufi on simulointiohjelma, jolla voidaan numeerisesti ratkaista lämmön- ja kosteudensiirtymisen ongelmia ajan suhteen muuttuvissa ympäristön olosuhteissa. Ohjelmasta on mahdollista tulostaa laskentatuloksiin perustuvia lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja kosteuspitoisuuden arvoja eri ajanhetkiltä, rakenteen eri pisteistä. Wufilla ei ole mahdollista huomioida kosteuden ja lämmön siirtymistä konvektiolla. Yhdistetyn lämmön ja kosteuden siirtymisen osalta Nusser ja Teibinger (2012) ovat suorittaneet vertailulaskelmia Comsolin ja Wufin välillä. Vertailuissa käytetty laskentamalli oli yksiuolotteinen. Comsolin

ja Wufin välillä tulokset ovat hyvin lähellä toisiaan. Poikkeavuutta tuloksiin syntyi tilanteessa, jossa rakenteen kosteuspitoisuus nousi korkeaksi. Tällöin Comsolin tulokset kasvoivat Wufin tuloksia voimakkaammin.

Laskentatarkasteluissa käytetyt ohjelmat eivät ota kantaa rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan tai tulosten luotettavuuteen, joten käyttäjällä tulee olla ymmärrystä tulkita ohjelman antamia tuloksia ja mahdollisia virhelähteitä. Erilaisten rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden arviointi ja erilaisten rakenteiden keskinäinen vertailu suoritetaan Suomalaisen homemallin mukaisesti, jossa rakenteiden ennalta oletettujen kriittisten tarkastelupisteiden lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvojen avulla lasketaan vuoden tarkastelujakson aikana homekasvuston runsautta kuvaava homeindeksin maksimiarvo.

## **1.4 Tutkimuksen rajaukset**

Tiili-villa-tiili-ulkoseiniä on toteutettu hyvin monenlaisilla rakennepaksuuksilla. Rajallisen laskenta-ajan ja käytettävissä olevan laitteiston laskentatehon puitteissa jouduttiin rajoittamaan tarkasteltavien laskentamallien lukumäärää ja valitsemaan tarkasteluihin vain kyseisen ulkoseinärakenteen nk. vakioratkaisut. Kaikkia erilaisia variaatioita tarkastelun kohteena olevasta ulkoseinärakenteesta ei voitu käsitellä ja esimerkiksi rakenteen sisäkuoren ja lämmöneristekerroksen paksuus vakioitiin, jolloin saatiin rajattua laskentatarkastelujen lukumäärä kohtuulliseksi. Laskentatarkasteluista saatavan suuren datamäärän vuoksi kaikkea tulosdataa ei voida käsitellä eikä esittää. Tulokset osiossa keskitytään esittämään tutkimuksen tavoitteiden kannalta keskeisimmät ja merkityksellisimmät laskentatulokset johtopäätöksineen.

Tässä tutkimuksessa mallinnettiin myös ilman siirtymistä tiili-villa-tiili –ulkoseinärakenteen sisäkuoren ja rakojen läpi konvektiolla. Lämmön ja kosteuden konvektiotarkastelut rajattiin näiden tarkastelujen ulkopuolelle. Ilmavuototarkasteluita varten luotiin malli ikkunallisesta ulkoseinästä. Tarkasteluissa seinän ja ikkunan pinta-ala säilytettiin vakiona.

## 2. ILMAN, LÄMMÖN JA KOSTEUDEN SIIRTYMINEN

Lämmön ja kosteuden siirtyminen ovat sidoksissa toisiinsa ja monien termien välillä on löydettävissä suora analogia. Ilma toimii tiettyjen lämmön- ja kosteudensiirtymismekanismien väliaineena. Ilman mukana voi kulkeutua lämmön ja kosteuden lisäksi myös erilaisia epäpuhtauksia.

Rakenteiden rakennusfysikaalisen tarkastelun ja laskentamallien tulosten pohjalta tehtävien johtopäätöksiä kannalta on tärkeää ymmärtää taustalla vaikuttavaa teoriaa ilman, lämmön ja kosteuden siirtymisestä. Tässä kappaleessa esitellään ulkoseinärakenteen laskennallisiin tarkasteluihin liittyvä teoreettinen tausta ilman, lämmön ja kosteuden siirtymisestä tutkimuksen kannalta oleellisimpien laskentakaavojen avulla.

### 2.1 Ilma ja ilmavirtaukset

Ilma on usean eri yhdisteen muodostama kaasuseos. Kuiva ilma sisältää noin 78 % typimolekyylejä ( $N_2$ ), 21 % happimolekyylejä ( $O_2$ ) ja 1 % argonia (Ar), lisäksi ilmassa esiintyy erinäisiä muita kaasuja, joista hiilidioksidin ( $CO_2$ ) osuus on 0,04 % (Pinterić 2017). Ilma sisältää kuivan ilman lisäksi myös vesihöyryä. Vesihöyry on kevyempi kaasu kuin kuiva ilma ja näin ollen ilma on sitä kevyempää, mitä enemmän se sisältää vesihöyryä. (Björkholtz 1997)

Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa ilma voidaan olettaa ideaalikaasuksi, jolloin ideaalikaasun tilanyhtälö ilmalle voidaan kirjoittaa seuraavasti (Björkholtz 1997):

$$pV = \frac{m}{M_a} RT \quad (2.1)$$

missä

$p$	on kaasun paine (Pa)
$V$	on kaasun tilavuus ( $m^3$ )
$m$	on kaasun massa (kg)
$M_a$	on ilman moolimassa (28,96 kg/mol)
$R$	on yleinen kaasuvakio, (8,314 J/(mol·K))
$T$	on ilman lämpötila (K)



Ideaalikaasu on teoreettinen malli reaalikaasusta, joka sisältää erilaisia oletuksia matemaattisen käsittelyn mahdollistamiseksi. Ideaalikaasumalli olettaa muun muassa kaasun rakennusosien olevan keskenään samanlaisia sekä pistemäisiä, liikkuvan lämpöliikkeen takia täysin satunnaisesti vakionopeudella ja suoraviivaisesti sekä törmäilevän toisiinsa kimmoisasti ja vaikuttavan toisiinsa ainoastaan törmäyksien kautta. (Young et al. 2016)

Ideaalikaasun tilanyhtälöstä voidaan edelleen johtaa kaava kaasun tiheydelle (Björkholtz 1997):

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT} \quad (2.2)$$

Kaasu, joka toimii väliaineena lämmön ja kosteuden konvektiolle siirtyy eli virtaa tiheuserojen seurauksena kohti alhaisempaa pitoisuutta. Tässä kappaleessa tarkastellaan rakennusfysikaalisesti merkittävän väliaineen eli ilman siirtymistä rakenteissa. Lämmön ja kosteuden siirtymistä konvektiolla tullaan käsittelemään tarkemmin kappaleissa 2.2.2 Lämmön konvektio ja 2.6.1 Vesihöyryn konvektio.

Konvektio voidaan jakaa luonnolliseen ja pakotettuun konvektioon. Luonnollinen konvektio eli savupiippuvaikutus on seurausta lämpötilaerojen aiheuttamista tiheuseroista: lämmin ilma kohoaa kylmää ilmaa kevyempänä ylöspäin painovoiman vaikutuksesta. Pakotetussa konvektiossa tiheuserot syntyvät ulkoisen voiman seurauksena, kuten tuulenpaineesta, ilmanvaihtokoneista tai ihmisten liikkeistä. (Siikanen 1996)

Luonnollisen sekä pakotetun konvektion aikaan saamat ilmavirtaukset voivat olla joko laminaarisia tai turbulenttisia. Laminaarisessa virtauksessa virtausviivat ovat yhdensuuntaisia. Turbulenttinen virtaus on pyörteistä ja kaoottisempaa, väliaineen partikkelit voivat liikkua vapaasti eri suuntiin ja kaasun sisäiset kitkavoimat ovat pieniä paikallisiin liikemääriin verrattuna. Turbulenttinen virtaus kuljettaa enemmän lämpöä kuin laminaarinen virtaus. Virtausreitien varrelle osuva este tai muu virtausta häiritsevä tekijä voi aiheuttaa virtaustyyppien muuttumisen turbulenttisesta laminaariseksi ja päinvastoin. (Hens 2012)

Ilmavirtauksen tyyppi tulee selvittää Reynoldsin luvun avulla ennen kuin ilman tilavuusvirran suuruutta voidaan laskennallisesti tarkastella. Laminaariselle ja turbulenttiselle virtaukselle on kirjallisuudessa esitelty laskentakaavoja. Dimensioton Reynoldsin luku on suhdeluku ilmavirran tiheyden ja viskositeetin välillä ja se voidaan laskea seuraavan sivun kaavalla 2.3:

$$Re = \frac{r_a L}{\gamma_a} \quad (2.3)$$

missä

- $r_a$  on ilmavirran tiheys ( $m^3/(m^2 \cdot s)$ )  
 $L$  on karakteristinen pituus (m)  
 $\gamma_a$  on ilman kinemaattinen viskositeetti ( $m^2/s$ )\*

\*Ilman kinemaattinen viskositeetti  $\gamma_a$  ( $m^2/s$ ) saadaan laskettua ilman tiheyden  $\rho_a$  ( $1,2 \text{ kg}/m^3$ ) ja ilman dynaamisen viskositeetin  $\eta_a$   $17,5 \times 10^{-6}$  ( $s \cdot Pa$ ,  $N \cdot s/m^2$ ) suhteena  $\eta_a / \rho_a$ .

Reynoldsin luvun laskentakaavassa esiintyvä karakteristisen pituuden  $L$  (m) määritelmä vaihtelee virtaustilanteen geometrian mukaan. Tarkasteltaessa ilman virtausta putkessa pituus  $L$  on putken sisähalkaisija. Tilanteet, joissa tarkastellaan ilman virtausta seinärakenteen raon tai reiän läpi on pituus  $L$  seinän paksuus virtauksen suunnassa. Geometrian ollessa monimutkaisempaa, tulee pituus  $L$  selvittää laskennallisesti. (Hens 2012)

Reynoldsin lukuun pohjautuvat raja-arvot laminaariselle, turbulenttiselle virtaukselle sekä näiden yhdistelmälle ovat esitetty taulukossa 2.1 Ilman tilavuusvirran laskennallinen tarkastelu edellyttää ilmavirtauksen tyyppin tuntemista.

**Taulukko 2.1** Reynoldsin luvun raja-arvot erilaisilla ilmavirtauksen tyypeillä. (Vinha 2019)

Ilmavirtauksen tyyppi	Reynoldsin luku
laminaarinen	$Re < 2000$
laminaarinen tai turbulenttinen	$2000 \leq Re \leq 3500$
turbulenttinen	$Re > 3500$

Ilmavirtauksia rakennusvaipan sisä- ja ulkoilman välillä voi tapahtua huokoisen materiaalin läpi sekä rakojen, halkeamien ja reikien kautta. Ilman tilavuusvirran  $R_a$  ( $m^3/s$ ) suuruus raon, reiän tai huokoisen materiaalin läpi voidaan laskea seuraavan sivun kaavoilla 2.4-2.6 tilanteissa, joissa ilmavirtaus on laminaarista eli Reynoldsin luku on alle 2000.

Rakojen ja reikien läpi siirtyvän ilman tilavuusvirran määrittäminen virtauksen ollessa turbulenttista on laskennallisesti työläämpää kuin laminaarisen virtauksen tapauksessa. Tässä tutkimuksessa ei käsitellä turbulenttista virtausta. Turbulenttisen virtauksen määrittämiseksi käytettäviä laskentakaavoja voi löytää esimerkiksi lähteistä: Hagentoft (2001) ja Hens (2012).

Ilman tilavuusvirta  $R_a$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) raon läpi voidaan laskea kaavalla (Hagentoft 2001):

$$R_a = \frac{b^2 A \Delta p}{12 \eta_a L} \quad (2.4)$$

missä

- $b$  on raon korkeus (m)
- $A$  on raon pinta-ala
- $\Delta p$  on paine-ero raon yli (Pa)
- $\eta_a$  on ilman dynaaminen viskositeetti  $17,5 \times 10^{-6}$  ( $\text{s} \cdot \text{Pa}$ ,  $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ )
- $L$  on raon pituus ilmavirtauksen suunnassa (m)

Ilman tilavuusvirta  $R_a$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) ilmatiiviissä rakennekerroksessa olevan reiän läpi voidaan laskea Dicksin kaavalla (Hagentoft 2001):

$$R_a = \sqrt{\frac{0,845 \Delta p}{\rho_a}} A \quad (2.5)$$

missä

- $\Delta p$  on paine-ero reiän yli (Pa)
- $\rho_a$  on ilman tiheys ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
- $A$  on reiän pinta-ala ( $\text{m}^2$ )

Ilman tilavuusvirta  $R_a$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) huokoisen materiaalin läpi stationääritilanteessa voidaan laskea Darcyn lain avulla (Hagentoft 2001):

$$R_a = r_a A = A \frac{k_a \Delta p}{\eta_a d} \quad (2.6)$$

missä

- $A$  on tarkasteltavan alueen pinta-ala ( $\text{m}^2$ )
- $k_a$  on materiaalin ilmanläpäisevyys ( $\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$ )
- $\Delta p$  on painero materiaalikerroksen yli (Pa)
- $d$  on tarkasteltavan materiaalin paksuus (m)

Ilmanläpäisevyyden arvoja on määritetty erilaisille rakennusmateriaaleille ja pinnoitteille. Tässä tutkimuksessa tarkasteltavan ulkoseinärakenteen materiaalien kuten tiilen, muurauslaastin ja mineraalivillan ilmanläpäisevyyden arvoja ovat esittäneet Trechsel (2001), Hens et al. (2007), Laine (2010) ja Vinha (2013).

## 2.2 Lämmön siirtyminen

Termodynamiikassa eli lämpöopissa tarkastellaan systeemin ja ympäristön välillä siirtyvää energian määrää eli lämpöä sekä systeemin tai systeemiin tehtyä työtä. Systeemin sisäenergian muutos on aina yhtä suuri kuin siihen tehdyn työn ja systeemiin tuodun lämpöenergian summa (Pinterić 2017). Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa systeemi on usein jokin rakenneosaa tai materiaali, tässä tutkimuksessa systeeminä toimii tiili-villa-tiili-ulkoseinärakenne ja ympäristönä kyseistä ulkoseinärakennetta ympäröivä sisä- ja ulkoilma. Termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön mukaisesti lämpö siirtyy aina korkeammasta lämpötilasta kohti matalampaa lämpötilaa (Hens 2012). Erilaisia lämmön siirtymismekanismia on kolme:

1. Johtuminen
2. Konvektio
3. Säteily

Lämpövirran suuruus  $\Phi$  (W tai J/s) voidaan laskea kaavalla (Pinterić 2017):

$$\Phi = \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (2.7)$$

missä

- $Q$  on lämpö (J)  
 $t$  on aika (s)

Siirtyneen lämmön määrää kuvataan yleensä lämpövuolla eli lämpövirran tiheydellä  $q$  (W/m<sup>2</sup>), joka on lämpövirta pinta-alayksikköä kohden:

$$q = \frac{\Phi}{A} \quad (2.8)$$

missä

- $A$  on pinta-ala (m<sup>2</sup>)

Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa on otettava huomioon lämmön kaikki siirtymismekanismit. Siirtyneen lämmön kokonaismäärä on johtumalla, konvektiolla ja säteilemällä siirtyneen lämmön summa.

## 2.2.1 Johtuminen

Johtuminen (konduktio) on lämmön siirtymismekanismi, jossa lämpöenergia välittyy aineen molekyylien värähtelynä ilman, että molekyylien paikat vaihtuisivat eli toisin sanoen johtumisessa ainetta ei siirry. Johtuminen on tyypillinen lämmönsiirtomekanismi kiinteille kappaleille, mutta lämpöä siirtyy johtumalla myös nesteissä ja kaasuissa. (Hens 2012)

Tarkasteltaessa lämmön johtumista kolmiulotteisessa karteesisessa koordinaatistossa, jossa ainekerros on homogeeninen ja isotrooppinen voidaan ainekerroksessa johtumalla siirtyvä lämpövirran tiheys  $q$  ( $W/m^2$ ) laskea Fourierin ensimmäisen lain perusteella differentiaaliyhtälönä (Pinterić 2017):

$$q = -\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \lambda \frac{\partial T}{\partial y}, \lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right) = -\lambda \nabla T \quad (2.9)$$

missä

$\lambda$	on lämmönjohtavuus ( $W/(m \cdot K)$ )
$T$	on lämpötilaero ainekerroksen välillä (K)
$d$	on ainekerroksen paksuus (m)
$x, y, z$	ovat lämpövirran suuntakoordinaatit (m)

Lämmönjohtavuus  $\lambda$  ( $W/(m \cdot K)$ ) on materiaaliominaisuus, kuvaa kuinka hyvin jokin materiaali johtaa lämpöä. Mitä suurempi lämmönjohtavuuden arvo on, sitä paremmin lämpö johtuu materiaalissa. Lämmönjohtavuus on kokeellisesti määritelty eri materiaaleille ja se on riippuvainen materiaalin suhteellisesta kosteudesta, lämpötilasta ja kuivatiheydestä (Siikanen 1996). Materiaalin lämmönjohtavuus huomioi johtumalla, konvektiolla ja säteilemällä siirtyneen lämmön materiaalissa (Björkholtz 1997). Materiaalin ominaisuudet määrittelevät, mikä lämmönsiirtomekanismi on vallitseva.

Yhtälöstä (2.9) havaitaan termodynamiikan toisen pääsäännön mukaisesti lämpötilan pyrkivän tasaantumaan siirtymällä lämpimämmästä kohti kylmempää eli lämpövirran tiheysvektori  $q$  on päinvastainen lämpötilagradienttiin  $\nabla T$  nähden.

Kun lämmön johtumista halutaan tarkastella epästationäärisessä eli ajasta riippuvaisessa tilanteessa tulee ottaa huomioon tarkasteltavan systeemin lämpötilan muuttuminen ajan kuluessa. Termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön mukaisesti energiaa ei voi luoda tai hävittää, joten systeemiin johtuneen lämmön ja siinä kehittyneen energian summan on oltava yhtä suuri kuin systeemistä johtuneen lämmön ja siihen varastoituneen energian summa. (Pinterić 2017) Epästationäärisessä tilanteessa lämmön johtuminen systeemiin ja systeemiin varastoitunut energia voidaan kirjoittaa kaavan 2.10 mukaisella yhtälöllä, olettaen lämmönjohtavuuden pysyvän lämpötilan muuttuessa vakiona.

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = -\rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.10)$$

missä

$q_x, q_y, q_z$	ovat lämpövuon x-, y- ja z-suuntaiset komponentit
$\rho$	on materiaalin tiheys ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$c$	on materiaalin ominaislämpökapasiteetti ( $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ )
$t$	on aika (s)

Ominaislämpökapasiteetti on materiaaliominaisuus, joka kuvaa kuinka paljon lämpöenergiaa on massaltaan yksikön suuruisen kappaleeseen siirrettävä, jotta sen lämpötila nousisi yhden asteen. Materiaalin tiheyden, ominaislämpökapasiteetin ja lämmönjohtavuuden pohjalta voidaan laskea materiaalin terminen diffusiviteetti  $a$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) (Hens 2012):

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (2.11)$$

Terminen diffusiviteetti on materiaaliominaisuus, joka kuvaa kuinka nopeasti paikallinen lämpötilan muutos leviää materiaalissa. Mitä suurempi termisen diffusiviteetin arvo on, sitä nopeammin lämmön leviäminen tapahtuu materiaalissa.

## 2.2.2 Lämmön konvektio

Lämmön konvektio on lämmönsiirtymismekanismi, jolla tarkoitetaan lämmön siirtymistä kaasun tai nesteen mukana. Konvektio vaatii siis väliaineen, joka kuljettaa lämpöä. Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa väliaineena toimii ilma. Erilaiset konvektiotapaukset voidaan jakaa syntymekanismien perusteella pakotettuun ja luonnolliseen konvektioon, vaikkakin nämä eivät koskaan esiinny täysin itsenäisinä. (Hens 2012, Pinterić 2017)

Pakotetussa konvektiossa ilma liikkuu ulkoisen voiman aiheuttamien tiheyserojen seurauksena. Rakennuksen sisällä pakotettua konvektiota aiheuttavat esimerkiksi ilmanvaihtokoneet ja ihmisten liikkuminen, vastaavasti ulkoilmassa helpoiten havaittu esimerkki pakotetusta konvektiosta on tuulenpaineen aiheuttamat tiheyserot. Luonnollisessa konvektiossa ilma liikkuu lämpötilaerojen aiheuttamien tiheyserojen seurauksena. (Björkholtz 1997) Lämmin ilma on kylmää ilmaa harvempaa ja näin ollen kevyempää eli se nousee ylöspäin painovoiman vaikutuksesta.

Kaikissa konvektiotapauksissa materiaalin pinnalta siirtynyt lämpövirran tiheys  $q$  ( $W/m^2$ ) on verrannollinen konvektiiviseen lämmönsiirtokerrotimeen sekä pinnan ja ympäröivän ilman väliseen lämpötilaeroon. Konvektiolla siirtyvän lämpövirran tiheys voidaan laskea Newtonin jäähtymislailalla seuraavan kaavan mukaisesti (Pinterić 2017):

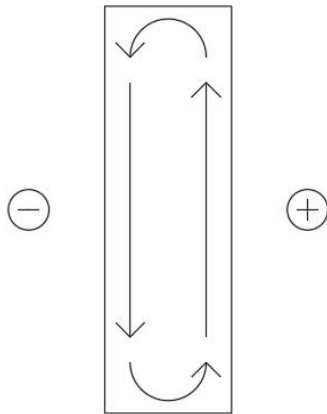
$$q = h_c \Delta T \quad (2.12)$$

missä

- $h_c$  on konvektiivinen lämmönsiirtokerroin ( $W/(m^2 K)$ )
- $\Delta T$  on lämpötilaero pinnan ja ympäröivän ilman välillä (K)

Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin ei ole varsinaisesti materiaaliominaisuus, vaan siihen vaikuttavat väliaineen virtausnopeus, ympäristön lämpötila ja paine sekä tarkasteltavan pinnan geometria ja karheus. Lisäksi kertoimen suuruuteen vaikuttaa väliaineen virtauksen luonne, joka voi olla laminaarista tai turbulენტista. (Serth et al. 2014) Konvektiivisen lämmönsiirtokerroimen tarkka määrittäminen on haastavaa johtuen useista kertoimen arvoon vaikuttavista muuttujista. Kertoimen likimääräinen arvo voidaan yksinkertaisimmillaan määrittää empiiristen kaavojen kautta, muita vaihtoehtoisia tapoja ovat analyttinen tai numeerinen laskenta. (Hens 2012)

Sisäinen konvektio on tyypillisesti lämpötilaerojen aiheuttamaa luonnollista konvektiota, mutta myös tuuli voi vaikuttaa sisäisen konvektion suuruuteen (RIL 255-1-2014). Sisäistä konvektiota esiintyy pysty- ja vaakarakenteissa eli ulkoseinissä ja yläpohjissa, joissa kahden eri lämpötilassa olevan rakennekerrosten välissä on huokoinen lämmöneristekerros. Lämmöneristekerroksessa oleva ilma lämpenee sisäpinnan läheisyydessä, jolloin ilman tiheys pienenee ja alkaa virrata ylöspäin. Vastaavasti ulkopinnan läheisyydessä ilma jäähtyy ja sen tiheys kasvaa, jolloin ilma alkaa virrata alaspäin (kuva 2.1). Tämän seurauksena rakenteen sisälle muodostuu lämpötilaerojen aiheuttama luonnollinen konvektio. (Siikanen 1996)



**Kuva 2.1.** Sisäisen konvektion aiheuttama ilmavirtaus pystyrakenteessa.

Sisäinen konvektio heikentää lämmöneristävyyttä ja mahdollisesti myös kosteusteknistä toimivuutta ilman mukana siirtyvän kosteuden takia. Pienillä eristepaksuuksilla sisäisen konvektion merkitys lämmöneristävyyteen on kuitenkin vähäinen. (Nevander & Elmars-son 1994) Sisäisen konvektion suuruuteen vaikuttavat eristekerroksen yli vallitseva lämpötilaero, eristekerroksen korkeus ja paksuus sekä käytetyn lämmöneristeen ilmanläpäisevyys ja lämmönjohtavuus. Lämmöneristekerroksen kasvattaminen sekä ulkoilman kylmyys lisäävät eristekerroksen yli vallitsevaa lämpötilaeroa, joka voimistaa sisäistä konvektiota. (RIL 255-1-2014)

Sisäisen konvektion laskennalliset tarkastelut eivät huomioi mahdollisia ilmavirtauksia eristekerroksen ja muiden rakennusmateriaalien välisissä rajapinnoissa. Ilmavirtauksia voi aiheutua eristeiden huolimattoman asennuksen tai irtoeristeiden kuten puukuitueristeen painumisen seurauksena. (RIL 255-1-2014) Näin ollen sisäinen konvektio voi olla laskennallisia arvoja suurempi. FRAME –tutkimusprojektissa suoritettujen laboratoriotarkasteluiden ja numeeristen tarkasteluiden perusteella todettiin sisäisen konvektion vaikutuksen ulkoseinien lämmönläpäisykertoimiin olevan merkittävä vain kovilla pakkasilla, matalissa rakennuksissa, joissa yhtenäisen lämmöneristekerroksen paksuus on yli 300 mm. (Vinha et al. 2013) Tässä tutkimuksessa tarkastellaan ulkoseinärakenteita, joiden lämmöneristekerroksen paksuus on 150-200 mm. Sisäisen konvektion vaikutus jää näin ollen vähäiseksi, eikä sitä tulla laskennallisissa tarkasteluissa huomioimaan.

### 2.2.3 Lämpösäteily

Kaikki kappaleet, joiden lämpötila on absoluuttisen nollapisteen yläpuolella luovuttavat ympäristöönsä energiaa emittoimalla sähkömagneettista säteilyä, joka on energian aaltoliikemäistä siirtymistä kaiken täyttävässä sähkömagneettisessa kentässä. Säteily etenee valonnopeudella eikä se vaadi siirtyäkseen väliainetta. (Serth et al. 2014) Sähkömagneettinen spektri kattaa säteilyn kaikki aallonpituudet, jotka voidaan jakaa erilaisiin



aallonpituusalueisiin. Lämpösäteilyn aallonpituus vaihtelee välillä 0,1 – 10000  $\mu\text{m}$ , sisältäen ultraviolettisäteilyn, näkyvän valon ja infrapunasäteilyn. (Hens 2012) Kappaleen emittoimaan säteilytehoon vaikuttaa kappaleen lämpötila ja pinnan tummuus. Lämpötilan noustessa säteilyn intensiteetti kasvaa ja aallonpituus lyhenee. (Young et al. 2016) Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa lämpösäteily jaetaan lyhytaaltoiseen auringosta peräisin olevaan säteilyyn ja pitkäaaltoiseen kappaleiden väliseen säteilyyn (Pinterić 2017).

Ideaalikappaletta, joka absorboi kaiken siihen kohdistuvan säteilytehon kutsutaan mustaksi kappaleeksi. Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa Aurinko voidaan mallintaa mustana kappaleena, sillä se absorboi kaiken siihen kohdistetun säteilyn ja emittoi vastaavan energiamäärän verran säteilyä säilyttääkseen termisen tasapainotilansa (Young et al. 2016). Mustan kappaleen emittoima kokonaissäteilyteho  $E_b$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) pinta-alaa kohden on suoraan verrannollinen lämpötilan neljänteen potenssiin. Kokonaissäteilyteho voidaan laskea Planckin laista johdetulla Stefan-Bolzmännin lailla seuraavasti:

$$E_b = \sigma T^4 \quad (2.13)$$

missä

- $\sigma$  on Stefan-Bolzmännin vakio:  $5,670 \times 10^{-8}$  ( $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ )
- $T$  on säteilyä emittoivan kappaleen pinnan lämpötila (K)

Todellisuudessa kaikki kappaleet rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa aurinkoa lukuun ottamatta ovat harmaita kappaleita, joista säteilyn oletetaan siirtyvän tasaisesti kaikkiin suuntiin diffuusina eli pinnasta heijastuneena säteilyinä. Harmaaseen kappaleeseen kohdistuvasta säteilystä osa absorboituu, osa heijastuu takaisin ja osa läpäisee kappaleen materiaalista ja säteilyn aallonpituudesta riippuen. Termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön mukaan energiaa ei voi luoda eikä hävittää, joten kappaleeseen kohdistuva säteily voidaan jakaa seuraaviin komponentteihin, joiden summa on yksi. (Hens 2012)

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (2.14)$$

missä

- $\rho$  on heijastuskerroin
- $\alpha$  on absorptiokerroin
- $\tau$  on läpäisykerroin

Harmaiden kappaleiden ominaisuus on, että ne emittoivat vähemmän säteilyä, kuin ideaali musta kappale. Emissiviteetti  $\varepsilon$  on suhdeluku 0-1 välillä, joka kuvaa todellisen eli harmaan kappaleen emittoimaa säteilytehoa  $E$  mustan kappaleen säteilytehoon  $E_b$ , kun kappaleiden lämpötila on sama (Pinterić 2017):

$$\varepsilon = \frac{E(T)}{E_b(T)} \quad (2.15)$$

Tarkasteltaessa samassa lämpötilassa olevien harmaiden kappaleiden välistä pitkäaaltoista lämpösäteilyä, jossa tarkasteltavat kappaleet eivät läpäise lainkaan säteilyä  $\tau = 0$ , voidaan Kirchoffin lain mukaan kappaleiden emissiviteetin  $\varepsilon$  olevan yhtä suuri kuin absorptiokerroin  $\alpha$ .

$$\varepsilon = \alpha \quad (2.16)$$

Kappaleen pinnan ja ympäristön välillä säteilemällä siirtyvä lämpövirran tiheys  $q_r$  ( $W/m^2$ ) voidaan Kirchoffin lain pohjalta laskea kaavalla:

$$q_r = h_r(T_s - T_0) \quad (2.17)$$

missä

- $h_r$  on tarkasteltavan pinnan säteilyn lämmönsiirtokerroin ( $W/(m^2 \cdot K)$ )
- $T_s$  on pinnan lämpötila (K)
- $T_0$  on ympäristön lämpötila (K)

Säteilyn lämmönsiirtokerroin  $h_r$  voidaan laskea kaavalla:

$$h_r = 4\sigma\varepsilon T^3 \quad (2.18)$$

missä

- $\varepsilon$  on tarkasteltavan pinnan emissiviteetti (-)
- $T$  on tarkasteltavan pinnan lämpötila (K)

Tarkasteltaessa kahden pinnan välillä tapahtuvaa lämpösäteilyä tulee kaavan (2.18) emissiviteetin laskennassa ottaa huomioon näkyvyyskerroin  $F$ , joka huomioi pintojen geometrian ja sijoittumisen toisiinsa nähden. Näkyvyyskerroin määrittelee, kuinka paljon toiselta pinnalta emittoituvasta lämpösäteilystä kohdistuu toiseen pintaan. Näkyvyyskerroimen arvot vaihtelevat välillä 0 - 1 (Pinterić 2017). Tapauksissa, joissa pinnat eivät ole

keskenään yhdensuuntaisia näkyvyyskerroin voidaan määrittää yksinkertaisissa tapauksissa analyttisesti laskemalla, mutta monimutkaisemmissa tapauksissa tulee käyttää numeerisia ratkaisumenetelmiä kertoimen selvittämiseksi (Hens 2012). Usein rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa määritetään esimerkiksi ilmaraossa siirtyvää lämpösäteilyä kahden samansuuntaisen pinnan välillä, jolloin näkyvyyskerroimen arvo on yksi eli kaikki lämpösäteily toiselta pinnalta kohdistuu myös toiseen pintaan (Pinterić 2017).

Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa huomioitava lämpösäteily voidaan jakaa lyhytaaltoiseen ja pitkäaaltoiseen säteilyyn. Lyhytaaltainen säteily voidaan edelleen jakaa suoraan auringosta peräisin olevaan säteilyyn, sekä ilmassa olevien ainehiukkasten, kuten esimerkiksi pilvien tai maassa olevien rakennusten kautta heijastuneeseen eli diffuusiin säteilyyn. Muiden kappaleiden kuin auringon emittoima lämpösäteily on pitkäaaltoista, joka syntyy, kun auringon lyhytaaltainen säteily (suora tai diffuusi) absorboituu kappaleeseen, josta säteily emittoituu edelleen pitkäaaltoisena. (Siikanen 1996)

### 2.3 Rakenteiden ja rakennekerrosten lämmöneristävyys

Rakenteiden ja rakennekerrosten lämmöneristävyden mittaamiseen käytetään tavallisesti lämmönvastuksen arvoa  $R$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ), joka ilmoittaa rakenteen eri puolilla olevien isotermisten pintojen välisen lämpötilaeron ja ainekerroksen läpi kulkevan lämpövirran tiheyden suhteen. Lämmönvastuksen arvo saadaan määriteltä tarkasteltavan rakenteen paksuuden ja lämmönjohtavuuden suhteena (Pinterić 2017):

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (2.19)$$

Rakenteiden ja rakennekerroksen lämmönvastuksen suunnittelu-arvo lasketaan kaavan (2.19) mukaisesti, mutta lämmönjohtavuuden arvo tulee korvata lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvolla.

Lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvolla pyritään huomioimaan suunnittelun mukaisten olosuhteiden poikkeaminen niistä olosuhteista, joissa ilmoitetut lämmönjohtavuuden arvot ovat mitattu. Ilmoitettujen lämmönjohtavuuksien muuntaminen suunnittelu-arvoiksi tapahtuu kansainvälisessä standardissa SFS-EN ISO 10456 (2010) esitettyjen menetelmien ja tietojen pohjalta.

Rakennuksen vaipan lämpöhäviöiden laskennassa rakennuksen energiatehokkuutta kuvaavan E-luvun määrittämiseksi käytetään lämmönvastuksen suunnittelu-arvon sijaan lämmönläpäisykerroimen arvoa  $U$  ( $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ), joka on rakenteen kokonaislämmönvastuksen käänteisarvo (A 24.12.2017/782).

Lämmönläpäisykerroin tunnetaan myös U-arvona ja vanhemmassa kirjallisuudessa k-arvona. Rakenteen lämmönläpäisykerroin voidaan laskea kaavalla 2.20 standardin SFS-EN ISO 6946 (2017) mukaisesti:

$$U = \frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_{si} + R_1 + \dots + R_n R_{se}} \quad (2.20)$$

missä

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

$R_{si}$  on sisäpinnan pintavastus ( $m^2 \cdot K/W$ )

$R_{1..n}$  ovat rakenneosien 1...n lämmönvastukset ( $m^2 \cdot K/W$ )

$R_{se}$  on ulkopinnan pintavastus ( $m^2 \cdot K/W$ )

Pintavastuksilla huomioidaan rakennusosan pinnan ja sisä- tai ulkopuolisen ympäristön välisen rajakerroksen lämmönvastus. Pintavastuksien arvot vaihtelevat lämpövirran suunnan sekä sisä- ja ulkopuolisen ympäristön välillä, arvoihin vaikuttavat tuulennopeus ja lämpötila. Ulkoseinärakenteessa sisäpuolen pintavastus on  $0,13 m^2 \cdot K/W$  ja ulkopuolen  $0,04 m^2 \cdot K/W$ . (Pinterić 2017)

Lämmönläpäisykerroimen laskemisessa tulee ottaa huomioon rakennuksen vaipassa mahdollisesti esiintyvät kylmäsilat, jotka heikentävät rakenteen lämmöneristävyttä. Korjattu lämmönläpäisykerroin  $U_c$  ( $W/(m^2 \cdot K)$ ) voidaan laskea seuraavasti:

$$U_c = U + \Delta U \quad (2.21)$$

missä

$\Delta U$  on lämmönläpäisykerroimen korjaustermi ( $W/(m^2 \cdot K)$ )

Kylmäsilat rakenteen läpi ovat tavallisesti rakenteen pinnan suunnassa joko pistemäisiä tai viivamaisia kohtia, joissa lämmön siirtyminen rakenteen läpi on huomattavasti suurempaa kuin ympäröivässä rakenteessa (Björkholtz 1997). Tässä tutkimuksessa tarkasteltavan tiili-villa-tiili –ulkoseinärakenteen lämmöneristeiden kiinnikkeiden ja muuraussteiden kylmäsilta vaikutukseksi oletetaan  $0,016 W/(m^2 \cdot K)$  RT 82-11006 –ohjeen (2010) mukaisesti.

## 2.4 Kosteuslähteet ja rasitukset

Rakenteisiin kohdistuu nestemäisen veden ja vesihöyryn siirtymisen seurauksena kosteusrasituksia erilaisista kosteuslähteistä. Kosteusrasitukset on osattava huomioida jo

suunnitteluvaiheessa rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toimivuuden, sekä rakennuksen turvallisen ja terveellisen käytön takaamiseksi. Kosteuslähteet voidaan jakaa rakennuksen sisäpuolisiin ja ulkopuolisiin kosteuslähteisiin.

Sisäpuoliset kosteuslähteet ovat useimmiten seurausta ihmisen toiminnasta, kuten siivoamisesta, peseytymisestä tai pyykkien kuivaamisesta. Sisäpuolinen kosteuslähde voi myös olla vesi-, viemäri-, tai lämmitysputken hajoamisesta aiheutuva hallitsematon ja yllättävä putkivuoto (Siikanen 1996). Rakennekosteus voidaan laskea kuuluvaksi myös sisäpuolisiin kosteuslähteisiin. Rakennekosteudella tarkoitetaan rakennusmateriaalin valmistusprosessissa materiaaliin sitoutuvaa vesimäärää, jonka on päästävä poistumaan materiaalista valmistumisen jälkeen, jotta materiaali voi saavuttaa kosteustasapainon ympäristön kanssa. (Björkholtz 1997) Esimerkiksi betonilattian valamisen jälkeen ylimääräinen kosteus haihtuu vesihöyryinä huoneilmaan aiheuttaen sisäilmaan merkittävän kosteuslisän valun jälkeisinä päivinä.

Ulkopuolisista kosteuslähteistä näkyvimmän osuuden muodostaa sade, joka voi esiintyä vetenä räntänä tai lumena. Sade voidaan jakaa pystysateeseen ja tuulen aiheuttamaan viistosateeseen. Pystysade on Suomessa yleisempi ja se kastelee lähinnä vaakasuoria pintoja sekä räystäätömissä taloissa myös seinäpintoja. Vesikatolle kohdistuvan pystysaderasituksen jälkeen viistosateen pystyrakenteita kastelevaa vaikutusta voidaan pitää merkittävimpänä rakennuksen vaippaan kohdistuvana rasitustekijänä ja mahdollisten kosteusvaurioiden aiheuttajana. Viistosade asettaakin lisävaatimuksia esimerkiksi ovi- ja ikkunaliitoksien suunnittelulle ja toteutukselle. Ulkoseinien alaosissa ja seinän vierustäytöissä tulee huomioida mahdollinen pinta- ja roiskeveden aiheuttama rasitus seinän alaosiin. (Siikanen 1996)

Viistosateen määrä vaihtelee voimakkaasti vuodenaikojen mukaan. Vuositasolla viistosateen osuus on n. 20-30% pystysateesta, eli 100-200 mm/m<sup>2</sup>, ja tästä määrästä noin puolet kohdistuu ulkoseinärakenteille syksyisin. Paikkakuntakohtaiset erot ovat suuria. Viistosateen rasitus on suurempaa saaristoissa ja rannikoilla sisämaahan verrattuna. Lisäksi rakennusta ympäröivä mikroilmasto ja ilmansuunnat vaikuttavat voimakkaasti tuuliolosuhteisiin ja sitä kautta edelleen viistosademääriin. Voimakkain viistosaderasitus kohdistuu etelän- ja lounaanpuoleisille seinille. Seinän korkeuden kasvaessa, myös viistosaderasitus lisääntyy. Räystäiden suojaava vaikutus viistosateelta on merkittävä. (Björkholtz 1997) Tarkasteltaessa koetalon etelänpuoleiseen seinään kohdistuvan viistosateen määrää, havaittiin viistosateen kastelevan eniten seinien yläosia ja nurkka-alueita, 50-80% osuudella pystysateesta. Keskimääräinen viistosaderasitus ulkoseinälle oli

10-50% pystysateesta. (Nieminen 1988) Ulkoseinän viistosaderasituksen määrittämiseksi tarkoitettuja laskentakaavoja on esitetty kootusti esimerkiksi FRAME-tutkimusprojektin loppuraportissa (Vinha et al. 2013, s. 72-80).

Ulkopuoliseksi kosteuslähteeksi lasketaan myös maaperän kosteus, joka aiheuttaa kosteusrasituksia maanvastaisille rakenteille, kuten kellaritiloille, alapohjille ja perusmuureille. Maanvastaisia rakenteita rasittaa maaperän huokosilman sisältämä vesihöyry, sekä ainakin ajoittain myös vapaa vesi eli vajovesi, kapillaarivesi tai pohjavesi. Tilanteissa, joissa rakenteita on sijoitettu pohjaveden pinnan alapuolelle, tulee suunnittelussa huomioida myös veden hydrostaattinen paine. (RIL 255-1-2014)

Rakenteiden kosteusteknisessä suunnittelussa tulee huomioida rakenteita rasittavat edellä mainitut kosteuslähteet. Rakennerratkaisuilla tulee pyrkiä estämään mahdollisimman hyvin kosteuden pääsy rakenteisiin ja sisätiloihin. Lisäksi tilanteissa, joissa rakenteisiin voi päästä kosteutta, tulee ottaa huomioon rakenteen mahdollisuus riittävän nopeaan kuivumiseen ennen kuin rakenteen turmeltuminen käynnistyy. Kosteusteknisissä suunnitteluratkaisuissa tulee huomioida rakenteiden toiminta tavanomaisissa käyttöoloissa ympäri vuoden sekä mahdollisten poikkeuksellisten rasitusten tai olojen vaikutuksessa. (RIL 255-1-2014)

## 2.5 Kosteus materiaalissa ja hygroskooppisuus

Suurin osa rakennusmateriaaleista, kuten lämmöneristeet, puu, betoni, tiili ja kipsi ovat huokoisia eli ne sisältävät kosteutta ja lisäksi ne voivat imeä kosteutta ja luovuttaa sitä ympäristöönsä. Kosteus siirtyy myös materiaalin sisällä. Rakentamisessa käytetään myös ei-huokoisia materiaaleja ja näitä ovat esimerkiksi lasi ja teräs. (Pinterić 2017)

Materiaalissa vesihöyrynä tai vetenä oleva kosteusmäärä ilmoitetaan yleensä kosteuden massan ja materiaalin kuivanpainon välisenä suhdelukuna  $u$  (Pinterić 2017):

$$u = \frac{m_w}{m_d} \quad (2.22)$$

missä

$m_w$  on materiaalin sisältämän veden massa (kg)

$m_d$  on materiaalin kuivapaino (kg)

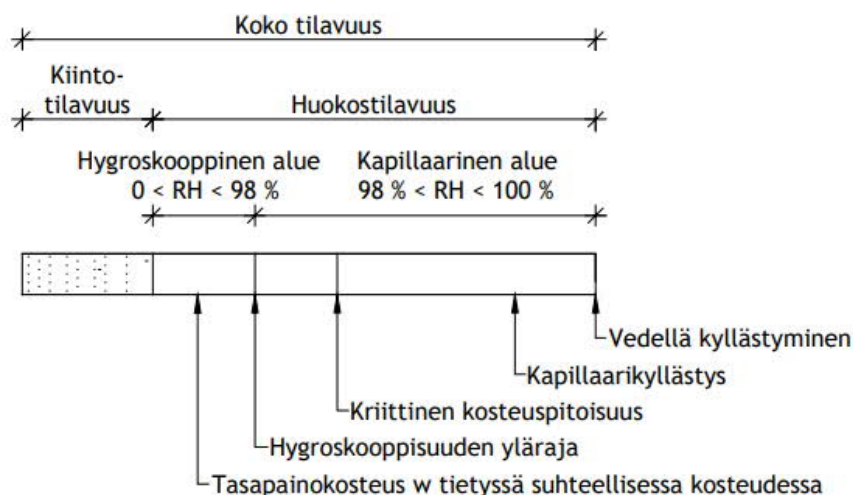
Toinen yleinen tapa esittää materiaalin kosteuspitoisuus on laskea materiaalin konsentroituneen veden massa tilavuutta kohden  $w$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) (Pinterić 2017):

$$w = \frac{m_w}{V} \quad (2.23)$$

missä

$V$  on materiaalin tilavuus ( $\text{m}^3$ )

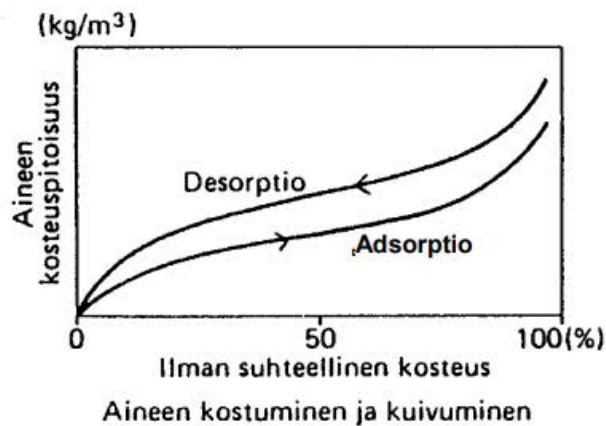
Huokoisen materiaalin kykyä sitoa kosteutta itseensä ympäröivästä ilmasta, sekä luovuttaa kosteutta ympäröivään ilmaan kutsutaan hygroskooppisuudeksi. Materiaalikappaleen kokonaistilavuus voidaan jakaa kiintotilavuuteen ja huokostilavuuteen kuvan 2.2. mukaisesti. Huokostilavuus jakaantuu edelleen hygroskooppiseen alueeseen ja kapillaariseen alueeseen. Hygroskooppisen alueen ylärajana pidetään useilla materiaaleilla 98 % kosteuspitoisuutta, jonka materiaali voi saavuttaa oltuaan riittävän kauan olosuhteissa, jossa ilman suhteellinen kosteus on 100 %. Kapillaariselle alueelle siirryttäessä edellytyksenä on materiaalin ja nestemäisen veden välinen kontakti. Kapillaarisella alueella materiaali saavuttaa kriittisen kosteuspitoisuuden, jolloin materiaalin huokostilavuuteen on muodostunut yhtenäinen kapillaariverkosto ja kosteuden siirtyminen tapahtuu lähes kokonaan nestemäisenä vetenä. Kapillaarikyllästys on normaaliolosuhteissa suurin kosteuspitoisuus, jonka materiaali voi saavuttaa. Kapillaarikyllästystä korkeampi kosteuspitoisuus edellyttää ulkopuolisen vedenpaineen tai tyhjiökäsittelyn. (Björkholtz 1997)



**Kuva 2.2.** Huokoisen materiaalin kostuminen hygroskooppisuuden ja kapillaarisuuden vaikutuksesta. (Björkholtz 1997)

Materiaalin huokosissa olevan ilman suhteellinen kosteus pyrkii tasoittumaan ympäristössä vallitsevan suhteellisen kosteuden kanssa samaan arvoon eli saavuttamaan tasapainokosteuden. Tasapainokosteus on materiaalista riippuva ominaisuus, jonka lisäksi

siihen vaikuttavat ympäristön suhteellinen kosteus ja lämpötila, sekä se onko kyseessä materiaalin kostuminen (adsorptio) vai kuivuminen (desorptio). Kuvassa 2.3 on esitetty esimerkki sorptio- eli tasapainokosteuskäyrästä. Materiaali saavuttaa hitaammin tasapainokosteuden ympäristönsä kanssa, kun kyseessä on kuivuminen verrattuna materiaalin kostumiseen. Tämä ero voidaan havaita adsorptio ja desorptiokäyrien välisenä kuiluna, jota kutsutaan hystereesiksi. (Pinterić 2017)



**Kuva 2.3.** Esimerkki tasapainokosteuskäyrästä. (Björkholtz 1997)

Materiaalin adsorptio eli kostuminen voidaan jakaa kolmeen erilaiseen kosteuden sitoutumistasoon, joihin vaikuttaa ilman suhteellinen kosteus. Monomolekylaarisesta adsorptiosta tapahtuu alhaisilla ilman suhteellisen kosteuden arvoilla. Monomolekylaarisessa adsorptiossa vesimolekyylit kiinnittyvät pintavoimien seurauksena huokosseinämien pinnoille muodostaen toisistaan irrallaan olevan kerroksen. Ilman suhteellisen kosteuden noustessa adsorption sitoutumistaso muuttuu polymolekylaariseksi, jolloin useat vesimolekyylit alkavat kiinnittyä ja linkittyä muihin vesimolekyyliin muodostaen kerroksia huokosseinämien pinnoille. Kolmas kosteuden sitoutumistaso on kapillaarikondenssi, jolloin ilman suhteellisen kosteuden tulee olla niin suuri, että kaareva vesipinta pääsee muodostumaan kohtaan, jossa kaksi erisuuntaista huokosseinämää liittyvät toisiinsa jyrkässä kulmassa. Tämän jälkeen kosteus alkaa siirtyä huokosissa kapillaarisesti huokosalipaineen vaikutuksesta. Kapillaarikondenssin alkaminen voidaan havaita materiaalin tasapainokosteuskäyränä kulmakertoimen kasvamisena. (kuva 2.3) (Vinha 2007, Pinterić 2017)

Mitä suurempi materiaalin hygroskooppisuus on, sitä suurempi on myös kosteuskapasiteetti. Kosteuskapasiteetilla tarkoitetaan materiaalin kykyä sitoa ja luovuttaa kosteutta, joko hygroskooppisesti ilmasta tai kapillaarisesti vapaasta vedestä pinnasta. (Siikanen



1996). Materiaalin kosteuskapasiteettiin vaikuttavat huokosverkoston ominaisuudet, kuten huokosten koko ja rakenne. Tiili voi esimerkiksi sitoa itseensä kosteutta noin  $30 \text{ kg/m}^3$ , kun vastaava luku puulla on  $150 \text{ kg/m}^3$ . (Nevander & Elmarsson 1994)

Lämmöneristemateriaalit voidaan kosteuskapasiteetin perusteella jakaa kolmeen ryhmään: ei-hygroskooppisiin, hygroskooppisiin ja voimakkaasti hygroskooppisiin materiaaleihin. Voimakkaasti hygroskooppisilla lämmöneristeillä kuten sahanpurulla ja selluvillalla on suuren kosteuskapasiteetin ansiosta kyky tasata kosteuden liikkeitä rakenteissa ja näin ollen vähentää riskiä kosteuden kondensoitumiselle. Hygroskooppisen lämmöneristemateriaalien sisältämä kosteus lisää kuitenkin materiaalin lämmönjohtavuutta heikentäen rakenteen lämmöneristyskykyä. (Vinha 2007)

## 2.6 Kosteuden siirtyminen

Kosteuden siirtyminen on mahdollista useammalla erilaisella mekanismilla ja usein myös samanaikaisesti (Björkholtz 1997). Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa vesihöyryn siirtyminen voi tapahtua kahdella tapaa. Ensimmäisessä tapauksessa vesihöyry siirtyy ilman mukana kuljettumalla eli konvektiolla. Toinen vesihöyryn siirtymismuoto on diffuusio, jossa kosteus kulkeutuu vesihöyryn osapaine-erojen seurauksena suuremmasta paineesta kohti pienempää. Veden siirtyminen nesteinä voi tapahtua kapillaarisesti huokoisissa materiaaleissa, painovoiman seurauksena tai ulkoisen voiman seurauksena. (Hens 2012) Tässä kappaleessa tullaan käsittelemään tutkimuksen kannalta oleellinen teoria vesihöyryn siirtymisestä konvektiolla ja diffuusiolla sekä nestemäisen veden siirtymisestä kapillaarisesti.

### 2.6.1 Vesihöyryn konvektio

Ilma kuljettaa mukanaan lämmön lisäksi myös vesihöyryä. Tarkasteltaessa vesihöyryn siirtymistä ilmavirtauksisen mukana puhutaan vesihöyryn konvektiosta. Ilmavirtauksien muodostumiseen vaaditaan tiheyseroja, joiden syntymiseen vaikuttavia tekijöitä on selitetty tarkemmin luvussa 2.1. Konvektion mukana siirtynyt kosteusvirran tiheys  $g$  ( $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ) voidaan laskea, kun tiedetään siirtynyt ilmamäärä ja vesihöyrypitoisuuksien ero tarkastelupisteiden välillä:

$$g = r_a \Delta v \tag{2.24}$$

missä

$r_a$  on ilmavirran tiheys ( $\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ )

$\Delta v$  on vesihöyrypitoisuuksien ero tarkastelupisteiden välillä ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

Vesihöyryn siirtyminen konvektiolla on analoginen konvektiolla siirtyvän lämmön kanssa. Molemmissa tapauksissa väliaineena toimii ilma, joka kuljettaa lämpöä ja kosteutta. (Pinterić 2017) Ilmavirran tiheyden laskemiseksi erilaisissa tilanteissa on esitetty kaavoja kappaleessa 2.1, joiden pohjalta on mahdollista laskea edelleen siirtyneen kosteusvirran tiheys. Raon tai reiän kautta siirtyvän kosteusvirran tiheyden laskennassa on huomioitava mahdollinen vesihöyryn kondensoituminen rakenteeseen tilanteessa, jossa lämpötila laskee siirryttäessä kohti matalampaa vesihöyrypitoisuutta.

Rakennusvaipan kosteusteknisen toiminnan kannalta konvektiolla siirtyvän vesihöyryn merkitys on suuri. Vesihöyryn konvektio voidaan jakaa kahteen vastakkaiseen tarkastelutilanteeseen, sen mukaan kuinka ilma liikkuu rakennusvaipan sisä- ja ulkopinnan välillä. Ilman virratessa ulkoa sisäänpäin ilman lämpötila tila kohoaa ja sen kyky sitoa vesihöyryä kasvaa. Tällä on rakenteita kuivattava vaikutus. Päinvastaisessa tilanteessa ilman virratessa sisältä ulospäin ilma jäähtyy, jolloin sen kyky sitoa vesihöyryä vähenee. Tästä voi seurata vesihöyryn kondensoitumista rakenteiden rajapinnoille. (Björkholtz 1997)

Konvektion kondenssia eli konvektion mukana siirtyvän vesihöyryn tiivistymistä neste-mäiseksi vedeksi voi tapahtua tilanteessa, jossa tiivistymiskohdan lämpötila on alhaisempi kuin ohi virtaavan ilman kastepistelämpötila (Björkholtz 1997). Riskiä haitallisen konvektion kondenssin syntymiselle lisäävät rakennuksen sisäilman voimakas ylipaineisuus ulkoilmaan nähden, yhdistettynä rakennusvaipassa oleviin ilmavuotoreitteihin. Ilmavuotoreittejä pitkin kostea sisäilma pääsee kulkeutumaan rakenteisiin ja mahdollisesti tiivistymään esimerkiksi tuulensuojalevyn sisäpintaan, lämmöneristeen kylmälle puolelle. Lisäksi kondenssia voi aiheuttaa kylmän rakenteen ulottuminen lämpimään sisäilmaan, jolloin kyseessä on kylmäsilan aiheuttama kondenssi. (Siikanen 1996)

Kondensoitumisen seurauksena vapautuu lämpöenergiaa, kun vesihöyry tiivistyy vedeksi eli muuttaa olomuotoaan lämpötilan pysyessä muuttumattomana. Tätä aineen olomuodon eli faasin muuttumisen seurauksena vapautuvaa lämpöenergiaa kutsutaan latenttilämmöksi. Latenttilämmön aiheuttama lämpövirran tiheys  $q_{lat}$  (W/m<sup>2</sup>) voidaan laskea seuraavalla kaavalla (Young et al. 2016, Pinterić 2017):

$$q_{lat} = h_v g \quad (2.25)$$

missä

$h_v$  on veden höyrystymislämpö  $2500 \cdot 10^3$  (J/kg), kun  $T = 0$  °C

$g$  on kosteusvirran tiheys (kg/(m<sup>2</sup>·s))

Latenttilämmön seurauksena tarkasteltavan pinnan lämpötila voi nousta, jolloin kondensoituvan vesihöyryn määrä pienenee (Hagentoft 2001).

## 2.6.2 Vesihöyryn diffuusio

Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa diffuusiolla tarkoitetaan yleisimmin vesihöyryn diffuusiota, jossa kahden eri tilan esimerkiksi sisä- ja ulkoilman välillä oleva ero ilman vesihöyrypitoisuudessa tai vesihöyryn osapaineessa pyrkii tasaantumaan rakennusvaipan läpi. Diffuusion suunta on korkeammasta osapaineesta kohti matalampaa. Useissa tapauksissa diffuusion suunta on lämpimästä tilasta kohti kylmempää tilaa eli sisäilmasta ulkoilmaan rakenteiden läpi. Tärkein diffuusion suunnan määräävä tekijä on kuitenkin vesihöyryn osapaineiden väliset suhteet, joten diffuusio on mahdollinen myös kylmemmästä tilasta lämpimämpään, jos kylmän tilan vesihöyryn osapaine on suurempi kuin lämpimän tilan. Tämänkaltaisen tilanne on mahdollinen esimerkiksi maanvastaisen betonilaatan läpi, jossa on heikko lämmöneristävyys. (Pinterić 2017, Siikanen 1996)

Homogeenisessa ainekerroksessa diffuusiolla siirtyvä kosteusvirran tiheys  $g$  (kg/(m<sup>2</sup>·s)) voidaan laskea Fickin ensimmäisen lain avulla (Pinterić 2017):

$$g = - \left( \delta_v \frac{\partial v}{\partial x}, \delta_v \frac{\partial v}{\partial y}, \delta_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\delta_v \nabla v \quad (2.26)$$

missä

$\delta_v$	on materiaalin vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuden avulla esitettyinä (m <sup>2</sup> /s)
$v$	on vesihöyrypitoisuus (kg/m <sup>3</sup> )
$x, y, z$	ovat kosteusvirran suuntakoordinaatit (m)

Edellä oleva kaava voidaan esittää myös vesihöyryn osapaineiden avulla:

$$g = - \left( \delta_p \frac{\partial p_v}{\partial x}, \delta_p \frac{\partial p_v}{\partial y}, \delta_p \frac{\partial p_v}{\partial z} \right) = -\delta_p \nabla p_v \quad (2.27)$$

missä

$\delta_p$	on materiaalin vesihöyrynläpäisevyys vesihöyryn osapaine-eron avulla esitettyinä (kg/m·s·Pa)
$p_v$	on vesihöyryn osapaine (Pa)

Vesihöyrypitoisuuden ja vesihöyryn osapaineen välillä on suhde, joka voidaan laskea ideaalikaasun tilanyhtälön kaavalla (Björkholtz 1997):

$$v = \frac{p}{461,4T} \quad (2.28)$$

missä

$T$  on ilman lämpötila (K)

Jatkossa tässä tutkimuksessa tullaan vesihöyryn diffuusiosta puhuttaessa käyttämään vesihöyrypitoisuuseron avulla laskettuja vesihöyrynläpäisevyysarvoja  $\delta_v$ .

Ilman vesihöyrynläpäisevyys  $D_a$  (m<sup>2</sup>/s) on riippuvainen lämpötilasta ja ilmanpaineesta. Ilman vesihöyrynläpäisevyyden laskemiseksi on kirjallisuudessa esitetty useita eri laskentakaavoja. Hens (2012) ja Pinterić (2017) määrittelevät seisovan ilman vesihöyrynläpäisevyyden lämpötilan ja ilmanpaineen funktiona Schirmerin yhtälönä seuraavasti:

$$D_a = 2,31 \times 10^{-5} \frac{p_{atm}}{p} \left( \frac{T}{273,15} \right)^{1,81} \quad (2.29)$$

missä

$p_{atm}$  on ilmakehän normaali ilmanpaine (Pa)

$p$  on ilmanpaine (Pa)

$T$  on ilman lämpötila (K)

Huokoisissa materiaaleissa vesihöyrynläpäisevyys on alhaisempi kuin seisovan ilman tapauksessa. Diffuusiovastuskerroin  $\mu$  (-) on materiaaliominaisuus, joka ilmoittaa kuinka monta kertaa pienempi materiaalin vesihöyrynläpäisevyys, kuin vastaavassa lämpötilassa ja ilmanpaineessa olevan seisovan ilman vesihöyrynläpäisevyys. (Hagentoft 2001, Hens 2012, Pinterić 2017)

$$\mu = \frac{D_a}{\delta_v} \geq 1 \quad (2.30)$$

missä

$D_a$  on ilman vesihöyrynläpäisevyys (m<sup>2</sup>/s)

$\delta_v$  on materiaalin vesihöyrynläpäisevyys (m<sup>2</sup>/s)

Materiaalin suhteellinen diffuusiovastus  $s_d$  (m) voidaan esittää diffuusiovastuskertoimen avulla, joka kuvaa kuinka paksulla seisovalla ilmakerroksella on yhtä suuri diffuusiovastus kuin tarkasteltavalla materiaalilla (Pinterić 2017). Diffuusiovastus voidaan laskea kaavalla:

$$s_d = \mu d \quad (2.31)$$

missä

$d$  on tarkasteltavan materiaalikerroksen paksuus (m)

Huokoisilla materiaaleilla vesihöyrynläpäisevyys ei ole vakio arvo, vaan se riippuu lämpötilasta ja huokosilman suhteellisesta kosteudesta. Esimerkiksi huokoisen materiaalin ollessa kapillaarisella alueella vesihöyryn siirtyminen diffuusiolla pienenee, koska vedellä täyttyneet huokokset hidastavat merkittävästi vesihöyryn siirtymistä. (Vinha 2007) Materiaalien vesihöyrynläpäisevyyksiä voidaan määrittää kokeellisesti ns. kuppikoe-menettelmällä. Kuppikoe-menettelmässä materiaalikerroksen eri puolille luodaan vesihöyrypitoisuusero ja diffuusiolla siirtynyt kosteusvirta saadaan laskettua koekupin taasaantuneesta painon muutosnopeudesta alku- ja lopputilanteen välillä. (Vinha et al. 2005)

Rakennusmateriaaleissa vesihöyrynläpäisevyyden ja materiaalikerroksen paksuuden välistä suhdetta kutsutaan vesihöyrynvastukseksi  $Z_v$  (s/m). Kerrokselliselle rakenteelle, joka koostuu useista homogeenisista materiaalikerroksista ja joille on määritetty vesihöyrynvastus, voidaan laskea diffuusiolla siirtyvä kosteusvirran tiheys  $g$  (kg/(m<sup>2</sup>·s)) seuraavasti:

$$g = \frac{v_s - v_u}{\Sigma Z_v} \quad (2.32)$$

missä

$v_s$  ja  $v_u$  ovat vesihöyrypitoisuudet sisä- ja ulkoilmassa (kg/m<sup>3</sup>)

$\Sigma Z_v$  on rakennekerrosten vesihöyrynvastuksien summa (s/m)

Rakennekerroksien läpi siirtyä vesihöyryä myös konvektion mukana, mutta diffuusiolla siirtyvään vesihöyryyn nähden konvektion osuus vesihöyryn siirtymistä on usein merkityksetön (Pinterić 2017). Poikkeuksen tähän muodostavat suuren lämmöneristepaksuuden omaavat ulkoseinät, sekä vaipparakenteet, joissa ilmatiiviys on alentunut raken-

teessa olevien rakojen ja/tai reikien aiheuttamien ilmapuotoreittien seurauksena. Ilmapuotoreittien kautta konvektiolla siirtyvän vesihöyryn määrä voi näissä tilanteissa olla moninkertainen diffuusiolla siirtyvään vesihöyryyn verrattuna. (Siikanen 1996)

Seinän sisä- ja ulkopinnat vastustavat vesihöyryn siirtymistä rakenteeseen. Näiden ylimenovastuksien merkitys koko rakenteen vesihöyrynvastuksen kannalta on kuitenkin vähäinen (Björkholtz 1997). Vesihöyrypitoisuuden suhteen ilmaistuna sisäpuolisen pinnan vesihöyrynvastuksena voidaan käyttää arvoa 360 s/m ja ulkopuolisen pinnan 60 s/m (Hagentoft 2001).

Tarkasteltavan materiaalin pinnasta ympäristöön tai ympäristöstä pintaan diffuusiolla siirtyvän kosteusvirran tiheys  $g$  (kg/(m<sup>2</sup>·s)) voidaan laskea kaavalla (Hagentoft 2001):

$$g = \beta_v \Delta v \quad (2.33)$$

missä

$\beta_v$  on pinnan kosteudensiirtokerroin (m/s)

$\Delta v$  on vesihöyrypitoisuuksien ero pinnan ja ympäristön välillä (kg/m<sup>3</sup>)

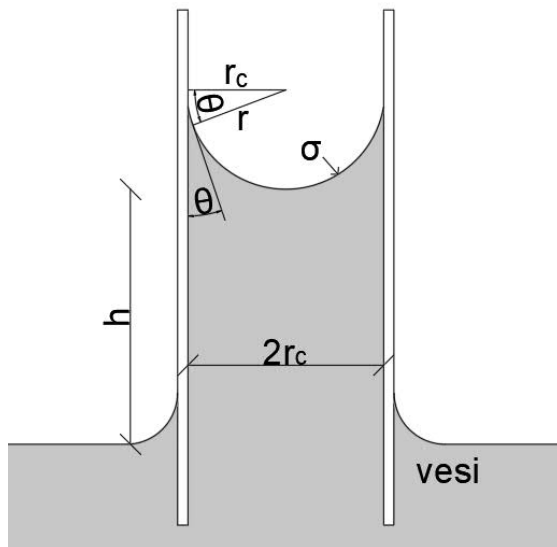
Pinnan kosteudensiirtokertoimen  $\beta_v$  arvo voidaan laskea Lewisin yhtälöllä. Kertoimeen arvoon vaikuttavat kappaleessa 2.2 käsitelty konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen arvo  $h_c$ , ilmanpaine  $\rho_a$  ja ilman ominaislämpökapasiteetti  $c_{pa}$ . Lisäksi kosteudensiirtokertoimen arvoon vaikuttaa pinnan suunta ja pintaa ympäröivät ilmavirtaukset. (Hagentoft 2001)

Diffusiovirran kondenssilla tarkoitetaan diffusiovirtauksena siirtyneen vesihöyryn tiivistymistä vedeksi. Tämä on mahdollista tilanteissa, joissa huokosilman vesihöyrypitoisuus ylittää materiaalin lämpötilaa vastaavan vesihöyryn kyllästyspitoisuuden. Rakennusvai-  
passa diffusiovirran kondenssin syntymistä pyritään ehkäisemään sijoittamalla rakennekerrokset siten, että vesihöyrynläpäisevyys kasvaa siirryttäessä lämpimältä puolelta kohti kylmempää. Ellei kondensoitumista voida täysin ehkäistä tulee rakenne suunnitella siten, että se ehtii kuivumiskaudella eli kesäisin haihduttaa enemmän kosteutta, kuin mitä tiivistymiskaudella eli talvella rakenteeseen ehtii tiivistyä. (Björkholtz 1997)

### 2.6.3 Kapillaarinen siirtyminen

Huokoisen materiaalin ominaisuutta imeä ja siirtää itseensä vettä vapaasta vedenpinnasta huokosalipaineen vaikutuksesta kutsutaan kapillaarisuudeksi (Björkholtz 1997). Materiaalin kapillaarihuokosia kuvataan pyöreän ja ohuen kapillaariputken avulla, jonka säde vastaa kapillaarihuokosten sädettä. Kapillaarisen imun saa aikaiseksi paine-ero,

joka muodostuu veden pinnan ja sen yläpuolella olevan ilman välille. Tätä paine-eroa kutsutaan huokosalipaineeksi. (Pinterić 2017) Huokosalipaineen muodostuminen kapillaariputkessa voidaan selittää veden pintaan syntyvällä pintajännityksellä. Pintajännitys on lämpötilasta riippuvainen materiaaliominaisuus, joka aiheutuu veden sisäisistä vetovoimista eli koheesiosta ja veden ja kapillaariputken välisistä vetovoimista eli adheesiosta. Koheesio- ja adheesiovoiman välinen suhde saa vedenpinnan kaareutumaan kapillaariputkessa, tätä kaareutuvaa vedenpintaa kutsutaan meniskukseksi. (Hens 2012) Kuvassa 2.4 on esitetty kapillaariputkessa huokosalipaineeseen vaikuttavat suureet.



**Kuva 2.4.** Kapillaariputkessa vaikuttaa huokosalipaine.

Kapillaarisen imun eli huokosalipaineen voimakkuuteen vaikuttavat pintajännityksen suuruus, meniskuksen ja kapillaariputken välinen kontaktikulma, sekä materiaalissa olevien huokosten koko. Suurilla huokosilla kapillaarinen imu on pienempää, mutta virtaus nopeampaa ja vastaavasti pienillä huokoisilla kapillaarinen imu on suurempaa, mutta virtaus hitaampaa. (Hens 2012) Huokosalipaineen  $s$  (Pa) suuruus voidaan laskea seuraavalla kaavalla (Hagentoft 2001):

$$s = \frac{2\sigma}{r_c} \cos(\theta) \quad (2.34)$$

missä

- $\sigma$  on pintajännitys (Pa)
- $r_c$  on kapillaariputken säde (m)
- $\theta$  on kontaktikulma meniskuksen ja putken seinämän välillä

Pintajännitys vedelle 20 °C lämpötilassa on 0,073 N/m (Hagentoft 2001). Kontaktikulma veden meniskuksen ja putken seinämän välillä on oltava alle 90 astetta, jotta kapillaarivirtaus on mahdollinen. Useilla rakennusmateriaaleilla voidaan kontaktikulman arvoksi olettaa 0 astetta. Vettä hylkivillä materiaaleilla kontaktikulman arvo vaihtelee välillä 90-180 astetta. (Pinterić 2017)

Materiaalin huokosilman suhteellisen kosteuden  $\varphi$  ja huokosalipaineen välillä on yhteys, joka voidaan laskea kaavalla 2.35 Thompsonin lain mukaisesti (Hagentoft 2001):

$$\varphi = \exp\left(\frac{sM_w}{\rho_w RT}\right) \quad (2.35)$$

missä

- $s$  on huokosalipaine (Pa)
- $M_w$  on veden moolimassa (kg/mol)
- $\rho_w$  on veden tiheys (kg/m<sup>3</sup>)
- $R$  on yleinen kaasuvakio, 8,314 (J/(mol·K))
- $T$  on huokosilman lämpötila (K)

Huokosilman suhteellisen kosteuden on yleensä oltava yli 98 %, jotta kapillaarikondenssi on mahdollinen. Pienillä huokoisilla, joiden halkaisija on 10<sup>-8</sup> m voi kapillaarikondenssi tapahtua kuitenkin jo 80 % suhteellisessa kosteudessa, kun lämpötila on 20 °C. Edelleen siirryttäessä pienempiin huokosiin kapillaarikondenssi on mahdollista yhtä pienemmillä suhteellisen kosteuden arvoilla. (Hens 2012) Todellisille materiaaleille on kuitenkin mahdoton muodostaa näin selkeää riippuvuutta, koska materiaalien huokosverkostot ovat monimutkaisia rakenteita, joissa huokosten koot vaihtelevat (Hagentoft 2001).

Huokosalipaineen vaikutuksesta vesi voi nousta korkeudelle, jossa huokosalipaine ja painovoiman aiheuttama hydrostaattinen paine ovat yhtä suuret, mutta vastakkaissuuntaiset. Tällöin materiaali on saavuttanut kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuutensa. Materiaalin kapillaarinen nousukorkeus  $h$  (m) voidaan laskea kaavalla (Pinterić 2017):

$$h = \frac{2\sigma \cos\theta}{\rho_w g r_c} \quad (2.36)$$

missä

- $g$  on putoamiskiihtyvyys 9,81 (m/s<sup>2</sup>)



Kapillaarisesti vapaasta vedenpinnasta materiaalin siirtyvä kosteusvirran tiheys  $g$  ( $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ) voidaan laskea kaavalla (Hagentoft 2001):

$$g = \frac{A_w}{2\sqrt{t}} \quad (2.37)$$

missä

$A_w$  on imeytymiskerroin ( $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$ )

$t$  on aika (s)

Veden kapillariteettikerroin eli veden imeytymiskerroin on materiaaliominaisuus, joka kuvaa kuinka nopeasti vesi nousee materiaalissa kapillaarivirtauksena, kun se on kosketuksissa vapaaseen vedenpintaan. Kapillariteettikerroin määritellään kappaleeseen imeytyneen vesimäärän ja ajan neliöjuuren suhteella. Tämä tarkoittaa, että vesikosketuksen alussa veden imeytymisnopeus materiaaliin on suurimmillaan ja hidastuu ajan kuluessa. (Vinha et al. 2005)

Veden tunkeutumissyvyys materiaalikerrokseen  $x_p$  (m) voidaan määrittää kaavalla (Hagentoft 2001):

$$x_p = B_w \sqrt{t} \quad (2.38)$$

missä

$B_w$  on veden tunkeutumiskerroin ( $\text{m}/\text{s}^{1/2}$ )

Veden tunkeutumiskerroin, kuten myös veden kapillariteettikerroin ovat kulmakertoimia, jotka kuvaavat sitoutuvan kosteuden määrää ja kapillaarista nousukorkeutta ajan neliöjuuren funktiona.

Kapillaarivirtaus voi vaikuttaa rakenteessa myös vaakasuunnassa tai ylhäältä alaspäin, jolloin painovoima ei vastusta kosteuden siirtymistä. Esimerkiksi viistosateen kastelemassa tiiliverhouksessa kosteus siirtyy kapillaarisesti muurauksen läpi, mikäli tiiliverhouksen ulkopinnassa on yhtenäinen vesikalvo eli vapaan veden pinta. (Björkholtz 1997)

Kapillaarinen kosteusvirran tiheys  $g$  ( $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ) materiaalikerroksen läpi voidaan näin ollen määrittää Darcyn lain avulla käyttäen potentiaalina huokosalipaineen eroja. (Hagentoft 2001, Hens 2012):

$$g = -k_w \frac{\partial s}{\partial x} \quad (2.39)$$

missä

$k_w$  on kosteudenjohtavuus (kg/(m·s·Pa))

$x$  on materiaalikerroksen paksuus (m)

Kosteudenjohtavuus on materiaaliominaisuus, jossa on mukana kaikki muut kosteuden siirtymismuodot paitsi vesihöyryn diffuusio. Kosteudenjohtavuuden arvojen mittaaminen on vaikeaa johtuen muun muassa veden kapillaari-imun hankalasta määrittämisestä. Tästä syystä kapillaarinen kosteusvirran tiheys päädytään usein määrittämään kosteuspitoisuserojen kautta käyttäen materiaalien kapillaarista kosteusdiffusiviteetin  $D_{w,s}$  arvoja. (Vinha et al. 2013)

Kapillaarinen kosteusvirran tiheys  $g$  (kg/(m<sup>2</sup>s)) materiaalikerroksen läpi, kun potentiaalina käytetään materiaalin kosteuspitoisuseroja (Hagentoft 2001):

$$g = -D_{w,s} \frac{\partial w}{\partial x} \quad (2.40)$$

missä

$D_{w,s}$  on materiaalin kapillaarinen kosteusdiffusiviteetti (m<sup>2</sup>/s)

$w$  on materiaalin kosteuspitoisuus (kg/m<sup>3</sup>)

Kosteusdiffusiviteetti on materiaaliominaisuus, joka kuvaa homogeenisessa materiaalissa olevien kosteuspitoisuserojen tasoittumisnopeutta. kun materiaalin siirtyvä kosteusvirran tiheys muuttuu. Mitä suurempi kosteusdiffusiviteetin arvo on, sitä nopeammin kosteuspitoisuserot tasoittuvat materiaalissa. Kosteusdiffusiviteetin arvo ottaa huomioon kaikki kosteuden siirtymismuodot. Kosteusdiffusiviteetti voidaan jakaa edelleen hygroskooppiseen ja kapillaariseen kosteusdiffusiviteettiin sen mukaan onko materiaalin kosteuspitoisuus hygroskooppisella vai kapillaarisella alueella. (Vinha et al. 2005) Kosteusdiffusiviteetti on analoginen materiaalin lämpötilaerojen tasoittumisnopeutta kuvaavan termisen diffusiviteetin kanssa.

### 3. ULKOSEINÄRAKENTEEN MATERIAALIOMINAISUUDET JA YMPÄRÖIVÄT OLOSUHTEET

#### 3.1 Materiaaliominaisuudet

Laskentatuloksien luotettavuuden kannalta on ensiarvoisen tärkeää tuntea rakennusfysikaaliset materiaaliominaisuudet tarkasteltavan rakenteen osalta. Tärkeimmät materiaaliominaisuudet, jotka laskentatarkasteluissa tulee ottaa huomioon ovat RIL 255-1:n (2014) mukaan seuraavat:

- ominaislämpökapasiteetti
- lämmönjohtavuus ja lämmönvastus
- pinnan säteilyominaisuudet
- ilmanläpäisevyys ja ilmanläpäisyvastus
- tasapainokosteus ja ominaiskosteus
- vesihöyrynläpäisevyys ja vesihöyrynvastus
- kapillaarisuusominaisuudet
- kosteudenjohtavuus ja kosteusdiffusiviteetti
- homehtumisominaisuudet

Materiaaliominaisuudet eivät ole muuttumattomia vaan niissä tapahtuu aina jonkin verran vaihtelua tuote-erien välillä, johtuen muun muassa käytettyjen raaka-aineiden vaihteluista. Materiaalivalmistajilla tuotteiden ominaisuudet vaihtelevat myös tuotekehityksen takia. Lisäksi saman materiaalinimikkeen alla olevien tuotteiden ominaisuudet vaihtelevat eri valmistajien välillä. Materiaaliominaisuudet eivät myöskään säily muuttumattomina olosuhteiden, kuten lämpötilan ja suhteellisen kosteuden muuttuessa. Tästä syystä laskennallisten tarkastelujen luotettavuutta pystytään materiaaliominaisuuksien osalta parantamaan, kun laskentaohjelmaan syötetään materiaaliominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona. (RIL 255-2014)

Tämän tutkimuksen laskennallisissa tarkasteluissa tullaan hyödyntämään FRAME-tutkimusprojektissa (2013) käytettyjä, sekä TTY:n rakennusfysiikan laboratoriossa määritettyjä materiaaliominaisuuksia muuttuvissa olosuhteissa (Vinha et al. 2005). Tarvittaessa materiaaliominaisuuksia täydennetään kirjallisuudessa esiintyvillä arvoilla tai laskentaohjelmien omilla tietokannoilla. Laskentatarkasteluissa käytetyt materiaaliominaisuudet ovat esitetty kootusti liitteessä 2.

### 3.2 Ulkoilman olosuhteet

Rakennuksen vaipparakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan vaikuttaa hyvin merkittävästi altistus ulkoilman muuttuville olosuhteille. Laskennallisissa tarkasteluissa keskeistä on tarkastella ulkoilman olosuhteiden seuraavia osatekijöitä eri vuodenaikoina ja vuorokaudenaikoina. (RIL 255-2014):

- lämpötila
- suhteellinen kosteus
- tuuli (tuulen suunta ja nopeus)
- sademäärä / viistosateen osuus
- auringonsäteily (suora ja heijastunut säteily, pilvisyys)
- lämpösäteily taivaalle (taivaan tehollinen lämpötila, pilvisyys)

Edellä mainittujen osatekijöiden arvoihin vaikuttavat rakennuksen maantieteellinen sijoittuminen ja julkisivun ilmansuunta. Samalla alueella ja samaan ilmansuuntaan sijoittuvat rakenteet altistuvat kuitenkin erilaisille olosuhteille johtuen paikallisesti vaikuttavasta mikroilmastosta. Mikroilmastolla tarkoitetaan ympäröivien rakennusten, kasvillisuuden, muiden mahdollisten kappaleiden sekä maastonmuotojen vaikutusta tarkasteltavaa rakennetta ympäröivään ilmastoon. Rakennuksen ympärille muodostuvan mikroilmaston ominaisuudet tulee tarvittaessa huomioida rakenteiden laskennallisissa tarkasteluissa. (Vinha et al. 2013)

Tampereen teknillinen yliopisto ja Ilmatieteen laitos ovat yhteistyössä tehneet tutkimusta rakennusfysikaalisten testivuosien määrittämiseksi. Vuosien 1980-2009 välillä Vantaalta, Jokioisista, Jyväskylästä ja Sodankylästä tehtyjen säähavaintojen perusteella kriittisimmiksi testivuosiksi rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta valikoituivat Jokioisen vuoden 2004 ja Vantaan vuoden 2007 ulkoilman olosuhteet. Testivuodet ovat valittu siten, että vähintään 90 % vuosista oli vähemmän kriittisiä kuin valitut testivuodet. (Vinha et al. 2013)

Tässä tutkimuksessa tarkasteltavan tiili-villa-tiili ulkoseinärakenteen kosteustekniseen toimintaan, tiilen ominaisuuksien takia, vaikuttaa voimakkaasti viistosade. Tämän seurauksena rakennusfysikaaliset tarkastelut suoritettiin Vantaan vuoden 2007 ulkoilman olosuhteissa, jossa tarkasteltava ilmansuunta on etelä voimakkaimman viistosaderäsuksen takia. Lisäksi etelänpuoleisella julkisivulla auringonsäteily lämmittää ulkover-

housta, jonka seurauksena ulkoverhoukseen sitoutuneen kosteuden siirtyminen diffuusiolla rakenteen sisäosia kohti voimistuu, lisäten seinärakenteen kosteusrasitusta. (Vinha et al. 2013)

Laskentatarkastelut ovat tässä tutkimuksessa suoritettu Vantaan 2007 ilmasto-olosuhteiden lisäksi myös ennustettuun ilmastonmuutos A2-skenaarioon perustuvilla ja Ilmatieteen laitoksen tuottamilla Vantaan 2050 ja 2100 vuosien ilmasto-olosuhteilla (Vinha et al. 2013). Ulkoilman olosuhteet ovat esitetty kootusti liitteessä 1. Ilmatieteen laitoksen arvioiden mukaan tämän vuosisadan viimeisinä vuosikymmeninä keskilämpötilan odotetaan olevan 2–6 °C korkeampi ja sademäärien kasvavan kesällä 0-20 % ja talvella jopa 10-40 % vertailukauteen 1971-2000 verrattuna (Jylhä et al. 2010). Muuttuva ilmasto lisää rakenteiden kosteuskuormaa muun muassa voimistuneen viistosaderasituksen seurauksena. Nykyilmastossa kosteusteknisesti toimiva rakenne ei välttämättä toimi enää tulevaisuuden ilmastossa.

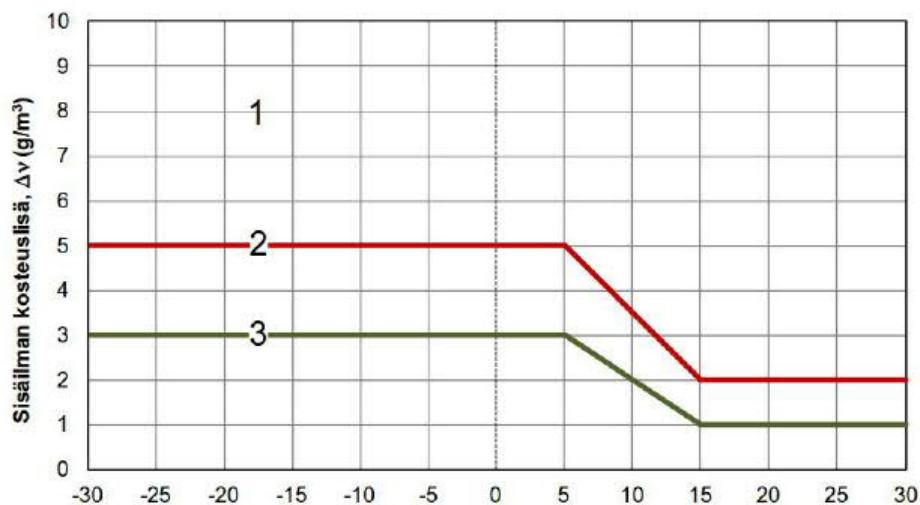
Vantaan testivuosien mittausdatat sisältää vain auringon lyhytaaltoisen säteilyn osuuden, joten pitkäaaltoinen lämpösäteily tulee huomioida ja määrittää erikseen. Ilmakehästä alaspäin suuntautuvaan pitkäaaltoiseen säteilyyn vaikuttavat ilmakehässä vallitsevat ominaisuudet, kuten pilvisuus ja ilmakehässä vallitsevien erilaisten kaasujen väliset pitoisuudet, joista vesihöyryn ja otsonin konsentraatiot voivat vaihdella pitkäaaltoisen säteilyn kannalta merkittävästi ajan ja paikan suhteen. Ilmakehästä maanpinnalle kohtisuorasti osuvaa pitkäaaltoista säteilyä voidaan halutussa pisteessä mitata meteorologien käyttämällä pyrgeometrillä. (Viúdez-Mora 2011, Philipona et al. 1995) tai laskennallisesti kirjallisuudessa esitettyjen kaavojen perusteella. Ilmakehän pitkäaaltoisen säteilyn määränä tässä tutkimuksessa tullaan hyödyntämään Jokelan diplomityössä (2018) kirjallisuuskatsauksen pohjalta määrittämiä taivaan tehollisen lämpötilan arvoja, joiden pohjalta tässä tutkimuksessa on laskettu ulkoverhoukseen kohdistuva pitkäaaltoinen netto-lämpösäteily.

### **3.3 Sisäilman olosuhteet**

Rakennusten sisäilman olosuhteita voidaan hallita lämmityksellä ja ilmanvaihdolla, sekä lämpiminä kuukausina mahdollisesti myös jäähdytyksellä. Ulkoilman olosuhteet vaikuttavat kuitenkin myös sisäilman olosuhteisiin. Esimerkiksi talvisin sisäilman suhteellinen kosteus on alhaisempi kuin kesäisin. Laskennallisissa tarkasteluissa sisäilman lämpötila voidaan usein olettaa vakioksi ja sisäilman suhteellisen kosteuden riippuvuus ulkoilmasta huomioidaan kosteuslisällä. Laskentatarkastelujen kannalta keskeisiä sisäilman

olosuhdetekijöitä ovat siis lämpötila ja sisäilman vesihöyrypitoisuus eli kosteuslisä ulkoilmaan nähden.

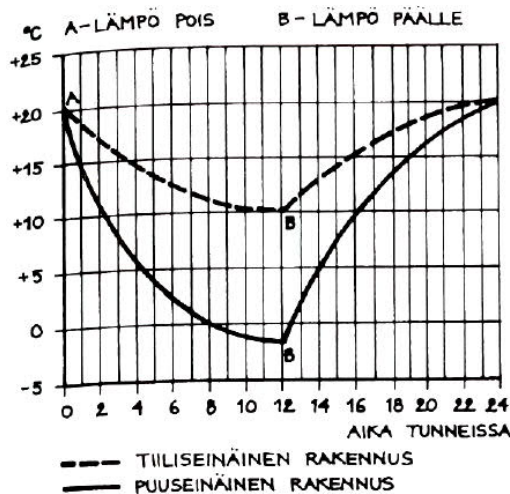
Sisäilman kosteuslisä aiheutuu rakennusten käyttöön ja asumiseen liittyvistä erilaisista toiminnoista, kuten ruonlaitosta, peseytymisestä sekä ihmisten ja kotieläinten uloshengityksestä. Sisäilman kosteuslisä pyrkii tasoittumaan diffuusiolla kohti pienempää vesihöyrypitoisuutta, eli kohti ulkoilmaa rakennusvaipan lävitse. Diffuusio on voimakkaimmillaan yleensä talvella, jolloin kylmä ulkoilma pystyy sitomaan vähemmän kosteutta, kuin kesäkuukausina. Lisäksi talviaikaan ihmiset viettävät enemmän aikaa sisätiloissa ja ikkunoita pidetään vähemmän auki kuin kesällä. Suomen olosuhteissa on suositeltu käytettäväksi kuvan 3.1 mukaisia sisäilman kosteuslisän arvoja. Mitoitusarvot huomioivat ulkolämpötilan vaikutuksen, siten että sisäilman kosteuslisä alenee, kun ulkoilman lämpötila kohoaa yli  $+5\text{ °C}$  yläpuolelle. Asuin- toimisto- ja palvelurakennuksissa sekä muissa kohteissa, joiden lämpötila on vakio eikä rakennuksen sisällä olevat toiminnot aiheuta poikkeuksellista kosteuslisää sisäilman kosteusluokaksi voidaan valita 2. (RIL 107-2012).



**Kuva 3.1.** Mitoitusarvot sisäilman kosteuslisälle eri kosteusluokissa ulkolämpötilan funktiona. (RIL 107-2012)

Sisäilman lämpötilana tullaan laskennallisten tarkastelujen yksinkertaistamiseksi käyttämään  $+21\text{ °C}$  lämpötilaa ympäri vuoden, joka vastaa Sisäilmastoluokituksen esittämää tavoitelämpötilaa kaikissa sisäilmastoluokissa (S1-S3) (Sisäilmastoluokitus 2018). Vakio lämpötilan ylläpitämisen edellytyksenä on kesäkuukausina sisäilman jäähdytysmahdollisuus (RIL 255-1-2014).

Tiilitalojen lämpökapasiteetti eli kyky sitoa lämpöenergiaa on suurempi kuin kevyempi-rakenteisilla puurunkoisilla pientaloilla. Lämpökapasiteetin merkitystä sisäilman lämpötilaolosuhteiden kannalta havainnollistaa kuva 3.2, jossa sisäilman lämpötilan muuttumisnopeutta tarkastellaan vuorokauden aikana molempien runkotyyppien osalta, kun lämmitys katkaistaan ja kytketään takaisin päälle 12 tuntia myöhemmin.



**Kuva 3.2.** Lämpökapasiteetin vaikutus sisäilman lämpötilaan. (Siikanen 1996)

Pientalojen lämpöolosuhteita eri vuodenaikoina on selvitetty kenttätutkimuksilla (Vinha et al. 2005, Vinha et al. 2009), joissa tiilitalojen keskimääräinen sisälämpötila kesäjaksoilla oli +23,3 °C ja puurunkoisilla toteutetuissa mittauksissa peräkkäisinä kesäjaksoina +24,6 °C ja +24,9 °C. Puurunkoisia pientaloja mitattaessa ulkolämpötila oli keskimääräisesti korkeampi kuin tiilitalojen mittausjaksolla. Seinärakennetyypin vaikutus sisälämpötilaan on vähäinen. Kenttätutkimuksilla on myös havaittu, että talvisin lämmityskaudella sisäilman lämpötilana +21 °C on suhteellisen helposti ylläpidettävissä. Laskentatarkasteluissa (Vinha 2007) on pystytty osoittamaan, että rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta matala sisälämpötila on kriittisempi, kuin korkea. Näin ollen oletusta +21 °C sisäilman lämpötilasta voidaan pitää tarkasteluissa käyttökelpoisena.

### 3.4 Paine-erot sisä- ja ulkoilman välillä

Ilmavirtaus ulkoseinärakenteen läpi aiheutuu rakennuksen kokonaispaine-erosta vaipparakenteen yli. Paine-ero syntyy ilmanvaihdosta, lämpötilaeron aiheuttamasta nosteesta eli nk. savupiippuvaikutuksesta, sekä hetkittäin vaikuttavasta tuulesta rakennuksen ulkopuolella. Lisäksi tilojen käyttö, kuten tuuletusikkunoiden avaaminen tai liesituuletin käyttö vaikuttavat rakennuksen painesuhteisiin. Kokonaispaine-ero ja rakennuksen sisällä vallitseva paine-erojakauma muodostuvat näiden tekijöiden summana. (RIL 250-2011)

Ilmanvaihdon tehtävänä on ylläpitää ja parantaa sisäilman laatua poistamalla epäpuh-  
tauksia ja tuomalla puhdasta ulkoilmaa korvausilmaksi. Ilmanvaihdolla on suuri merkitys  
rakennuksen sisälle syntyvän paine-eron suuruuteen ja paine-erojakumaan. Ilmanvaiht-  
tojärjestelmä vaikuttaa paine-erojen hallitsemiseen ja säätämiseen. Ilmanvaihtojärjestel-  
mät voidaan jakaa painovoimaiseen, koneelliseen poistoilmanvaihtoon ja koneelliseen  
tulo- ja poistoilmanvaihtoon. Painovoimaisen ilmanvaihdon toiminta perustuu täysin läm-  
pötilan ja tuulen aiheuttamiin paine-eroihin. Kesäisin tyynellä säällä lämpötilaeron tai tuu-  
len aiheuttamaa alipainetta ei pääse syntymään poistohormin yläosaan, jolloin ilman-  
vaihtuvuus rakennuksen sisällä on olematonta. (Puhakka et al. 1996)

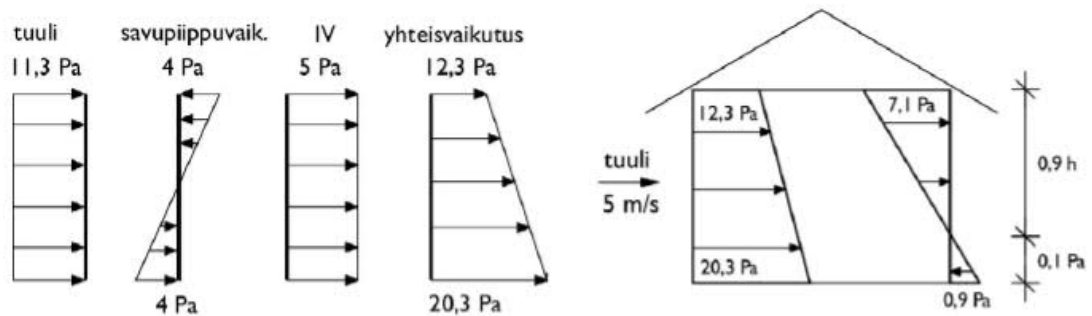
Koneellisissa ilmanvaihtojärjestelmissä ilman liikkuminen saadaan aikaan säädettävissä  
olevilla puhaltimilla, jolloin ilmanvaihdon hallitseminen on helpompaa. Koneellisessa  
poistoilmanvaihdossa nk. liikaisten tilojen eli wc:n/pesuhuoneen ja keittiön poistoilma-  
venttiilien kautta tapahtuvaa virtausta tehostetaan yleensä katolle tai ullakkotilaan asen-  
nettavalla huippumurilla. Koneellisella poistoilmanvaihdolla on rakennusvaipan tiivey-  
destä riippuen mahdollista aiheuttaa rakennuksen sisälle voimakas alipaine, jos korvaus-  
ilmareittejä ei ole suunniteltu tai jos ne ovat esimerkiksi remontoinnin yhteydessä tukittu.  
Koneellisessa tulo- ja poistoilmanvaihdossa rakennukseen johdetaan tuloilma myös ko-  
neellisesti, jolloin voidaan hallita ja säätää myös tuloilmavirtoja. (Puhakka et al. 1996)

Savupiippuvaikutuksen aiheuttama paine-ero syntyy sisä- ja ulkoilman lämpötilaerojen  
seurauksena ja sen voimakkuus on suurin talvella, jolloin lämpötilaerot ovat suurimmat.  
Savupiippuvaikutuksen takia lämmin ilma nousee kylmää ilmaa kevyempänä ylös, jolloin  
tasatiiviin rakennusvaipan tilanteessa syntyy tilanne, jossa seinän yläosassa vallitsee  
ylipaine ja alaosassa alipaine, tällöin paine-eron neutraaliakseli on seinän puolivälissä  
(kuva 3.3). Todellisuudessa rakennusvaippaa ei voida olettaa kauttaaltaan yhtä tiiviiksi,  
joten neutraaliakselin sijainti vaihtelee riippuen epätiiviyyskohtien korkeusasemista ja vir-  
tausvastuksista sekä ilmanvaihdosta ja tuulesta. Savupiippuvaikutus lisää riskiä kosteus-  
konvektion aiheuttamiin vaurioihin seinien yläosissa ja yläpohjarakenteissa etenkin kor-  
keissa rakennuksissa. (RIL 107-2012)

Tuulen vaikutus paine-eroihin on vaihteleva ulkoseinärakenteiden osalta. Tuulenpuolei-  
sella seinustalla tuuli aiheuttaa rakennuksen sisälle alipainetta ja suojan puoleisella  
seinustalla tuulen imu aiheuttaa rakennuksen sisälle ylipainetta. Tuulen voimakkuuteen  
ja näin ollen tuulen aiheuttamiin painesuhteisiin vaikuttaa voimakkaasti rakennuksen si-  
joittuminen ilmansuuntiin sekä muihin rakennuksiin ja maastossa oleviin esteisiin näh-

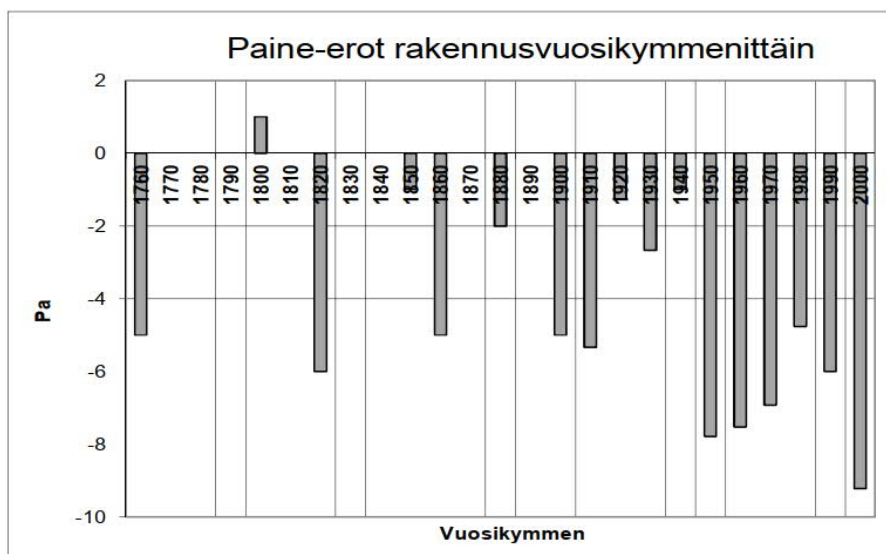


den. Alla olevassa kuvassa 3.3 on havainnollistettu kaikkien kolmen edellä mainitun tekijän yhteisvaikutusta sisä- ja ulkoilman välisiin paine-eroihin, kun rakennusvaippa on tasatiivis. (RIL 107-2012)



**Kuva 3.3.** Esimerkki tuulen, savupiippuvaikutuksen ja ilmanvaihdon yhteisvaikutuksesta tuulenpuoleiselle sekä suojanpuoleiselle ulkoseinälle. (Ympäristöministeriö 2016)

Rakennukset on pyritty suunnittelemaan aikaisempien ohjeiden mukaisesti hieman alipaineisiksi kuitenkin siten, ettei alipaine saa olla suurempi kuin 30 Pa. Perusteluna sisäilman alipaineisuudelle on esitetty välttymistä rakenteiden kosteusvaurioilta ja mikrobien aiheuttamilta terveyshaitoilta (RakMK D2 2011). Kuntotutkimuksien yhteydessä kartoitettujen 176 erilaisen rakennuksen painesuhteet osoittavat rakennuksien pääosin olevan alipaineisia ulkoilmaan nähden, riippumatta rakennuksen tyypistä, iästä ja ilmanvaihtojärjestelmästä. Keskimäärin sisäilman alipaine ulkoilmaan nähden oli 8 Pa, kun tarkasteltiin koko aineistoa. Neljänneksessä kohteista alipaineen suuruus oli 10 Pa tai enemmän. Käänteentekevä ajankautana voidaan pitää 1950-lukua, jolloin täysin painovoimaisesta ilmanvaihdosta siirryttiin käyttämään koneellista poistoilmanvaihtoa. Kyseinen muutos on selkeästi havaittavissa kuvassa 3.4 sisäilman alipaineisuuden kasvuna 1950-luvulta eteenpäin. (Seppänen 2010)



**Kuva 3.4.** Paine-erojen keskiarvot (Pa) rakennusvuosikymmenittäin. (Seppänen 2010)

Nykyisin voimassa oleva asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta (A 20.12.2017/1009) velvoittaa erityissuunnittelijan suunnittelemaan rakennuksen tulo- ja poistoilmavirrat siten, ettei ylipaine aiheuta rakenteisiin pitkäaikaista kosteusrasitusta eikä alipaine aiheuta epäpuhtauksien siirtymistä sisäilmaan. Rakennusvaipan yli vallitsevien paine-erojen osalta tämä tarkoittaa pyrkimystä tasapainotilanteeseen.

### 3.5 Rakennusvaipan ilmanpitävyys

Rakennuksen energiatehokkuuden ja terveellisen sekä viihtyisän sisäilman kannalta rakennusvaipan ilmatiiviyys on keskeinen osatekijä. Ilmatiiviyys on erittäin tärkeässä roolissa myös vaipparakenteen kosteusteknisessä toimivuudessa. Rakennusvaipan ilmatiiviyys toteutetaan erillisellä ilmansululla, jonka tehtävinä ovat:

- Estää sisäilman kosteuden tunkeutuminen rakenteisiin,
- estää rakenteissa ja ulkoilmassa mahdollisesti olevien epäpuhtauksien tunkeutuminen sisäilmaan,
- estää ulkoa sisäänpäin tapahtuva rakenteita jäähdyttävä ja näin ollen homeen kasvun mahdollistava ilmavirtaus,
- vähentää rakennusvaipan läpi ilmavirtausten mukana siirtyvää lämpöä ja näin ollen parantaa rakennuksen energiataloudellisuutta
- parantaa asumisviihtyvyyttä estämällä ulkoa sisäänpäin virtaavan kylmän ilman aiheuttamaa vedon tunnetta,
- mahdollistaa rakennuksen ilmanvaihdon hallitsemisen ja säätämisen siten, että rakennus pystytään pitämään ulkoilmaan nähden hieman alipaineisena. (RIL 255-1-2014)

Rakennusvaipan ilmanpitävyyden parantuessa myös ilmanvaihdon säätämisen merkitys korostuu, koska hallitsemattomien ilmavuotojen pyrkimys tasata sisä- ja ulkopuolisia paine-eroja vähenee. Huonosti säädetty ilmanvaihto yhdistettynä tiiviiseen rakennusvaippaan voi aiheuttaa merkittäviä paine-eroja rakennusvaipan yli. (Vinha et al. 2009a) Ilmavirtauksien voimistuminen rakennusvaipan läpi paine-erojen kasvaessa voi aiheuttaa merkittäviä kosteuskonvektio-ongelmia, niissä rakennusvaipan kohdissa joihin vuotoa on vielä jäänyt (Vinha & Käkelä 1999).

Rakennusvaipan ilmansulkukerros sijoitetaan kerroksellisessa rakenteessa tavallisesti lämmöneristeen lämpimälle puolelle, lähelle sisäpintaa. Ilmansulkukerrosena käytetään yleensä kalvoa, levyä tai ilmanpitävää solumuovieristettä, joissa saumat ovat toteutettu

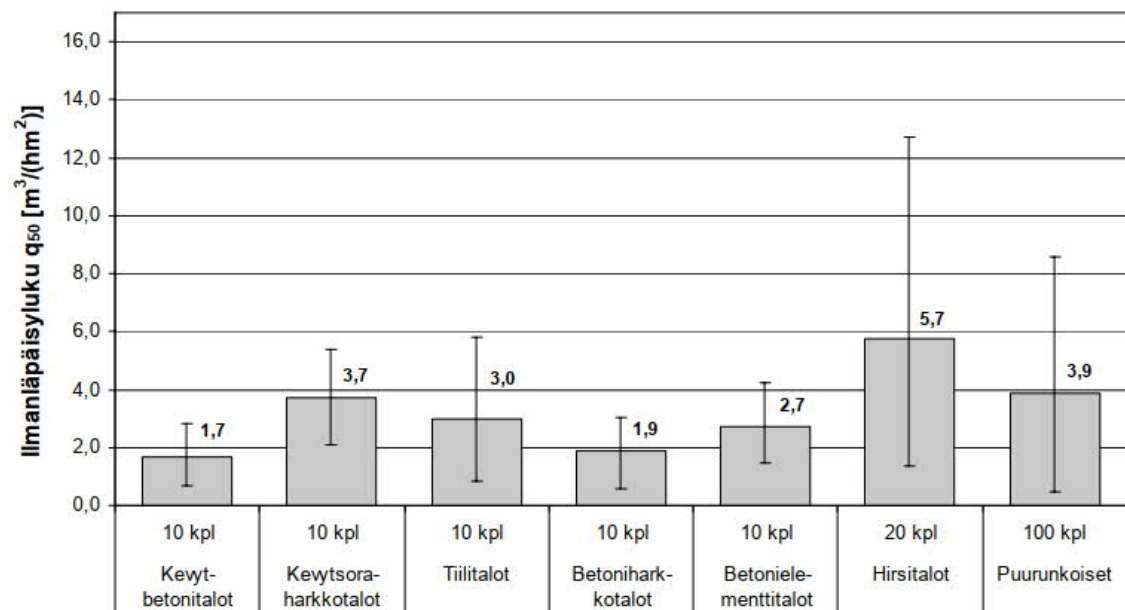
ilmanpitävästi. Massiivirakenne ilman erillistä lämmöneristyskerrosta, kuten hirsi tai betoni toimii ilmansulkuna, kunhan kaikki sauma- ja liitoskohdat tiivistetään huolellisesti. Tiili-villa-tiili –ulkoseinärakenteessa rapattu sisäkuori toimii tyypillisesti ilmansulkuna rakenteessa. (RIL 255-1-2014) Ilmansulkukerroksen ilmanläpäisevyyden tulee olla niin pieni, että se estää rakenteen läpi tapahtuvat ilmavirtaukset. Useasti ilmansulku toimii myös höyrynsulkuna, jolloin sen vesihöyrynvastuksen on oltava riittävän suuri, jotta sisäilman kosteus ei pääse diffuusiovirtauksena siirtymään rakenteeseen. Ilmansulkukerroksen tulee säilyttää nämä ominaisuudet koko rakennuksen elinkaaren ajan. (Vinha et al. 2009b)

Rakennusvaipan ilmanpitävyyttä voidaan mitata ns. painekokeella, jonka tuloksena saadaan rakennuksen ilmanvuotoluku. Kokeen suorittaminen on tarkemmin esitetty standardissa SFS-EN ISO 9972 (2015) Ennen painekoetta rakennuksen kaikki ilmanvaihtoreitit, kuten ilmanvaihtuventtiilit ja hormit teipataan tiiviisti umpeen sekä ikkunat ja ovet pidetään suljettuina. Painekokeen suorittamiseksi oveen asennettavalla puhallinlaitteistolla luodaan rakennuksen sisälle 50 Pa paine-ero ulkoilmaan nähden, joko puhaltamalla rakennukseen ilmaa tai imemällä sitä rakennuksesta pois. Painekokeen tuloksena saadaan rakennusvaipan ilmanpitävyyttä kuvaava  $n_{50}$ -luku, joka ilmoittaa kuinka monta kertaa rakennuksen tilavuutta vastaava ilmamäärä vaihtuu tunnissa, paine-eron ollessa 50 Pa. Rakennuksen vaipan alalla normalisoitu luku  $q_{50}$  saattaa eri kokoiset rakennuksen keskenään vertailukelpoisiksi. Mitä pienempiä ilmanvuotoluvut  $n_{50}$  tai  $q_{50}$  ovat, sen ilmanpitävämpi eli tiiviimpi rakennusvaippa on. (Vinha et al. 2009a) Ilmanvuotoluvun vaikutusta rakennuksen kokonaisenergiankulutukseen voidaan pitää merkittävänä. Laskennallinen tarkastelu pientalojen kohdalla on osoittanut  $n_{50}$ -luvun jokaista kokonaisuusyksikön lisäystä kohden rakennuksen kokonaisenergiankulutuksen kasvavan noin 4 %. (Vinha et al. 2009b) Seuraavalla sivulla olevassa taulukossa 3.1 on esitelty tyypillisiä ilmanvuotolukuja erilaisille rakennuksille riippuen rakentamis- ja toteutustavasta.

**Taulukko 3.1.** Tyypillisiä rakennuksen ilmanvuotolukuja ( $n_{50}$ ) ja rakennusvaipan ilmanvuotolukuja ( $q_{50}$ ) erilaisille rakennuksille riippuen rakentamis- ja toteutustavasta. (RakMK D5 2012)

Tavoiteilmanpitävyys	Yksityiskohdat	Tyypilliset $n_{50}$ -luvut, 1/h	Tyypilliset $q_{50}$ -luvut, $m^3/(h \cdot m^2)$
Hyvä ilmanpitävyys	Saumojen ja liitosten ilmanpitävyyteen on kiinnitetty erityistä huomiota sekä suunnittelussa että rakennustyön toteutuksessa ja valvonnassa (erillistarkastus)	Pientalo 1,0 – 3,0	Pientalot 1,0 – 3,0
Keskimääräinen ilmanpitävyys	Ilmanpitävyys on huomioitu tavanomaisesti sekä suunnittelussa että rakennustyön toteutuksessa ja valvonnassa	Asuinkerrostalo ja toimistorakennus 0,5 – 1,5	Asuinkerrostalo ja toimistorakennus 1,0 – 4,0
Heikko ilmanpitävyys	Ilmanpitävyyteen ei ole juurikaan kiinnitetty huomiota suunnittelussa eikä rakennustyön toteutuksessa ja valvonnassa	Pientalo 3,0 – 5,0	Pientalot 3,0 – 5,0
		Asuinkerrostalo ja toimistorakennus 1,5 – 3,0	Asuinkerrostalo ja toimistorakennus 4,0 – 8,0
		Pientalo 5,0 – 10,0	Pientalot 5,0 – 10
		Asuinkerrostalo ja toimistorakennus 3,0 – 7,0	Asuinkerrostalo ja toimistorakennus 8,0 – 20,0

Massiivirunkoisten pientalojen ilmanpitävyyksiä on tutkittu 1996-2006 vuosien välillä valmistuneista kohteista (Vinha et al. 2009a). Kuvassa 3.5 on esitetty mittaustulokset rakennusvaipan ilmanvuotoluvulla ( $q_{50}$ ) ulkoseinärakenteen mukaan. Kuvassa on esitetty myös puurunkoisten pientalojen osalta vastaava tulos perustuen aiempaan puurunkoisia pientaloja käsittelevään tutkimukseen (Vinha et al. 2005). Tiili-villa-tiili –ulkoseinärakenteen eli tiilitalon rakennusvaipan ilmanvuotoluvun keskiarvo on  $3,0 m^3/(h \cdot m^2)$ . Muihin ulkoseinärakennetyyppeihin verrattuna tulosta voidaan pitää keskinkertaisena.



**Kuva 3.5.** Pientalojen rakennusvaipan  $q_{50}$  ilmanvuotolukujen keskiarvot ja tulosten vaihteluväli. (Vinha et al. 2009a)

## 3.6 Home ja muut mikrobit

Ympäristössämme esiintyy useita erilaisia mikro-organismeja eli mikrobeja. Mikrobit voidaan jaotella edelleen bakteereihin, home- ja lahottajasieniin ja viruksiin. Luonnossa esiintyessään bakteerit, home- ja lahottajasienet ovat tärkeitä luonnon kiertokulun ja uusiutumisen kannalta, mutta rakennuksissa esiintyessään ne voivat aiheuttaa haittaa rakenteille ja rakennuksien sisäilmalle altistuville ihmisille. Mikrobivaurioiden ennaltaehkäisemisen kannalta on tärkeää ymmärtää rakennuksen kosteustekninen toiminta sekä mikrobien kasvun vaativat edellytykset. (RIL 250-2011)

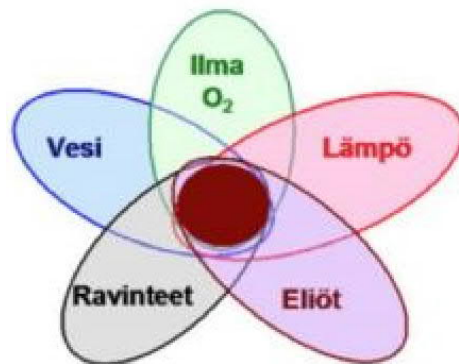
Mikrobivaurioilla ja homevaurioilla tarkoitetaan toisinaan kirjallisuudessa ja etenkin arkielämässä yhtä ja samaa asiaa. Teknisesti näiden kahden termin ero on se, että mikrobivaurioihin kuuluvat muidenkin mikrobien kuin vain homesienten aiheuttamat vauriot. Esimerkiksi sädesienenä paremmin tunnettu aktinomykeetti lukeutuu bakteereihin, vaikkakin sen kasvutapa muistuttaa homesientien rihmamaista kasvustoa. Sädesienikasvustoa ei näin ollen voisi tulkita homevaurioksi (Ympäristöministeriö 2016). Tässä kappaleessa tullaan esittämään lyhyesti mikrobikasvuston vaatimat kasvuedellytykset ja haitalliset seuraukset rakenteiden sekä sisäilman kannalta. Kappaleen lopussa luodaan katsaus homeutumisen riskin laskennallista tarkastelua varten kehitettyyn Suomalaiseen homemalliin.

### 3.6.1 Mikrobivauriot rakenteissa

Rakennukset altistuvat elinkaarensa aikana erilaisille kosteuskuormille, jotka yleensä osataan ottaa huomioon jo suunnittelu- ja rakennusvaiheessa erilaisilla rakenneratkaisuilla ja materiaalivalinnoilla. Rakennusten toimivuudessa ja laadussa on kuitenkin vaihtelua, kuten myös rakennuksen käytössä ja ylläpidossa. Rakennuksen ikääntyessä käytettyjen rakennusmateriaalien ominaisuudet voivat heikentyä, jolloin materiaalin kosteudensietokyky ei enää pysty vastamaan kosteuskuorman aiheuttamiin rasituksiin. Rakenteiden kosteusvauriot ovat seurausta materiaalin sietokyvyn ylittämästä kosteusrasituksesta, josta voi sopivissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa kehittyä mikrobivaurio rakennusmateriaalin pintaan. Rakennusten kosteus- ja mikrobiongelmat ja näiden aiheuttamat vauriot ovat moniulotteisia ja seurausta useiden eri tekijöiden yhteisvaikutuksesta. (RIL 250-2011)

Mikrobit tarvitsevat elääkseen vettä, lämpöä, ilmaa, ravinteita ja aikaa otollisissa olosuhteissa. Oleellisia tekijöitä mikrobikasvuston kehittymisen kannalta ovat kasvualustana toimiva materiaali ja sen pinnalla vaikuttavat lämpö- ja kosteusolosuhteet, ei niinkään ympäröivän huoneilman olosuhteet. (Ympäristöministeriö 2016) Kuvassa 3.6 on esitetty

mikrobikasvuston syntymiseen vaadittavat tekijät sekä raja-arvot kosteudelle ja lämpötilalle. Huomionarvoista on sädesienten ja muiden bakteerien vaatima homesieniä korkeampi suhteellinen kosteuspitoisuus.



**+ VAIKUTUSAIKA!**

Ympäröivän mikroilmaston minimikosteusolot:

Kriittinen kosteus rakennusmateriaalien pinnassa saavutetaan, kun ilman suhteellinen kosteus on pitkään yli RH 75 – 100 %

- Home > RH 75 - 80 %
- Laho > RH 95 %
- Bakteerit > RH 95 – 99 %
- Hyönteiset > RH 65 - 80 %

Orgaanisten materiaalin (esim. puun) kosteuspitoisuus (u % kuivapainosta):

- Home > u 18 – 20 %
- Laho > u 25 – 30 %

Lämpötila +5 (-5)– +50 °C

**Kuva 3.6.** Materiaalin vaurioitumisen kannalta kriittiset tekijät. (RIL 250-2011)

Rakennusmateriaalien pinnoilla oleva mikrobikasvusto, ei vielä välttämättä tarkoita mikrobivauriota. Mikrobikasvustoa voi esimerkiksi esiintyä kylpyhuoneessa lattialaattojen saumoissa, josta kasvusto on mahdollista pestä pois. Mikrobivauriosta puhuttaessa materiaalin toimivuus on menetetty pysyvästi esimerkiksi pitkälle edenneen mikrobikasvuston, materiaalin värjäytymisen tai lahon seurauksena. Tämän seurauksena kosteusvaurion aiheuttaneet tekijät poistetaan ja vaurioitunut materiaali vaihdetaan vaurioituneilta osin uuteen. (RIL 250-2011)

### 3.6.2 Mikrobin vaikutus sisäilmaan

Sisäilmassa esiintyy erilaisia mikrobipartikkeleita ja homeitiöitä luonnostaan ja normaaleissa olosuhteissa, jolloin ei vielä voida puhua varsinaisesta sisäilmaongelmasta. Mikrobivauriolla tarkoitetaan rakennusmateriaalin pinnalla esiintyvää poikkeuksellista ja ei-toivottua mikrobikasvustoa. Sisäilman laatua heikentävät erityisesti sisäilmaan rajautuvien materiaalien tai mahdollisten ilmapuotoreittien varrella olevien materiaalien mikrobivauriot ja mikrobin aineenvaihduntatuotteiden siirtyminen sisäilmaan rakenteiden läpi siirtyvän vuotoilman mukana. (RIL 250-2011) Metatutkimuksessa (Peat et al. 1998) on osoitettu mikrobivaurioista peräisin olevien allergeenien aiheuttavan erilaisia terveysongelmia, niin lapsilla kuin aikuisillakin. Tyypillisesti terveysongelmat ovat ärsytysoireilua

ilman pysyvää haittaa. Muita mahdollisia terveysongelmia ovat astma, allergiset sairaudet, hengitystieinfektioiden sekä yleisoireiden lisääntyminen, joita ovat muun muassa väsymys, masentuneisuus ja päänsärky. (Seuri & Palomäki 2000)

Toimiva ilmanvaihto pystyy laimentamaan ja kuljettamaan pois osan sisäilman epäpuhtauksista (Seuri & Palomäki 2000). Näin ollen ilmanvaihdon merkitys korostuu mikrobi-ongelmaisissa rakennuksissa. Ilmanvaihdon ei olemassa olevaa, sisäilman laatua heikentävää, mikrobiongelmaa voida kuitenkaan korjata, mutta käyttäjien altistumista epäpuhtauksille voidaan vähentää. Tämä onnistuu huolehtimalla riittävästä ilmanvaihdosta ja ennen kaikkea siitä, että korvausilma on puhdasta ja korvausilmareitit ovat järjestetty asianmukaisesti. (RIL 250-2011)

Akuuteissa ja välitöntä korjausta vaativissa kohteissa ilmanvaihdon tulo- ja poistoilmavirtoja säätämällä voidaan rakennuksen sisäilman painesuhteita muuttaa siten, että riski altistua rakenteista peräisin oleville epäpuhtauksille pienenee. Ympäri vuorokautisella rakennuksen ylipaineistamisella voidaan estää tai vähentää rakennusvaipan ilmavuotoreitien kautta kulkeutuvien epäpuhtauksien siirtymistä sisäilmaan. Ylipaineistuksessa ilmavirtauksen suunta on sisätiloista ulospäin ja näin ollen lämpimän sisäilman sisältämä kosteus voi kondensoitua rakennekerroksien rajapinnoille aiheuttaen rakenteisiin kosteusvaurioita. Sisäilmaongelmien leviämistä ja käyttäjien altistumista rakennuksen sisällä voidaan pyrkiä ehkäisemään myös muuttamalla rakennuksen sisäisiä painesuhteita eri tilojen välillä. Rakennuksen osa, jossa sisäilmaongelmia esiintyy, on mahdollista ympäröiviin tiloihin nähden pyrkiä alipaineistamaan, jolloin estetään haitallisten epäpuhtauksien siirtyminen ilmanvaihdon mukana rakennuksen niihin osiin, joissa sisäilmaongelmia ei esiinny. (Ympäristöministeriö 2016)

### **3.6.3 Homehtumisriskin laskennallinen arviointi**

Rakenteiden homeen kasvun laskennalliseen tarkasteluun on kehitetty Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n ja TTY:n yhteistyössä Suomalainen homemalli, joka on paranneltu versio alun perin VTT:n kehittämästä puumateriaalien homehtumista kuvaavasta mallista. (RIL 255-2014) Suomalaisella homemallilla voidaan laskea homehtumisriski muuttuvissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa ajan funktiona kaikille rakennusmateriaaleille, joille on määritetty homehtumisherkkyyssluokka.

Homeindeksi kuvaa tarkasteltavan materiaalin pinnalla tapahtuvaa silmin tai mikroskoipimalla havaittavaa homekasvustoa. Suomalaisessa homemallissa homeindeksin  $M$

luokitustasot on jaettu välille 0 – 6. Numeerisille homeindeksin arvoille on annettu selitykset alla olevassa taulukossa 3.2 homeenkasvun osalta. Indeksit eivät erottele erilaisia homelajeja eikä näin ollen ota kantaa niiden toksisuuteen tai ihmisille mahdollisesti aiheutuviin terveyshaittoihin. Tästä syystä laskennallisissa tarkasteluissa lämmöneristekerrokselle ja lämmöneristekerroksen sisäpuolisille materiaalikerroksille on suositeltavaa asettaa homeindeksin maksimiarvoksi < 1,0, eli homeenkasvua ei sallita lainkaan. Homeenkasvua ei sallita myöskään kantavissa rakenteissa, niiden pitkän tavoitellun käyttöikänsä ja hankalan uusimisen takia. (RIL 255-1-2014)

**Taulukko 3.2.** Suomalaisen homemallin homeindeksin luokitustasot. (RIL 255-1-2014)

Homeindeksi M	Havaittu homekasvu	Huomautuksia
0	Ei kasvua	Pinta puhdas
1	Mikroskoopilla havaittava kasvu	Paikoin alkavaa kasvua, muutama rihma
2	Selvä mikroskoopilla havaittava kasvu	Homerihmasto peittää 10 % tutkittavasta alasta (mikroskoopilla), Useita rihmastopesäkkeitä muodostunut
3	Silmin havaittava kasvu Selvä mikroskoopilla havaittava kasvu	Alle 10 % peitto alasta (silmillä) Alle 50 % peitto alasta (mikroskoopilla) Uusia itiöitä alkaa muodostua
4	Selvä silmin havaittava kasvu Runsas mikroskoopilla havaittava kasvu	Yli 10 % peitto alasta (silmillä) Yli 50 % peitto alasta (mikroskoopilla)
5	Runsas silmin havaittava kasvu	Yli 50 % peitto alasta (silmillä)
6	Erittäin runsas kasvu	Lähes 100 % peitto, tiivis kasvusto

Rakentamisessa yleisesti käytetyille materiaaleille on määritelty homehtumisherkkyyssluokat (HHL1-4), sekä homekasvun taantumaluokat (HTL1-4). Homehtumisherkkyyssluokkia on neljä ja materiaalien jakautuminen näihin luokkiin perustuu homeen kasvunopeuteen ja homeen mahdolliseen maksimitasoon materiaalissa. Homemallilla on mahdollista suorittaa tarkasteluita myös kahden materiaalin rajapinnassa, jolloin herkemman materiaalin homeen kasvunopeus vaikuttaa myös kestävämpään materiaaliin. Esimerkiksi mineraalivillan homehtumisasteen on havaittu kohoavan voimakkaasti, kun mineraalivilla on ollut kontaktissa sahanpurun kanssa (Viitanen 2004). Homemallissa kahden materiaalin välinen rajapinta huomioidaan asettamalla homeen kasvunopeuden herkkyyssluokka herkemman materiaalin mukaisesti. Homeen maksimimäärä määräytyy kuitenkin edelleen tutkittavan materiaalin perusteella. Yleensä homekasvu tapahtuu rakennekerrosten välisissä rajapinnoissa, mutta avohuokoisissa materiaaleissa, kuten lämmöneristeissä, hometta voi kasvaa myös avohuokoisen materiaalin sisällä. Tämän seurauksena homeen kokonaismäärä voi nousta huomattavasti suuremmaksi verrattuna materiaaleihin, joissa homekasvustoa esiintyy vain pintakerroksessa. (RIL 255-1-2014)



Homeen taantumaluokkia, jotka huomioivat homeen kasvulle epäsuotuisten olosuhteiden vaikutuksen homekasvuston taantumiselle, on alun perin ollut myös neljä. Taantumakokeilla on kuitenkin osoitettu, ettei puumateriaaleissa homeen taantuminen olisi riittävän nopeaa, jotta se voisi kuulua voimakasta taantumaa kuvaavaan ryhmään HTL1. Näin ollen homeen taantumista kuvataan luokilla HTL2-HTL4. (Vinha et al. 2013)

Taulukossa 3.3 on esitetty materiaalien jakautuminen erilaisiin homehtumisherkkyyssluokkiin, sekä taulukossa 3.4 on esitetty homehtumisherkkyyssluokkia vastaavat homeen taantumaluokat.

**Taulukko 3.3.** Rakennusmateriaalien jakautuminen erilaisiin homehtumisherkkyyssluokkiin. (Vinha et al. 2011)

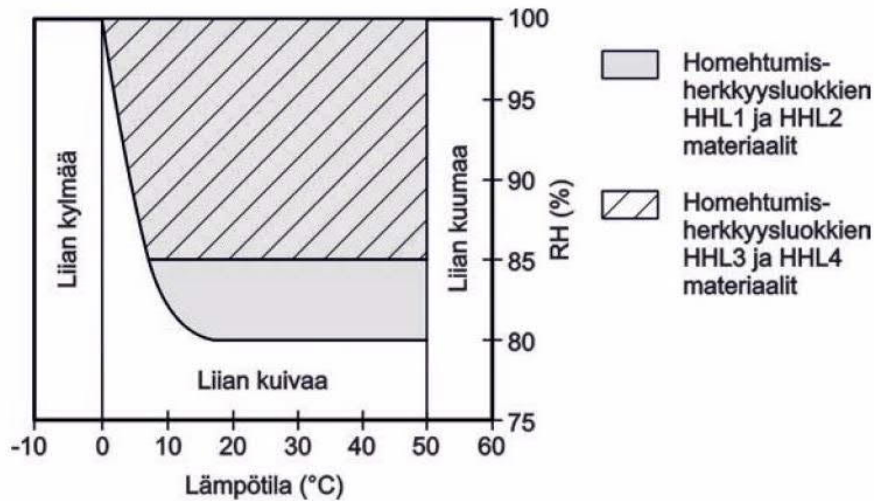
Homehtumis-herkkyyssluokka	Rakennusmateriaali
Hyvin herkkä HHL1	karkeasahattu ja mitallistettu puutavara (mänty ja kuusi), höylätty mänty
Herkkä HHL2	höylätty kuusi, paperipohjaiset tuotteet ja kalvot, puupohjaiset levyt, kipsilevy
Kohtalaisen kestävä HHL3	mineraalivillat, muovipohjaiset materiaalit, kevytbetoni <sup>1</sup> , kevytsorabetoni, karbonatisoitunut vanha betoni, sementtipohjaiset tuotteet, tiilet
Kestävä HHL4	lasi ja metallit, alkalinen uusi betoni, tehokkaita homesuoja-aineita sisältävät materiaalit

<sup>1</sup> Kevytbetoni kuuluu homehtumisominaisuuksiltaan kahteen eri homehtumisherkkyyssluokkaan. Homeen kasvunopeus vastaa homehtumisherkkyyssluokkaa HHL2, mutta homeindeksin maksimiarvo jää homehtumisherkkyyssluokan HHL3 tasolle.

**Taulukko 3.4.** Homehtumisherkkyyssluokkaa vastaava homeen taantumaluokka. (Vinha et al. 2011)

Homehtumis-herkkyyssluokka	Homekasvun taantumaluokka
Hyvin herkkä HHL1	Merkittävä taantuma HTL2
Herkkä HHL2	Kohtalainen taantuma HTL3
Kohtalaisen kestävä HHL3	Vähäinen taantuma HTL4
Kestävä HHL4	Vähäinen taantuma HTL4

Kappaleessa 3.6.1 käsiteltiin olosuhdetekijöitä, jotka mahdollistavat homekasvuston materiaalin pinnalla. Alla olevassa kuvassa 3.7 on esitetty lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden raja-arvot erilaisille homehtumisherkkyyssluokille.



**Kuva 3.7.** Homeen kasvun mahdollistavat lämpötila- ja kosteusolosuhteet eri homeutumisherkkyyssluokissa. (Suomalainen homemalli 2018)

Homeindeksin laskeminen halutussa tarkastelupisteessä tapahtuu esimerkiksi excel- taulukkolaskentaohjelmalla, johon siirretään laskentaohjelmasta valitun tarkastelujakson ajalta kyseisen tarkastelupisteen lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvot tunnin välein laskettuina. Syötetyn lämpötila- ja kosteusdatan, sekä materiaalin homeutumisherkkyyssluokan ja taantumaluokan perusteella homemalli esittää valitun rajapinnan homeindeksin kehittymisen ajan funktiona, sekä homeindeksin maksimiarvon tarkastelujakson aikana.

## 4. TIILI-VILLA-TIILI-ULKOSEINÄRAKENNE

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan ulkoseinärakennetta, jota kutsutaan tiili-villa-tiili-rakenteeksi. Nimensä mukaisesti rakenne koostuu kantavasta tai ei-kantavasta sisäkuoren muurauksesta, lämmöneristekerroksesta, mahdollisesta tuuletusraosta ja tuulensuojalevystä, sekä ulkopuolen muuratusta tiiliverhouksesta. Lämmöneristekerroksen materiaalina on tyypillisesti käytetty mineraalivillaa. Kyseisestä ulkoseinärakenteesta voidaan käyttää myös nimitystä rakoseinä, kuvaamaan kahta toisiinsa muuraussitein kytkettyä muurattua seinää, joiden välissä on rako lämmöneristekerrokselle ja mahdolliselle tuuletusraolle ja tuulensuojavillalle. (Tiilirakenteet 1982)

1960-luvulta lähtien kyseistä ulkoseinärakennetta on käytetty paljon muun muassa koulurakennuksissa yhdessä tiili-villa-betoni-ulkoseinärakenteen kanssa, jossa sisäkuorena tiilimuurauksen tilalla on betonielementti (Ympäristöministeriö 2016). Kantavan tiili-villa-tiili-ulkoseinärakenteen käyttökohteet rajautuvat pääosin mataliin asuin-, palvelu- ja liikerakennuksiin (Tiilirakenteet 1982). Kaksikerroksisissa tai matalammissa rakennuksissa kantavan tai jäykistävän seinän nimellispaksuuden on oltava vähintään 85 mm ja useampikerroksisissa vähintään 120 mm (RT 82-10510 1993).

Kerrostaloissa kantavaa tiili-villa-tiili-ulkoseinärakennetta aloitettiin käyttämään tiukentuneiden energiavaatimusten takia 1940-luvulla pelkän yksiaineisen massiivisen tiilimuurin sijaan. 1960-luvulla betonielementtijärjestelmän kehittyminen ja standardisointi vähensivät tiilen käyttöä kantavissa rakenteissa. Runkotyyppinä kirjahyllyrunko alkoi yleistyä 1960-luvulta lähtien, jolloin tiili-villa-tiili-rakenteen käyttö rajautui enää ei-kantaviin seinisiin, kunnes 1970-luvulla sisäkuoren korvaaminen betonielementillä päätti käytännössä tiili-villa-tiili-rakenteen käytön kokonaan kerrostalokohteissa. (Mäkiö 1994, Neuvonen 2006)

Tiili-villa-tiili-ulkoseiniä on toteutettu vuosikymmenien kuluessa hyvin monenlaisilla rakennepaksuuksilla, sekä 1960-1970 ja jopa 1980-luvulla usein ilman rakenteen kuivumisen mahdollistavaa tuuletusrakoa. 1970-luvulla tuuletusrako nähtiin tarpeellisena vain kosteiden tilojen ulkoseinärakenteessa kuten pesuhuoneen rajautuessa ulkoseinään tai tilanteissa, joissa viistosateen voitiin olettaa kastelevan ulkoseinän läpimäräksi (RIL 99 1975). Tuuletusraon tarpeellisuutta arvioitiin 1970-luvulla vielä tapauskohtaisesti. 1980-luvulla ulkoseinärakenteet enenevässä määrin suunniteltiin tuuletusraollisiksi, kun tuuletumisen merkitys seinärakenteen toiminnan kannalta ymmärrettiin paremmin (Pirinen 1999). Vuonna 1981 ilmestynyt RIL 107, Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet

vaativat puurunkoisen, tiiliverhotun seinän taakse tuuletusraon. Rakentajain kalenterissa tuuletusraon merkitystä korostetaan vasta vuoden 1994 julkaisussa (Pirinen 1999). Vuodesta 1999 eteenpäin rakentamismääräykset ovat edellyttäneet tiiliverhouksen taakse vähintään 30 mm paksun tuuletusraon (RakMK C2 1998).

Tuulensuojavillan vaikutus tiili-villa-tiili –ulkoseinärakenteen lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan on ymmärretty vielä myöhemmin kuin tuuletusraon merkitys. Tuulensuojavillasta ei ole vielä 1990-luvun alkupuoliskon RT-ohjekorteissa erillistä mainintaa (RT 82-10438 1990, RT 82-10510 1993). RT-ohjekortti ulkoseinärakenteiden osalta päivittyi vuonna 2003 vastaamaan samana vuonna voimaan astuneita uusia tiukentuneita vaatimuksia rakennusvaipan lämmöneristävyuden suhteen. Uudessa ohjekortissa tuuletusraon ja lämmöneristeen väliin ohjeistettiin lisäämään vähintään 25 mm paksu, mineraalivillainen, tuulensuojalevy (RT 82-10800 2003). Seuraavan kerran rakennusvaipan lämmöneristävyysvaatimuksia tiukennettiin vuonna 2010, jolloin päivittyi myös RT-ohjekortti ulkoseinärakenteista. Päivitetyssä ohjekortissa tuulensuojalevyn paksuudeksi on asetettu 50 mm (RT 82-11006 2010)

#### **4.1 Rakenteessa havaitut vauriot**

Rakennusfysikaalisen mallintamisen kohteena olevassa vanhassa tiili-villa-tiili-ulkoseinärakenteessa on kuntotutkimuksissa havaittu erilaisia esteettisiä ja toiminnallisia vaurioita. Vaurioituminen on aiheutunut rakenteen altistumisesta ulko- ja sisäilman olosuhteille, jotka ovat ylittäneet rakenteen sietokyvyn. Tämän seurauksena rakenteeseen on voinut syntyä eriasteisia kosteus- ja mikrobivaurioita. Rakenteen vaurioitumiseen johtaneet virheet on voitu tehdä jo suunnitteluvaiheessa, joista ehkä yleisimpänä virheenä kyseistä ulkoseinärakennetta koskien voidaan pitää tuuletusraon puuttumista. Toteutusvaiheessa alun perin tuulettuvaksi suunnitellun rakenteen toimintaedellytykset on mahdollisesti menetetty huolimattomalla tiiliverhouksen muurauksella, jonka seurauksena tuuletusraon alaosaan tippuneet laastipurseet heikentävät merkittävästi tuuletusraon ilmanvaihtuvuutta ja näin ollen koko rakenteen kosteusteknistä toimintaa. Lisäksi väärillä ja käyttötarkoitukseen sopimattomilla rakenne- ja materiaalivalinnoilla on mahdollisesti lyhennetty rakenteen elinkaarta merkittävästi. Tästä esimerkkinä kohteeseen soveltumattoman muurauslaastin käyttäminen, jonka seurauksena muun muassa viistosade pääsee muurauslaastiin syntyneiden halkeamien kautta tunkeutumaan lämmöneristekerrokseen. (Kauppi et al. 1990, RIL 99-1975) Tässä kappaleessa esitellään suomalaisessa rakennuskannassa yleisemmin havaittuja vaurioita tiili-villa-tiili-ulkoseinärakenteessa, sekä arvioidaan vaurioiden syitä ja vaikutuksia rakenteen toimintaan.

Tuuletusraolliseksi suunnitelluissa tiiliverhotuissa ulkoseinissä ongelmia on aiheuttanut tuuletusraon alaosan tukkeutuminen laastipurseilla huolimattoman muuraustyön seurauksena (kuvat 4.1 ja 4.2). Laastipurseiden aiheuttama painehäviö tuuletusraossa heikentää ilmavirtausta tai estää sen kokonaan, jolloin sisäilmasta siirtynyt kosteus ei pääse siirtymään ulkoilmaan. Laastipurseiden ollessa kontaktissa tuulensuoja- tai lämmöneristekerroksen kanssa on riskinä tiiliverhouksesta kosteuden siirtyminen näihin kerroksiin tai ikkunoiden ja ovien karmirakenteisiin diffuusion lisäksi myös kapillaarisesti. (RIL 107-2012)

Laastipurseiden lisäksi ilmanvirtausta tuuletusraossa voivat heikentää irtonaiset lämmöneristelevyt tai lämmöneristeen pullistuminen vasten tiiliverhousta (Van Straaten 2003). Ulkoseinärakenteen, jossa laastipurseet tai muut ilmanvirtausta haittaavat esteet ovat heikentämässä tuuletusraon suunnitelman mukaista toimintaa voidaan rakenteen kosteusteknisen toimivuuden olettaa sijoittuvan tuulettuvan ja tuuletusraottoman ulkoseinärakenteen välille.



**Kuvat 4.1 ja 4.2.** Huolimattoman ulkoverhouksen muuraustyön seurauksena laastipurseet ovat pudonneet tuuletusraon alaosiin heikentäen ilmanvaihtuvuutta tuuletusraossa. Kuvat: J. Parkkinen, FCG Suunnittelu ja Tekniikka Oy.

Esteen tuuletusraon ilmanvaihtuvuudelle voivat muodostaa myös alimitoitettut (kuva 4.3) tai kokonaan puuttuvat alaosan tuuletusaukot tiiliverhouksessa (kuva 4.4). Laskennallisesti arvioituna kuvan 4.3 tapauksessa ilman tilavuusvirta on noin 5-10% tilanteesta, jossa koko pystysauma olisi auki. Todennäköisesti alimpaan vaakasaumaan asetetut putket ovatkin suunniteltu vain mahdollisen vuotoveden poisohjaamiseksi rakenteen sisältä eikä varsinaisesti tuuletusaukoiksi tuuletusraon ja ulkoilman välillä.



**Kuvat 4.3 ja 4.4.** Tuuletusrakoon johtavat tiiliverhouksen alaosan tuuletusaukot voivat tuulettumisen suhteen olla kooltaan riittämättömiä tai puuttua kokonaan. Molemmat seinärakenteet ovat alkuperäisten suunnitelmien mukaan tuuletusraollisia. Kuvat: J. Parkkinen, FCG Suunnittelu ja tekniikka Oy.

Tiilen suuren kapillaarisen vedenimukyvyn seurauksena puhtaaksimuuratun tiiliverhouksen pintaan kohdistuvasta viistosateesta iso osuus imeytyy tiiliverhoukseen. Viistosateen jatkuessa riittävän kauan tiiliverhouksen vedenimukyky ylittyy (Pentti & Hyypöläinen 1999). Tästä seuraa veden tunkeutumien tiiliverhouksen läpi tuuletusrakoon tai tuuletusraon puuttuessa suoraan lämmöneristekerrokseen. Tiiliverhouksen läpi tunkeutuvan vuotoveden määrään vaikuttaa verhouksen paksuus, muuraustyön huolellisuus, muurauslaastin ominaisuudet, sekä mahdolliset raot ja halkeamat (RIL 255-1-2014). Tyypillisenä vuotokohtana voidaan pitää tiilien välistä pystysaumaa, johon huolimattoman muuraustyön ja heikon nokkalaastitekniikan seurauksena on jäänyt rakoja (Hens et al. 2007).

Tiiliverhoukseen liittyvien rakenteiden kautta on myös mahdollista päästä tunkeutumaan vettä tuuletusrakoon ja lämmöneristekerrokseen, yleinen vuotopaikka on ikkunapellin ja tiiliverhouksen välinen huonosti tiivistetty liitos (Weijo et al. 2019). Ikkunapellin virheellinen asennus voi myös heikentää ikkunan alapuolisen tuuletusraon ilmanvaihtuvuutta. Vuotoveden poistuminen tiiliverhouksen takaa tulisi olla mahdollista aiheuttamatta haittaa itse rakenteelle. Tuuletusraon puuttuminen tai sen tukkeutuminen laastipurseilla hidastavat poistumista ja lisäävät lämmöneristekerroksen kosteuskuormaa. Tiiliverhoukseen kohdistuvaan viistosaderasitukseen vaikuttavat lukuisat tekijät kuten rakennuksen sijoittuminen ilmansuuntiin nähden, maantieteellinen sijainti, julkisivun korkeus, suojaavat rakenteet sekä rakennuksen ympärillä vallitsevat paikalliset mikroilmasto-olosuhteet. (Björkholtz 1997).

Tiiliverhouksessa voi esiintyä tiilien rikkoutumista, saumalaastin murenemista ja tiiliverhouksen halkeilua johtuen tiilen ja/tai laastin heikosta pakkasenkestävyydestä (Kauppi et al. 1990). Tiiliverhouksen halkeilun syynä voi olla myös rakenteen epätasainen painuminen ja liian harvaan sijoitetut tai kokonaan puuttuvat liikuntasaumamat (RIL 99-1975). Näiden vaurioiden seurauksena viistosateen tunkeutuminen tiiliverhouksen läpi tuuletusrakoon ja lämmöneristekerrokseen voimistuu. Alla olevissa kuvissa 4.5 ja 4.6 on esitetty tiiliverhouksessa havaittuja halkeamia. Kuvia vertaamalla voidaan todeta tiiliverhouksessa mahdollisesti esiintyvien halkeamien kokoluokan vaihtelevan suuresti.



**Kuvat 4.5 ja 4.6.** Tiiliverhouksen halkeamien mittasuhteet voivat vaihdella suuresti. Kuvat: J. Parkkinen, FCG Suunnittelu ja Tekniikka Oy.

Ulkoseinä rakenteessa voi esiintyä ilmavuotoja rakenteen epäjatkuvuuskohdissa eli ikkuna- ja oviliittymissä (kuvat 4.7 ja 4.8), ulkoseinän ja yläpohjan välillä, sekä muissa rakenneliittymissä. Tiili-villa-tiili –ulkoseinä rakenteelle tyypillinen ilmavuotoreitti on huonosti tiivistetty tai kokonaan tiivistämätön sisäkuoren ja ikkunan apukarmin välinen liitos (kuvat 4.9 ja 4.10). Erityisesti puurakenteisen yläpohjan liittyminen kivrakenteiseen seinään on ollut ilmanpitävyyden kannalta ongelmallinen myös uudemmassa rakennuskannassa 2000-luvulla (Vinha et al. 2009). Kantava sisäkuori voi olla myös puhtaaksimuurattu seinä, jolloin ilmavuotoja pääsee tapahtumaan tiilisaumojen kautta. Huono ilmatii viisy on usein edesauttanut sisäilmaongelmien syntymistä ja/tai mahdollistanut kosteuden siirtymisen lämmöneristekerrokseen. (Ympäristöministeriö 2016, Vinha & Käkelä 1999)



**Kuvat 4.7 ja 4.8.** Ilmavuotoreitti ikkunakarmin ja ikkunalaudan välistä. Oikeanpuoleisessa kuvassa ikkunalauda on poistettu. Kuvat: J. Parkkinen, FCG Suunnittelu ja Tekniikka Oy.



**Kuvat 4.9 ja 4.10.** Tiili-villa-tiili –ulkoseinärakenteelle tyypillinen ilmavuotoreitti ikkunan apukarmin ja sisäkuoren välissä. Kuvat: J. Parkkinen, FCG Suunnittelu ja Tekniikka Oy.

Tiiliverhouksen pinnoitteina on käytetty rappausta, maalausta tai riskialtista hydrofobiointia, jolla tarkoitetaan tiiliverhouksen ulkopinnan käsittelyä vettähylykivillä aineilla, kuten silikoneilla tai akrylaateilla (Kauppi et al. 1990). Pinnoituksessa yleinen vaurioon johtanut virhe on liian vesihöyrytiivis tai muutoin sopimaton pinnoite, joka hidastaa kosteuden siirtymistä tiiliverhouksesta ulkoilmaan (RIL 250-2011). Seurauksena on kosteuden kerääntyminen pinnoitteen taakse ja tästä aiheutuneet pakkasvauriot tiilissä ja laastissa (RIL 99-1975). Pinnoitteen huono muodonmuutoskyky ja liiallinen lujuus voivat aiheuttaa pinnoitteen halkeilua ja alustasta irtoilua johtuen epähomogeenisen tiiliverhouksen lämpö- ja kosteusliikkeistä. Pinnoitekerroksen halkeamat lisäävät tiiliverhouksen paikallista kosteusrasitusta. (Kauppi et al. 1990) Pinnoitetut tiili-villa-tiili-ulkoseinärakenteet rajautuvat tämän tutkimuksen ulkopuolelle. Laskennallisissa tarkasteluissa seinärakennetta käsitellään puhtaaksimuurattuna.



## 4.2 Rakenteen lämpö- ja kosteustekninen toiminta

Ulkoseinärakenteen kosteusteknisen toiminnan periaatteisiin kuuluu, ettei rakenteeseen vetenä tai vesihöyrynä tunkeutunut kosteus pääse ylittämään rakennuksen käytön aikana määrää, joka on haitallinen rakenteen tarkoituksenmukaisen toiminnan kannalta. Kerroksellinen ulkoseinärakenteen kannalta tämä tarkoittaa sitä, että rakenteen vesihöyrynvastus alenee siirryttäessä sisäpinnasta kohti ulkopintaa, jolloin rakenne pääsee kuivumaan ulospäin (Straube 2001). Tämä edellyttää esimerkiksi lähellä rakenteen ulkopintaa sijaitsevalta tuulensuojakerrokselta hyvää vesihöyrynläpäisevyyttä.

Kerroksellisille vaipparakenteille lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan edellytykset luodaan yleensä riittävän tiiviillä sisäpuolisella ilman- ja/tai höyrynsulkukerroksella. Tiili-villa-tiili –ulkoseinärakenteissa sisäkuoren ilmanpitävyys on voimakkaasti riippuvainen pintakäsittelystä eli rappauksesta ja maalauksesta tai puhtaaksimuuratun seinän tapauksessa muuraustyön huolellisuudesta. Sisäkuoren vesihöyrynvastukseen ei kuitenkaan yleisesti käytetyillä maaleilla tai rappauslaasteilla, kuten kalkki- tai kipsilaasteilla ole merkittävää vaikutusta. Tiili-villa-tiili-ulkoseinärakenteen sisäpuolista vesihöyrynvastusta voidaan näin ollen pitää vähäisenä verrattuna puurunkoiseen ulkoseinärakenteeseen, jonka lämmöneristekerroksen sisäpinnassa on erillinen höyrynsulkumuovi. Höyrynsulkumuovien diffuusionvastuskerroin  $\mu$  vaihtelee välillä 100 000 - 500 000, kun vastaava arvo poltetulle tiilelle on 4 – 13, kalkkihiekkatiilelle 20-43 sekä kalkki- ja kipsilaasteilla 5 - 26. (RIL 255-1-2014) Lämmöneristeenä käytetyn mineraalivillan diffuusionvastuskerroin on noin yksi, joten tiili-villa-tiili-ulkoseinärakenteilla vesihöyrynvastus alenee siirryttäessä sisäpinnasta kohti ulkopintaa, myös ilman varsinaista höyrynsulkukerrosta.

Lisäksi ulkoseinärakenteen tulee toimia siten, että rakenteeseen mahdollisesti tunkeutuneen kosteuden on mahdollista poistua rakenteesta aiheuttamatta vaurioita itse rakenteelle (RIL 107-2012). Kosteusteknistä toimivuutta parannetaan lämmöneristekerroksen ulkopuolelle sijoituvalla, ulkoilmaan avoimella tuuletusraolla. Tuuletusraossa tapahtuva ilmanvaihtuvuus alentaa rakenteen sisäosien kosteusrasitusta, sekä parantaa rakenteen kuivumista. Tiili-villa-tiili –ulkoseinärakenteessa kosteuden tunkeutuminen rakenteeseen on sisäilman lisäksi todennäköistä myös ulkoilmasta tiiliverhouksen läpi, johtuen tiilen huokosrakenteesta ja suuresta kapillaarisesta vedenimukyvyystä. Näin ollen tuuletusraon tehtävänä on pienentää myös ulkoilmasta peräisin olevan kosteuden siirtymistä syvemmälle ulkoseinärakenteeseen. (Nevander & Elmarsson 1994, RIL 107-2012)

Tässä tutkimuksessa tuuletusraon ilmanvaihtuvuudet, sekä viistosadealtistus määriteltiin vain eteläpuoleiselle julkisivulle, jota voidaan tiiliverhotulle ulkoseinärakenteelle pitää kaikista kriittisimpänä ilmansuuntana tarkasteltaessa rakenteen ulkopinnan sekä rakenteen sisäosien kosteusteknistä toimintaa. Eteläpuoleiselle julkisivulle kohdistuva viistosaderasitus ja auringonsäteily ovat ilmansuunnista voimakkaimmat. Viistosateen kastelemassa tiiliverhouksessa vesihöyryn osapaine on hyvin korkea ja se pyrkii tasaantumaan diffuusiolla rakenteen sisäosiin päin, missä lämpötila on matalampi. Auringonsäteily sateen jälkeen kasvattaa lämpötilaeroa ja voimistaa diffuusiota, jolloin seurauksena voi olla kosteuden kondensoituminen rakenteen sisälle. Tätä ilmiötä kutsutaan kesä-kondenssiksi. Kosteuden siirtymistä seinän sisäosiin voimistaa myös tiiliverhottujen rakenteiden alhainen ilmanvaihtuvuus tuuletusraossa. (Vinha et al. 2013)

#### **4.2.1 Ilman ja epäpuhtauksien siirtyminen seinärakenteen läpi**

Puhtaaksimuurattuja tiili- ja harkkoseiniä ei voida pitää ilmatiiviinä rakennekerroksena. Ilmanläpäisevyyden arvot vaihtelevat voimakkaasti valitun tiilen ja laastin ominaisuuksien, sekä muuraustyön huolellisuuden suhteen (Hens et al. 2007). Tiiliverhouksen läpi tapahtuvien ilmavuotojen jakaantumista tiilen ja muurauslaastin välillä on tutkittu kenttä-tutkimuksessa (Dickson 1981). Tulokset osoittivat, että muurauksen pystysaumojen kautta tapahtui 43 % tiiliverhotun seinän ilmavuodoista, vaikka pystysaumot muodostivat vain 4 % tiiliverhouksen pinta-alasta, vastaavat prosentuaaliset osuudet vaaka-saumoissa oli 36 % / 13 % ja tiilen osalta 21 % / 83 %. Eli muuraussaumojen kautta tapahtui ilmavuodoista lähes 80 %, vaikka muuraussaumojen pinta-ala koko seinän pinta-alasta on alle viidennes.

Tiili- ja harkkoseinien kohdalla rakenteen toiminnan kannalta riittävä ilmanpitävyys saadaan aikaan erillisellä pintakäsittelykerroksella (Aho & Korpi 2009). Tässä tutkimuksessa käsiteltävän 1960-1980-luvun tiili-villa-tiili-ulkoseinärakenteen ilmansulkuna toimii tyypillisesti kantavan sisäkuoren pinnassa tasoite/rappaus- ja maalikerros. Ikkuna- ja oviliittymät ovat tavallisesti tiivistetty elastisella saumausaineella, polyuretaanivaahdolla tai mineraalivillalla. Ulkoseinän ja yläpohjan välisissä liitoksissa ilmanpitävyys on pyritty varmistamaan, joko yläpohjan höyrynsulun ulottamiselle sisäkuoren taakse (puurakenteinen yläpohja) tai elastisella saumausmassalla ja laastitäytöllä (kivirakenteinen yläpohja) (Laine & Ylä-Mattila 1982). Ulkoseinän ja sokkelin välille asennettu, vuotoveden pois johtamiseksi tarkoitettu bitumikermikaista parantaa seinän alaosan ilmanpitävyyttä liitos-alueella (RT 82-10510 1993).

Sisäkuoren ilmanläpäisevyyden arvoja epäideaalirakenteen ilmavuototarkasteluissa varioitiin lähteessä Hens et al. (2007) esitettyjen arvojen mukaisesti riippuen sisäkuoren mahdollisesta pintakäsittelystä. Käytetyt ilmanläpäisevyyden arvot ovat esitetty taulukossa 4.1.

**Taulukko 4.1.** Ilmavuototarkasteluissa käytetyt sisäkuoren ilmanläpäisevyydet. (Hens et al. 2007)

Sisäkuoren ominaisuudet	Ilmanläpäisykerroin ( $\text{m}^3/(\text{m}^2\text{sPa}^n)$ )	Virtauksesta johtuva eksponentti $n$
Sisäkuori puhtaaksimuurattu ja saumattu	4,00E-5	0,8
Sisäkuori rapattu	1,00E-5	0,8

Sisäkuoren läpi tapahtuva vuotoilmavirta tunnissa  $q$  ( $\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ) saadaan nyt laskettua kaavalla (Hens et al. 2007):

$$q = 3600K_a\Delta p^n \quad (4.1)$$

missä

$K_a$  on sisäkuoren ilmanläpäisykerroin ( $\text{m}^3/(\text{m}^2\text{sPa}^n)$ )

$\Delta p$  on paine-ero rakennuksen vaipan yli (Pa)

$n$  on virtauksesta johtuva eksponentti

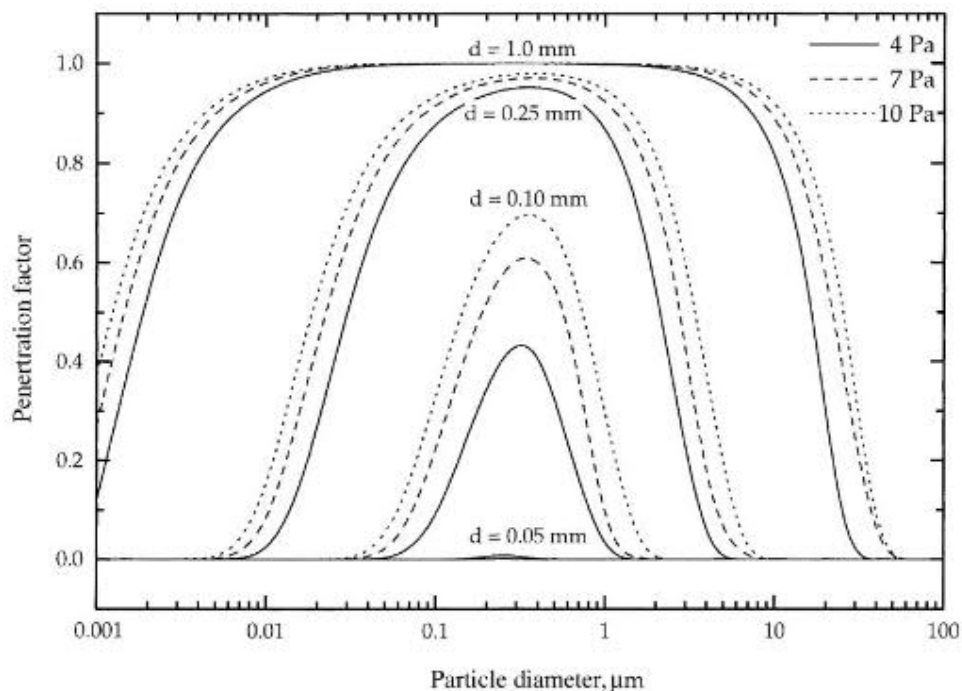
Taulukossa 4.1. esitetyt sisäkuoren ilmanläpäisevyyden arvot  $q_{50}$  -luvulla ilmaistuna ovat puhtaaksimuuratun sisäkuoren tapauksessa  $3,4 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$  ja rapatun sisäkuoren tapauksessa  $0,8 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ .

Kenttätutkimuksilla on kartoitettu yleisimpiä ilmavuotoreittejä pientaloissa ja kerrostaloissa vaipparakenteen yli, sisä- ja ulkoilman välillä. Tutkimuksen perusteella yleisimpiä ilmavuotoreittejä ovat ikkunat ja ovet, sekä näiden liittymät ulkoseinärakenteeseen. Ikkunoiden ja ovien osuus kaikista havaituista ilmavuodoista oli pientaloissa 65 % ja kerrostaloissa 89 %, rakennuksen ilmanvaihdon ollessa normaalitilassa. Lisäksi ilmavuotoja esiintyy pientaloissa ulkoseinien liittymisissä ylä- ja välipohjiin. (Vinha et al. 2009)

Partikkeleiden tunkeutumista rakennusvaipan rakojen ja halkeamien kautta ilmavuotojen mukana on tutkittu eri tavoin. Sisä- ja ulkoilmassa esiintyvien partikkeleiden välistä suhdetta on havainnointi muun muassa kenttätutkimuksessa (Long et al. 2001), partikkeleiden kulkeutumista ilmavuotoreittien läpi on simuloitu laboratorio-olosuhteissa esimer-

kiksi tutkimuksissa (Mosley et al. 2001, Liu & Nazaroff 2003). Epäpuhtauksien kulkeutusta ilmavuotoreittien läpi on tarkasteltu myös laskennallisesti (Liu & Nazaroff 2001). Kenttätutkimuksien perusteella tehtävät johtopäätökset sisältävät kuitenkin huomattavaa epävarmuutta johtuen lukuisten muuttujien aiheuttamista poikkeavuuksista tarkasteltaessa epäpuhtauksien kulkeutumista rakojen kautta sisäilmaan. Näin ollen tuloksista ei voida tehdä johtopäätöksiä yleisellä tasolla. Laboratorio-olosuhteissa tehdyt kokeet tai laskennalliset mallit puolestaan ovat ideaalitulosten tarkasteluita, joissa muuttujien määrää on suppea ja olosuhteet vakiot verrattuna reaali maailman tilanteeseen. Mallien avulla on kuitenkin mahdollista saada käsitys muun muassa rakojen koon ja paine-erojen merkityksestä. (Nazaroff 2004)

Tutkimustulosten johtopäätöksenä Nazaroffin mukaan (2004) voidaan esittää raon leveyden, pituuden ja raon yli vallitsevan paine-eron vaikuttavan merkittävästi tunkeutuneiden partikkeleiden kokonaismäärään, sekä kokojakaumaan. Liu & Nazaroff (2001) ovat matemaattisilla malleillaan osoittaneet partikkeleiden tunkeutumisasteen olevan kytköksissä raon leveyteen, partikkeleiden kokoon ja raon läpi vallitsevaan paine-eroon kuvan 4.11 mukaisesti. Kuvasta voidaan havaita raon leveyden kasvaessa tunkeutuneiden partikkeleiden kokojakauman laajenevan voimakkaasti.



**Kuva 4.11.** Partikkeleiden tunkeutumisaste partikkeleiden halkaisijan, raon leveyden ja paine-eron funktiona esitettynä. Raon pituudeksi on valittu 3 cm. (Liu & Nazaroff 2001)

Mosley et al. (2001) ovat myös laboratorio-olosuhteissa osoittaneet paine-eron selkeän vaikutuksen rakojen kautta tunkeutuvien partikkeleiden määrään ja kokoon. Koejärjestelyissä havaittiin 0,508 mm leveään, 433 mm korkean ja 102 mm syvän raon kautta 2 Pa

paine-erolla vain 2 % osuuden 2 µm kokoisista partikkeleista ja 0,1 % osuuden 5 µm kokoisista partikkeleista tunkeutuvan raon läpi. Paine-eron ollessa 5 Pa vastaavat osuudet olivat 40 % / <1 %, 10 Pa paine-erolla 85 % / <1% ja 20 Pa paine-erolla 90 % / 9 %.

Referenssinä partikkeleiden kokoon liittyen voidaan todeta hengitettävien hiukkasten olevan kooltaan alle 10 µm ja pienhiukkasten alle 2,5 µm. Pienhiukkasista suurin osa aiheutuu taajama-alueilla liikenteestä. Liikenteen aiheuttamia ovat muun muassa noki-, öljy- ja raskasmetallihiukkaset. Hiukkaset voivat olla myös kuitumaisia ja peräisin esimerkiksi lämmöneristeenä käytetystä mineraalivillasta tai mikrobien aineenvaihduntatuotteista. (Ympäristöopas 2016)

## 4.2.2 Tuuletusraon ilmanvaihtuvuus

Kerroksellisessa ulkoseinärakenteessa tuuletusraon tarkoituksena on ilmaa vaihtamalla parantaa seinärakenteen kuivumispotentiaalia, ehkäistä ulkoilman kosteuden tunkeutuminen sisemmälle rakennekerrokseen, sekä tasata paine-eroja (Straube & Finch 2009). Ehtona tuuletusraon tarkoituksenmukaiselle toiminnalle ilmanvaihtuvuuden lisäksi on se, että tuuletusraossa vallitsee alhaisempi vesihöyrypitoisuus kuin tuuletusrakoon rajautuvien rakenteiden haihduttavilla pinnoilla. Tuuletusrako mahdollistaa sisäilmasta lämmöneristeeseen diffuusiolla siirtyvän kosteuden siirtymisen ilmavirtauksien mukana ulkoilmaan siten, ettei haitallista kondenssia pääse syntymään lämmöneristeen kylmällä puolella. Vastaavasti kesäaikaan auringon lämmittämästä tiiliverhouksesta diffuusiolla kohti seinärakenteen sisäosia siirtyvä kosteus pääsee tuulettumaan eikä nk. kesäkon- denssia pääse syntymään. Tuuletusrako ohjaa voimakkaan viistosateen seurauksena tiiliverhouksen läpi mahdollisesti tunkeutuneen vuotoveden rakennuksen ulkopuolelle ehkäisten veden kapillaarisen ja/tai painovoimaisen siirtymisen seinärakenteen sisäosiin. (Salonvaara et al. 2007)

Tiili-villa-tiili –ulkoseinässä, kuten myös muissa tiiliverhotuissa ulkoseinärakenteissa tuuletusraon ilmanvaihtuvuus mahdollistetaan jättämällä ulkoilmaan rajoittuvan tiiliverhouksen alaosaan tyypillisesti joka kolmas pystysauma auki, jolloin moduulitiiltä ja 15 mm muuraussaumaa käytettäessä tuuletusaukot sijoittuvat noin 900 mm etäisyydelle toisistaan ja ovat kooltaan usein 15 x 60-85 mm, riippuen moduulitiilen korkeudesta (Tiilirakenteet 1993). Tuuletusrakoon alakautta johtunut ilma poistuu tuuletusraon avoimesta tai verkolla suojatusta yläpäästä sekä ikkunan alapuolisessa tuuletusraossa ikkunapellin alta. Tuuletusraon ilmanvaihtuvuuteen vaikuttavat useat erilaiset asiat, jotka voidaan jakaa ulkoisiin olosuhteisiin sekä seinärakenteesta ja tuuletusraon mittasuhteista ja ominaisuuksista riippuvaisiin.

Tuuletusraossa potentiaalilin ilmanvaihtuvuudelle saavat aikaan tuulen ja lämpötilan aiheuttamat paine-erot (Mayer & Kunzel 1983). Ulkoilman olosuhteista näihin vaikuttavat tuulennopeus ja –suunta, auringonsäteilyn määrä ja ilman lämpötila. Paine-erojen pyrkimässä tasaantumaan syntyy ilmavirtaus tuuletusraossa. Usein merkittävimmän osuuden ilmanvaihtuvuudesta tuuletusraossa saa aikaan tuuli, lämpötilaeron vaikuttaessa vähemmän (Straube & Burnett 1995). Poikkeuksen tähän aiheuttavat tilanteet, joissa tuuletusraon lämpötila nousee useita asteita ulkoilmaa korkeammaksi. Tällöin lämpötilan aiheuttaman paine-eron rinnalla tuulen aiheuttamaa paine-eroa voidaan pitää vähäisenä (Falk 2014). Kyseinen tilanne voi syntyä kesäkuukausina tiiliverhouksen altistuessa voimakkaalle auringon lämpösäteilylle (Vinha 2007). Huomionarvoista tuuletusraon ilmanvaihtuvuuden kannalta on se, että tuulen suunnalla on isompi merkitys, kuin tuulen voimakkuudella (Salonvaara et al. 2007). Kenttämittauksilla on osoitettu suojanpuoleisella, koilliseen päin sijoittuvalla seinällä ilmanvaihtuvuuksien olevan noin 25-40 % alhaisempia kuin tuulenpuoleisella, lounaaseen päin sijoittuvalla seinällä (Langmans et al. 2016).

Tuuli aiheuttaa tuuletusraon ala- ja yläosan välillä paine-eron  $\Delta p_{wind}$  (Pa), jonka suuruus voidaan laskea kaavalla (Falk et al. 2014, Straube et al. 2004):

$$\Delta p_{wind} = \Delta C_p \frac{\rho_a U_z^2}{2} \quad (4.2)$$

missä

$\Delta C_p$  on kerroin (-) ulkoisen tuulenpaineen erotukselle seinän ylä- ja alaosan välillä

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

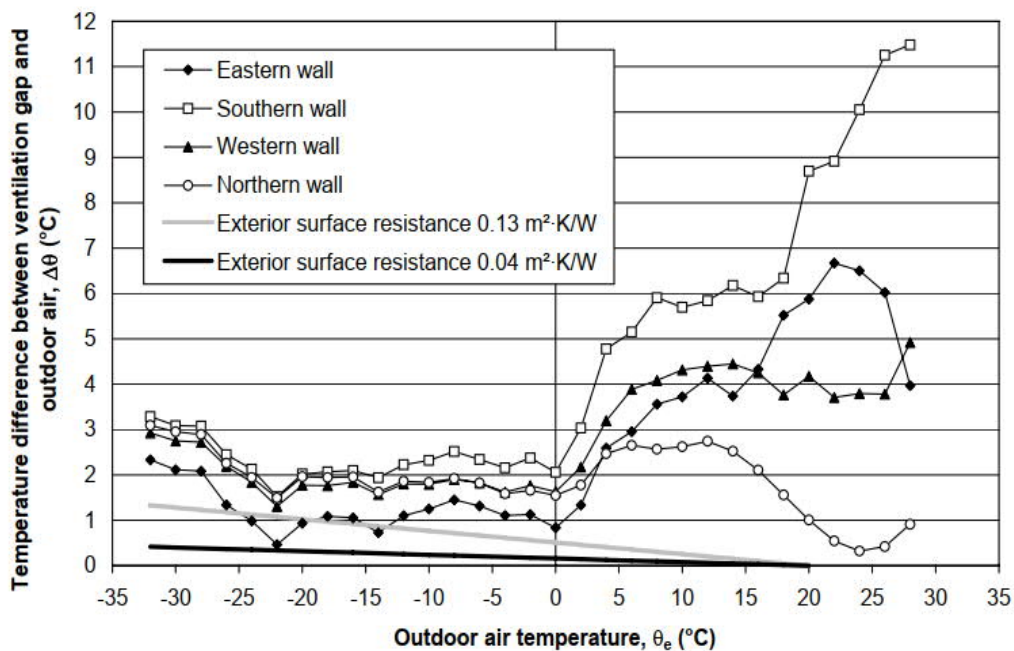
$U_z$  on tuulen nopeus tarkastelukorkeudella (m/s)

Kertoimen  $C_p$  arvolle on mahdollista määrittää arvoja tuulitunnelissa tai kenttäkokeissa. Tuulenpuoleisella seinustalla kerroin saa positiivia arvoja ja suojanpuoleisella negatiivisia, seinän yläosassa kertoimen arvot ovat suurempia kuin alaosassa (Straube & Burnett 1995). Kertoimen arvoon vaikuttavat tarkasteltavan seinärakenteen ympärillä vallitseva mikroilmasto, eli tässä tapauksessa ympäröivät rakennukset, kasvillisuus sekä muut esteet. Falk et al. (2014) ovat tutkimuksissaan havainneet seinän ylä- ja alaosan välillä olevien kertoimien erotuksen  $\Delta C_p$  vaihtelevan välillä 0,025-0,05, joten ilman tarkempia koemittauksia, voidaan  $\Delta C_p$  :n arvoksi olettaa edellisten keskiarvo: 0,0375. Tuulen nopeutena tässä tutkimuksessa käytetään Vantaan 2007 vuoden mittausdatassa esitettyjä tuulennopeuksia, jotka ovat modifioitu vastaamaan standardissa SFS-EN 1991-1-4

(2011) esitetyn maastoluokan III arvoja. Kyseinen maastoluokka vastaa esteellisyydeltään esikaupunkialueita tai kyliä. Tarkastelun kohteena olevalle eteläiselle seinustalle huomioidaan kohdistuvan tuulet suuntien  $135^{\circ}$ - $225^{\circ}$  väliltä, eli kaakon ja lounaan väliltä. Tuulen nopeutta  $U_z$  (m/s) tarkastellaan seinärakenteen yläosassa, jolloin tarkastelukorkeudet yksi- ja kaksikerroksisille rakennuksille ovat kolme ja kuusi metriä, sekä ikkunan alapuoliselle seinärakenteelle yksi metri.

Tuuletusraon lämpötilan kohoaminen ulkoilmaan nähden voimistaa ilmavirtausta, sekä alentaa tuuletusraossa liikkuvan ilman suhteellista kosteutta. Tämän seurauksena tuuletusrakoon rajatuilta pinnoilta kosteuden haihtuminen voimistuu ja rakenteen kuivumis-potentiaali kasvaa. Tuuletusraon lämpötilaan vaikuttavat auringonsäteily, tiiliverhouksen lämmönvastus ja absorptiokerroin, sekä rakennuksen läpi tapahtuvien lämpöhäviöiden suuruus. Auringonsäteilyn vaikutus tuuletusraon lämpötilaan riippuu voimakkaasti tiilen absorptiokertoimesta. Seinärakenteen kuivumisen on havaittu olevan kaksi kertaa nopeampaa tummasävyisillä tiilillä, joilla absorptiokertoimena on käytetty arvoa 0,9, kuin vaaleilla tiilillä absorptiokertoimella 0,25. (Falk 2014)

Tässä tutkimuksessa tuuletusraon ilmanvaihtuvuutta määriteltäessä tuuletusraon lämpötilan arvoina käytetään Vinhan (2007) määrittämiä keskimääräisiä lämpötilaeroja ulkoilman ja eteläsuuntaisen punaisen tiiliverhouksen takana sijaitsevan tuuletusraon välillä. Kuvassa 4.12 on esitetty myös pintavastuksien vaikutus lämpötilaeroihin ulkolämpötilan funktiona.



**Kuva 4.12.** Tiiliverhotun ulkoseinän tuuletusraon lämpötilan ja ulkolämpötilan välisen erotuksen keskiarvo, sekä pintavastuksien merkitys lämpötilaeroon ulkolämpötilan funktiona. (Vinha 2007)

Lämpötilan aiheuttama paine-ero  $\Delta p_b$  (Pa) tuuletusraon ala- ja yläosan välillä voidaan laskea kaavalla (Falk 2014, Straube et al. 2004):

$$\Delta p_b = 3462 \left( \frac{1}{T_{out}} - \frac{1}{T_{cm}} \right) h \quad (4.3)$$

missä

- $T_{out}$  on ulkoilman lämpötila (K)
- $T_{cm}$  on tuuletusraon lämpötila (K)
- $h$  on tuuletusraon korkeus (m)

Tuuletusraossa tapahtuvan ilmanvaihtuvuuden kokonaispotentiaali  $\Delta p_{driv}$  (Pa) voidaan näin ollen esittää tuulen aiheuttaman paine-eron ja lämpötilan aiheuttaman paine-eron summana:

$$\Delta p_{driv} = \Delta p_{wind} + \Delta p_b \quad (4.4)$$

Tuulenpuoleisella seinällä tuulenpaine on suurempi seinän yläosassa kuin alaosassa, jolloin tuuletusraon yläpäähän syntynyt ylipaine pyrkii tasaantumaan alaspäin eli vastakkaiseen suuntaan kuin lämpötilaeron aiheuttama paine-ero. Tuulen aiheuttama paine-ero voi olla suurempi kuin lämpötilaeron aiheuttama paine-ero, jolloin ilmanvaihtuvuus tuuletusraossa tapahtuu ylhäältä alaspäin. Suojanpuoleisella seinällä tilanne on tuulen aiheuttaman imuvaikutuksen osalta päinvastainen ja silloin tuuli sekä lämpötila saavat aikaan samansuuntaisen ilmavirtauksen. Tuulensuuntaisilla seinillä tuuli kohdistaa seinään, joko imua tai painetta, jolloin tuuletusraon ilmanvaihtuvuutta tarkasteltaessa voidaan yksinkertaistuksen vuoksi tuuli jättää huomioimatta ja tarkastella vain lämpötilaeron aiheuttamaa paine-eroa. (Straube et al. 2004)

Ilmanvirtausta tuuletusraossa rajoittavat sisään- ja ulosvirtausaukoissa tapahtuvat kerhäviiöt, sekä tuuletusraossa tapahtuvat kitkahäviiöt. Näiden painehäviiöiden suuruuteen vaikuttavat ilman tilavuusvirta sekä tuuletusraon ja tuuletusaukkojen mittasuhteet. Lisäksi tuuletusraossa olevat laastipurseet tai muut mahdolliset esteet lisäävät ilmavirtauksen kitkaa, jolloin painehäviiö tuuletusraossa kasvaa. Tuuletusraon ilmanvaihtuvuus heikkenee pystysuoran tuuletusraon korkeuden kasvaessa (Straube & Burnett 1995). Tuuletusraon ilmanvaihtuvuutta voidaan ensisijaisesti parantaa lisäämällä tuuletusaukkojen lukumäärää, sekä kasvattamalla jo olemassa olevien aukkojen kokoa ja varmistamalla aukkojen ja tuuletusraon avonaisuus.



Tuuletusraossa tapahtuvien painehäviöiden laskennallista tarkastelua varten muun muassa Kronvall (1980) ja Straube & Burnett (1995) ovat esittäneet empiirisiä kaavoja, joilla voidaan laskennallisesti arvioida tuuletusraon kitkahäviöiden, sekä sisään- ja ulosvirtausaukoissa tapahtuvien kertahäviöiden suuruutta, joiden summana saadaan tuuletusraossa tapahtuva kokonaispainehäviö  $\Delta p_{tot}$  (Pa) selville. Van Straatenin (2003) esittämä kaava perustuu Strauben ja Burnettin (1995) aiemmin tehtyihin laboratoriomittauksiin ja näiden tulosten perusteella laadittuun kaavaan:

$$\Delta p_{tot} = \left( \frac{R_a}{0,6h_{v1}w_{v1}} \right)^2 + \frac{32k_f R_a \eta_a h}{\gamma_c 4d^3 w_c} + \left( \frac{R_a}{0,6h_{v2}w_{v2}} \right)^2 \quad (4.5)$$

missä

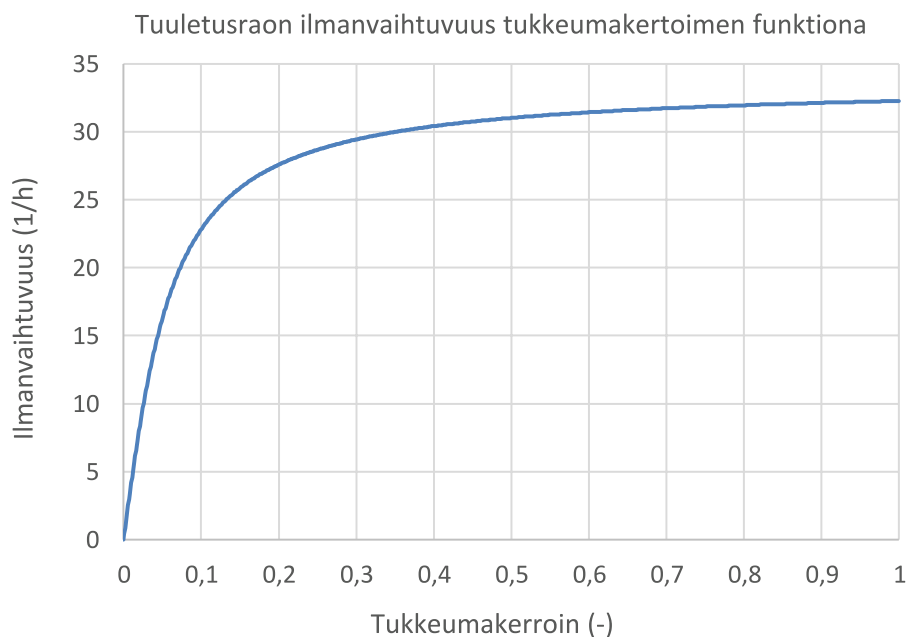
- $R_a$  on ilman tilavuusvirta tuuletusraossa (m<sup>3</sup>/s)
- $h_{v1}$  on alaosan tuuletusaukon korkeus (m)
- $w_{v1}$  on alaosan tuuletusaukon leveys (m)
- $k_f$  on korjauskerroin tuuletusraon korkeuden ja leveyden suhteen (-), laminaarinen virtaus leveässä ilmaraossa:  $k_f = 1,5$
- $\eta_a$  ilman dynaaminen viskositeetti  $\mu = 17,5 \times 10^{-6}$  N·s/m<sup>2</sup>
- $h$  on pystysuuntaisen tuuletusraon korkeus (m)
- $\gamma_c$  on tukkeumakerroin (-)
- $d$  on pystysuuntaisen tuuletusraon paksuus (m)
- $w_c$  on pystysuuntaisen tuuletusraon leveys (m)
- $h_{v2}$  on yläosan tuuletusaukon korkeus (m)
- $w_{v2}$  on yläosan tuuletusaukon leveys (m)

Suomessa tiiliverhottujen seinärakenteiden yläpää on usein täysin avonainen, jolloin ulosvirtaus ei aiheuta merkittäviä kertahäviöitä ja näin ollen edeltävästä kaavasta voidaan jättää viimeinen termi eli yläosan tuuletusaukkojen aiheuttama kertahäviö huomioidatta:

$$\Delta p_{tot} = \left( \frac{R_a}{0,6h_{v1}w_{v1}} \right)^2 + \frac{32k_f R_a \eta_a h}{\gamma_c 4d^3 w_c} \quad (4.6)$$

Edeltävissä kaavoissa (4.5 ja 4.6) ilmanvirtausta käsitellään laminaarisena, jota voidaan pitää riittävänä oletuksena tuuletusraossa siirtyvän virtauksen tyyppille (Straube et al. 2004). Lisäksi ilmavirtauksen ajatellaan jakaantuvan tuuletusrakoon tasaisesti, sekä liikuvan vain pystysuuntaisesti. Ilmavirtauksen suuruuden oletetaan säilyvän samana sisään- ja ulosvirtausaukoissa kuin tuuletusraossa. (Van Straaten 2003)

Tukkeumakertoimella  $\gamma_c$  kaavassa pyritään huomioimaan tiiliverhoillun ulkoseinärakenteen tuuletusraossa mahdolliset laastipurseet, jotka lisäävät ilmavirtauksen kitkaa heikentäen ilmanvaihtuvuutta. Straube & Burnett (1995) esittävät tukkeumakertoimen arvoksi 0,8:aa ammattitaidolla tehdyille muuraukselle, jossa kuitenkin esiintyy vähäisissä määrin muurauslaastin ulostyöntymistä tiilien väleistä tuuletusrakoon päin. Tukkeumakertoimen määrittämiseen liittyy suurta epävarmuutta, joka edelleen heijastuu kaavan 4.6 antamaan tulokseen kokonaispainehäviön suuruudesta. Tukkeumakertoimen vaikutusta tuuletusraon ilmanvaihtuvuuteen on havainnollistettu alla olevalla kuvalla 4.13. Kuvasta voidaan huomata kertoimen vaikuttavan ilmanvaihtuvuuteen voimakkaasti vasta hyvin pienillä tukkeumakertoimen arvoilla. Tämä ilmiö selittyy tarkastelemalla tuuletusraon kokonaispainehäviöitä. Kokonaispainehäviöistä suurin osa aiheutuu alaosan tuuletusaukoissa kertahäviöinä, joten tukkeumakertoimen arvo on asetettava hyvin pieneksi, jotta tuuletusraossa tapahtuva kitkahäviö ylittää samaan suuruusluokkaan alaosan tuuletusaukoissa tapahtuvien kertahäviöiden kanssa.



**Kuva 4.13.** Tukkeumakertoimen vaikutus tuuletusraon ilmanvaihtuvuuteen.

Tiiliverhoiltuihin ulkoseinärakenteisiin tehtyjen rakenneavausten perusteella voidaan kuitenkin todeta, että tuuletusrakoon tunkeutuvien laastipurseiden määrässä ja näiden vaikutuksesta ilmanvaihtuvuuteen on suurta hajontaa. Tutkimustulokset osoittavat, että tuuletusraossa kitkahäviöt kasvavat merkittävästi, kun laastipurseet tukkivat yli puolet 25 mm paksusta tuuletusraosta. Tukkeutuneen osuuden ollessa tätä pienempi kitkahäviöt ovat vähäisiä (Straube et al. 2004). Tässä tutkimuksessa tehdään tarkasteluja rakenteille, joissa 20 mm paksun tuuletusraon ilmanvaihtuvuuden oletetaan heikkenevän laastipurseiden takia kymmenesosaan avoimen tuuletusraon ilmanvaihtuvuudesta.

Kun kaavoille 4.4 ja 4.6 asetetaan seuraava ehto, voidaan ilmavirtauksen suuruus  $R_a$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) ratkaista toisen asteen yhtälönä:

$$\Delta p_{driv} = \Delta p_{tot} \quad (4.7)$$

Nyt ilmanvaihtuvuus  $n$  (1/h) tuuletusraossa voidaan laskea seuraavasti, kun tunnetaan ilman tilavuusvirta  $R_a$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) ja tuuletusraon dimensiot:

$$n = \frac{3600}{w_c dh} R_a \quad (4.8)$$

Aikaisemmissa tutkimuksissa, joissa on kenttäkokein tai laskennallisesti määritetty tiiliverhotun tuuletusraon ilmanvaihtuvuudelle arvoja tulokset ovat vaihdelleet välillä 0-40 vaihtoa tunnissa etelänpuoleisella julkisivulla. Tuuletusraon paksuuden vaihdellessa välillä 20-50 mm (Sandin 1991, Straube 2004, Salonvaara et al. 2007, Straube & Finch 2009, Mäkitalo 2012, Jokela 2018). Vertailtaessa tiiliverhouksen ja paneelijulkisivun takana tuuletusraossa ilmanvaihtuvuuden arvoja maaliskesäkuun välisenä aikana lounaisseinällä eroja voidaan pitää merkittävinä. Tiiliverhouksen takana ilmanvaihtuvuuden arvot pysyttelivät mittausjaksosta 70 % vastaavan ajan välillä 3,3-11,6 vaihtoa tunnissa, paneelijulkisivussa vastaavan arvon vaihdellessa välillä 151-592. (Langmans et al. 2016) Ero selittyyneen suurelta osin ulkoseinän alaosan tuuletusaukkojen kokoerona. Paneelijulkisivujen alaosa on lähes koko tuuletusraon pituudelta avoin, jolloin alaosan tuuletusaukoissa tapahtuvat kertahäviöt jäävät vähäisiksi toisin kuin tiiliverhotuissa julkisivuissa.

Tässä kappaleessa esitettyjen kaavojen perusteella määritetyt tuuletusraon ilmanvaihtuvuudet Vantaan 2007 testivuoden olosuhteissa ovat esitetty alla olevassa taulukossa 4.2 kolme ja kuusi metriä korkeille yksi- ja kaksikerroksisille etelänpuoleisille ulkoseinärakenteille. Lisäksi ilmanvaihtuvuuden arvot ovat laskettu ikkuna-aukkojen alapuolisessa tuuletusraossa, jossa yhtämittaisen tiiliverhouksen korkeudeksi on oletettu yksi metri. Tuuletusraon paksuudeksi on valittu 20 ja 40 mm. 20 mm tuuletusrako edustaa vanhoja 1960-1980-luvun rakenteita, jolloin varsinaisesta tuuletusraosta ei erikseen puhuttu, vaan 20 mm rakoa lämmöneristekerroksen ja tiiliverhouksen välillä perusteltiin työtekniisillä seikoilla, jotta muuraustyö olisi helpompaa (Laine & Ylä-Mattila 1982). 40 mm tuuletusrako edustaa nykyohjeiden mukaista suositusta, tiiliverhotuille seinärakenteille, jotka altistuvat voimakkaalle viistosateelle (RIL 107-2012).

Tuloksista voidaan havaita ilmanvaihtuvuuden heikentyvän seinän korkeuden ja/tai tuuletusraon paksuuden kasvaessa, koska tilavuudeltaan suurempi tuuletusraon ilmatila vaatii suuremman ilman tilavuusvirran saavuttaakseen saman ilmanvaihtuvuuden kuin

tilavuudeltaan pienempi tuuletusrako. Ilman tilavuusvirran oletetaan säilyvän tuuletusraossa vakiona kaikilla tuuletusraon mittasuhteilla, kun tuuletusaukkojen pinta-ala säilyy muuttumattomana. Ilman tilavuusvirta tuuletusraossa on voimakkaasti riippuvainen seinän alaosan tuuletusaukkojen yhteenlasketusta avoimesta pinta-alasta. Tiiliverhouksen alaosan tuuletusaukkojen pinta-alan kasvattaminen mahdollistaa ilman tilavuusvirran lisääntymisen, jonka seurauksena avoimen tuuletusraon ilmanvaihtuvuus voimistuu merkittävästi. Vertailtaessa tämän tutkimuksen puitteissa määritellyjä ilmanvaihtuvuuden arvoja aiemmin kirjallisuudessa esitettyihin arvoihin, voidaan todeta arvojen vastaavan hyvin toisiaan.

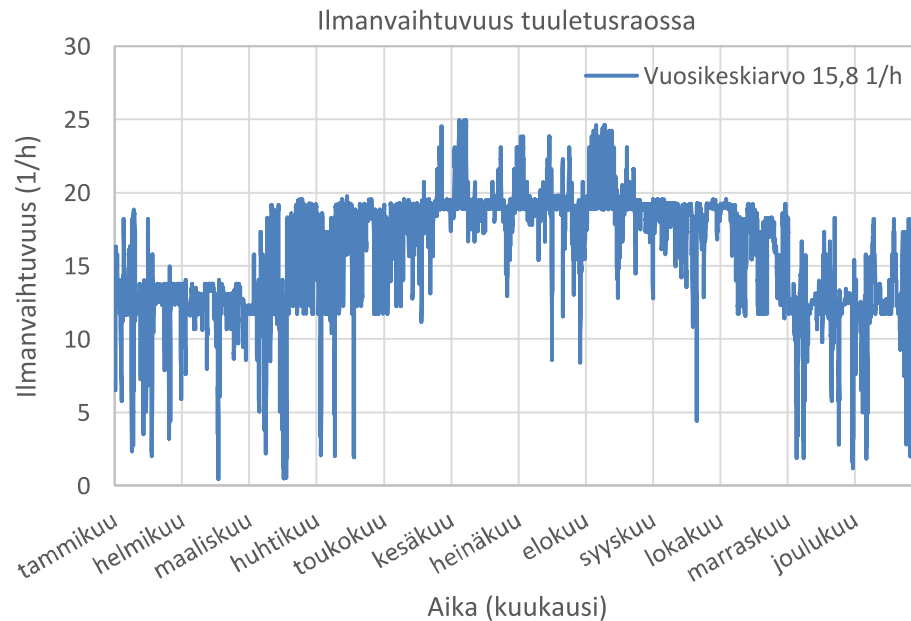
Tiiliverhouksen yläosan tuuletusaukko ei aiheuta ilmanvaihtuvuuksiin merkittäviä kerta-äviöitä niin kauan, kun yläosan tuuletusaukon pinta-ala pysyy suurempana kuin alaosan tuuletusaukon pinta-ala. Ikkunan alapuolisessa rakenteessa mahdollinen ikkunapellin virheellinen asennus huomioitiin olettamalla tiiliverhouksen ja ikkunapellin välinen tuuletusaukko 1 mm korkuiseksi. Tämä aiheuttaa tuuletusaukossa kertahäviön, joka alentaa tuuletusraon ilmanvaihtuvuutta.

**Taulukko 4.2.** Laskentatarkasteluissa käytetyt tuuletusraon ilmanvaihtuvuuksien vuosikeskiarvot etelänpuoleisella seinustalla.

Tuuletusraon paksuus ja ominaisuudet	Ikkunan alla / 1,0 m	1-kerroksinen / 3,0 m	2-kerroksinen / 6,0 m
20 mm laastipurseiden täyttämä tuuletusrako	5,2 1/h	3,0 1/h	2,1 1/h
20 mm avoin tuuletusrako	52,4 1/h	30,3 1/h	21,3 1/h
40 mm avoin tuuletusrako, ikkunapellin alla 1 mm rako	10,0 1/h	-	-
40 mm avoin tuuletusrako	26,9 1/h	15,8 1/h	11,3 1/h
40 mm avoin tuuletusrako, alimman tiilirivin kaikki pystysaummat auki	80,1 1/h	46,9 1/h	33,4 1/h

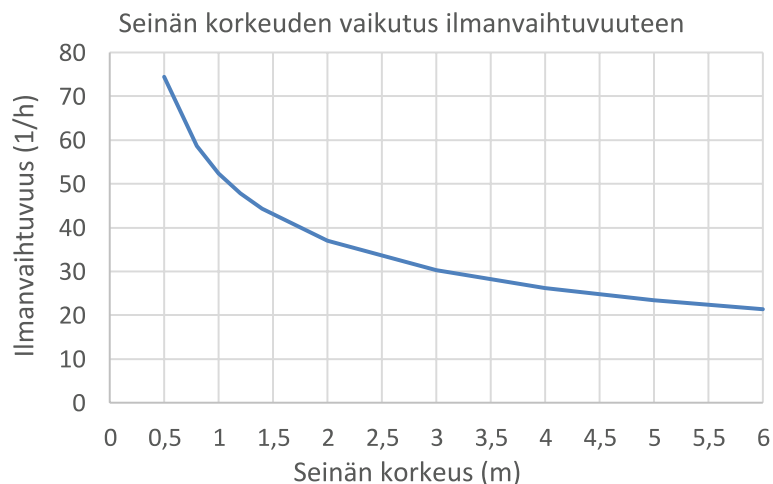
Tuuletusraon ilmanvaihtuvuuden arvoissa tapahtuu muutoksia vuodenaikojen suhteen. Alla olevassa kuvassa 4.14 on esitetty tuuletusraon ilmanvaihtuvuuden tunnitaiset arvot vuoden mittaisen tarkastelujakson ajalta. Kesäkuukausina, kun etelänpuoleiselle julkisivulle kohdistuva auringonsäteily on voimakkaimmillaan kasvaa lämpötilaero ulkoilman ja tuuletusraon välillä suuremmaksi kuin talvikuukausina. Tästä seuraa lämpötilan aiheuttaman paine-eron voimistuminen tuuletusraon ala- ja yläosan välillä, jonka seurauksena

ilmanvaihtuvuuden arvot kasvavat. Voimakkaiden tuulenpuuskien vaikutus nähdään kuvassa 4.14 terävinä piikkeinä, jotka hetkittäisesti vaikuttavat ilmanvaihtuvuuden arvoihin.



**Kuva 4.14.** Tuuletusraon ilmanvaihtuvuudet eteläpuoleisella seinällä vaihtelevat vuodenaikojen mukaan. Kuvassa on esitetty kolme metriä korkean tuuletusraon ilmanvaihtuvuus ajan funktiona, kun tuuletusraon paksuus on 40 mm.

Alla olevassa kuvassa 4.15 on havainnollistettu seinän korkeuden vaikutusta tuuletusraon keskimääräiseen ilmanvaihtuvuuteen, kun ilmanvaihtuvuus lasketaan tässä kaapaleessa aiemmin esitettyjen kaavojen mukaisesti. Ilmanvaihtuvuuden arvojen havaitaan muuttuvan voimakkaasti, kun tarkastellaan esimerkiksi ikkunan alapuolista seinärakennetta, jossa yhtenäisen tuuletusraon korkeus vaihtelee usein 0,5 – 1,0 metrin välillä. Edellä mainitussa tilanteessa ilmanvaihtuvuuden prosentuaalinen muutos vastaa likimain eroa yksi- ja kaksikerroksisen seinän välillä, joissa tuuletusraon korkeudet ovat 3 ja 6 metriä.



**Kuva 4.15.** Seinän korkeuden vaikutus tuuletusraon ilmanvaihtuvuuteen.

### 4.2.3 Tiiliverhouksen altistuminen viistosateelle

Viistosateen pystyrakenteita kastelevaa vaikutusta voidaan pitää tärkeimpänä rakennuksen vaippaan kohdistuvana rasiustekijänä. Viistosateen merkitys on näin ollen kiistaton ulkoseinärakenteen lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan, sekä pitkäaikaiskestävyyden kannalta. Tämä korostuu etenkin tiiliverhotuilla rakenteilla, joissa viistosateen on mahdollista päästä tunkeutumaan tiiliverhouksen läpi tuuletusrakoon ja lämmöneristekerrokseen johtuen tiilen huokoisuudesta, suuresta kapillaarisesta imukyvystä, sekä mahdollisesti tiiliverhouksessa esiintyvistä raoista ja halkeamista. (Blocken & Carmeliet 2004).

Viistosade on ilmiönä monimutkainen, lukuisten muuttujien välinen summa. Viistosadetutkimuksessa ilmiö voidaan jakaa kahteen osaan, joissa ensimmäisessä pyritään määrittämään viistosateen intensiteettiä ennen julkisivuverhoukseen törmäämistä ja toisessa viistosateen vaikutuksia seinärakenteelle sen jälkeen, kun pisara on törmännyt julkisivuverhoukseen. Ensin mainittuun osioon vaikuttavat ympäristön, rakennuksen ja julkisivun geometriat, ilmansuunta, sekä meteorologiset parametrit kuten tuulennopeus ja –suunta, sateen intensiteetti, sekä pisaran kokojakauma. Viistosademalleja on kehitelty useita erilaisia, jotka pääosin perustuvat empiirisiin havaintoihin viistosateen intensiteetistä julkisivuverhoukselle. Erilaisia viistosademalleja on esitelty muun muassa lähteessä (Ge 2015). Useiden ja hankalasti mitattavien muuttujien sekä alati muuttuvien olosuhteiden johdosta on ymmärrettävä viistosademallien pohjalta määritetyn viistosadeintensiteetin sisältävän paljon epävarmuustekijöitä.

Tiiliverhouksen ulkopinnalle kohdistuvan sademäärän intensiteetin laskennassa hyödynnetään WUFI Pro 6.3 –ohjelmaa, joka laskee pystyrakenteelle kohdistuvan viistosateen intensiteetin  $r_{bv}$  (kg/m<sup>2</sup>·h) seuraavalla kaavalla ASHRAE Standardin 160 (2008) mukaisesti:

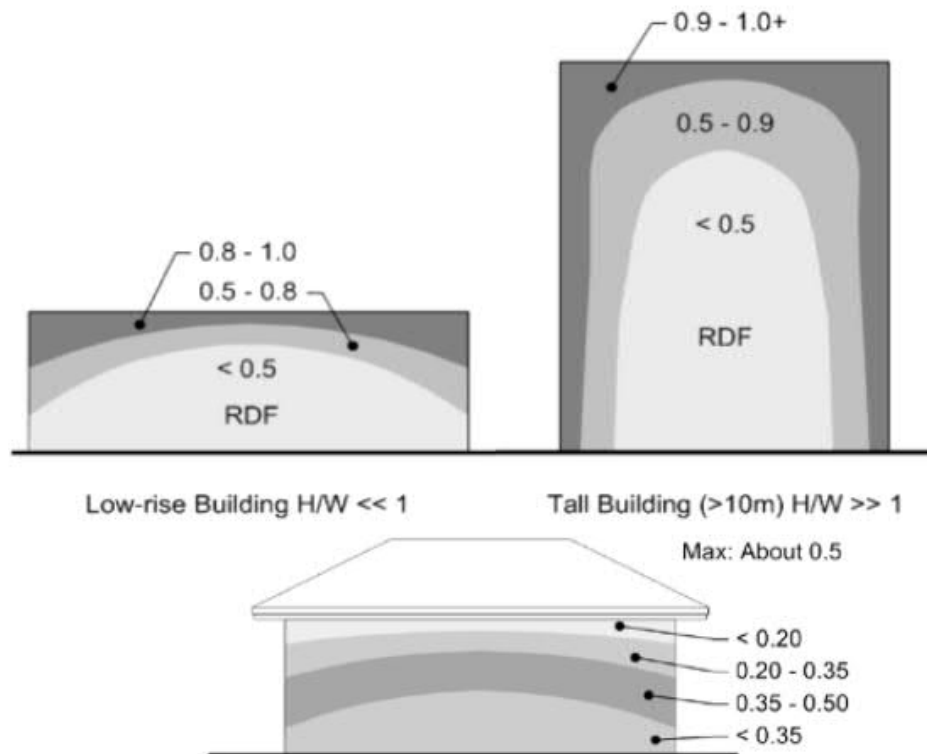
$$r_{bv} = F_E F_D F_L U_{z,10} \cos(\theta) r_h \quad (4.9)$$

missä

$F_E$	on ulkoseinän viistosateelle altistumiskerroin (-)
$F_D$	on viistosateen jakaumakerroin (-)
$F_L$	on empiirinen vakio, 0,2 (kg·s/(m <sup>3</sup> ·mm))
$U_{z,10}$	on tuulennopeus 10 m korkeudella (m/s)
$\theta$	on tuulen ja seinän normaalin välinen kulma (°)
$r_h$	on sateen intensiteetti vaakapinnalle (mm/h)

Kerroin  $F_E$  (rain exposure factor) huomioi ulkoseinän viistosateelle altistumisen ottaen huomioon ulkoseinän korkeuden ja ympäröivän maaston esteellisyyden ja suojaavan vaikutuksen. Alle 10 m korkeille ulkoseinille kerroin voi saada arvoja väliltä 0,7-1,4. Tässä tutkimuksessa valitaan kertoimelle arvoksi 1,0.

Kerroin  $F_D$  (rain deposition factor tai rain admittance factor RDF) pyrkii huomioimaan viistosateen epätasaisen jakautumisen tarkasteltavan julkisivun eri osa-alueille. Kuvassa 4.16 on esitetty tyypillisiä kertoimen arvoja seinän eri kohdissa, kertoimen arvot vaihtelevat välillä 0,2-1,0. Kuvasta voidaan myös havaita räystäsrakenteiden viistosateelta suojaava vaikutus. Tässä tutkimuksessa kertoimen arvoksi valitaan 0,5, joka edustaa alle 10 m korkea rakennusta, jossa räystäät alentavat seinän yläosaan kohdistuvaa viistosadeintensiteettiä, jolloin suurin intensiteetti kohdistuu noin puoleen väliin seinärakenteen kokonaiskorkeudesta (Straube & Burnett 2000).



**Kuva 4.16.** Viistosateen jakautuminen julkisivulle. (Straube & Burnett 2000)

Viistosateen mallintamisen toinen osio sisältää joukon julkisivun pintaan törmäämisen jälkeen pisaralle tapahtuvia mikrokooppisia ilmiöitä, jotka voidaan jakaa viiteen osatekijään kaavan 4.10 mukaisesti. Näiden osatekijöiden keskinäiset suhteet vaihtelevat riippuen julkisivuverhouksen materiaalista ja viistosateen ominaisuuksista sekä vaikutusajasta. (Blocken et al. 2013):

$$V_{drop} = V_{splash} + V_{evap} + V_{abs} + V_{adh} + V_{runoff} \quad (4.10)$$

missä

$V_{splash}$	on roiskuminen julkisivun pinnalta
$V_{evap}$	on haihtuminen julkisivun pinnalta
$V_{abs}$	on imeytyminen julkisivumateriaaliin
$V_{adh}$	on kiinnittyminen julkisivumateriaaliin
$V_{runoff}$	on valuminen julkisivumateriaalia pitkin

Viistosadealtistuksen seurauksena kosteus pääsee imeytymään tiiliverhouksen pinnasta syvemmälle rakenteeseen kapillaarisesti, painovoimaisesti ja diffuusiolla. Ulkoseinän kosteusteknisen toiminnan kannalta oleellista edellä mainituista osatekijöistä on tarkastella, kuinka suuri on tiiliverhoukseen imeytyvän kosteuden eli  $V_{abs}$  osuus. Tässä tutkimuksessa tiiliverhouksen pintaan kohdistuvasta viistosateesta oletetaan haihtuvan pois 10 prosenttia.

Lisäksi Yhdysvalloista peräisin oleva ASHRAE 160 Standardi (2008) suosittelee huomioidaan tiiliverhouksen läpi mahdollisten halkeamien ja rakojen kautta konvektiolla tunkeutuvan kosteuden. Tunkeutuneen kosteuden määräksi standardi ehdottaa käyttämään yhden prosentin osuutta viistosateen kokonaisintensiteetistä. Tässä tutkimuksessa tul- laan tarkastelemaan kyseisen standardin suositusta ja sen vaikutuksia rakenteen kosteustekniseen käyttäytymiseen.



## 5. LASKENTATARKASTELUT

Ulkoseinärakenteen laskentatarkastelut toteutettiin Tampereen yliopiston rakennusfysiikan tutkimusryhmän tiloissa syksyn 2019 aikana käyttäen kahta erilaista laskentaohjelmaa. Laskentatarkastelut voidaan jakaa ensimmäiseen ja toiseen vaiheeseen. Ensimmäisessä vaiheessa tarkasteltavia tiili-villa-tiili-ulkoseinärakenteita käsiteltiin ideaalirakenteina, jolloin seinärakenteen läpi ei oletettu tapahtuvan ilmavuotoja. Tämän seurauksena lämmön- ja kosteudensiirtomekanismeista konvektiota ei ensimmäisen vaiheen laskentamalleissa ollut tarpeellista huomioida. Ensimmäisen vaiheen laskentatarkastelut suoritettiin Comsolilla ja laskentatuloksia vertailtiin Wufilla määritettyihin lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvoihin vastaavassa tarkastelupisteessä. Laskentatarkastelujen toisessa vaiheessa tiili-villa-tiili –ulkoseinärakenteeseen lisättiin rakenteelle tyyppisiä ilmavuotoreittejä. Ilmavuotoreittien kautta siirtyvää ilman määrää verrattiin sisäkuoren läpi siirtyvään ilmamäärään muuttuvissa painesuhteissa. Sisäkuoren ilmanläpäisevyyden arvoja varioitiin sen mukaan, oletettiin sisäkuoren olevan puhtaaksimuurattu vai rapattu. Lisäksi ilmavuotoreittien mittasuhteita muunneltiin.

### 5.1 Rakenteiden kosteustekninen analysointi ja arviointi

Rakennusfysikaalisten laskentatarkasteluiden suorittaminen edellyttää ilman- lämmön- ja kosteuden siirtymiseen liittyvän teorian hallintaa. Tarkasteltavien rakenteiden osalta on tunnettava materiaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet, sekä toimintakriteerit ja mahdolliset vaurioitumismekanismit. Rakenteiden toiminnan arvioimiseksi halutussa ympäristössä on lisäksi tunnettava ulko- ja sisäilman olosuhteet, joille rakenne tulee elinkaarensa aikana altistumaan ja osattava arvioida näiden vaikutusta itse rakenteeseen. (RIL 255-1-2014)

Tampereen teknillisessä yliopistossa on kehitetty 2000-luvulla rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmää, jolla pyritään ottamaan huomioon edellä mainitut tekijät. Analysointimenetelmässä rakenteiden ja rakennusmateriaalien lämpö- ja kosteusteknistä käyttäytymistä tarkastellaan kriittisissä ulko- ja sisäilman olosuhteissa. Rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmää on tarkemmin käsitelty FRAME-tutkimusprojektin loppuraportin luvussa 3 (Vinha et al. 2013).

## 5.2 Tarkasteluperiaatteet ja toimintakriteerit

Ensimmäisessä laskentavaiheessa analysoitiin tiili-villa-tiili –ulkoseinärakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa homehtumisriskin kannalta. Toimintakriteerinä käytettiin Suomalaisen homemallin homeindeksiä (ks. luku 3.63), jota tässä tutkimuksessa käytettiin työkaluna vertailtaessa erilaisia rakenteita keskenään ja arvioitaessa rakenteen kosteusteknistä toimivuutta. Homeindeksin raja-arvon 1 ylittyminen viittaa homekasvuston alkamiseen tarkasteltavassa rakennusmateriaalissa. Näin ollen kyseisen raja-arvon ylittäviä rakenteita ei voida pitää kosteusteknisesti hyväksyttävänä.

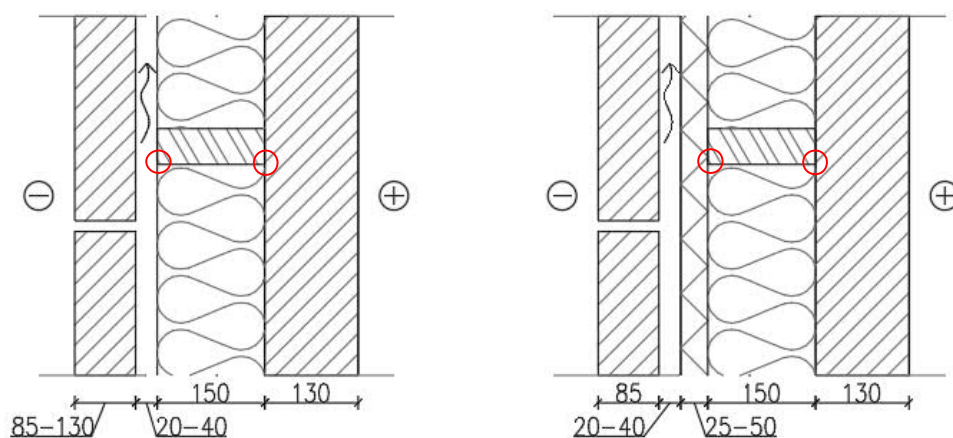
Valittujen rakenteiden rakennusfysikaaliset tarkastelut suoritettiin muuttuvissa eli epästationäärisissä ulkoilman olosuhteissa. Ulkoilman olosuhteina käytettiin kappaleessa 3.2 esiteltyä Vantaan 2007, 2050 ja 2100 vuosien säädataa. Sisäilman olosuhteet säilyivät lämpötilan osalta koko tarkastelujakson ajan vakiona +21 °C asteessa. Sisäilman suhteellinen kosteus muuttui ulkoilman olosuhteiden mukaisesti standardin SFS-EN 13788 (2012) määrittelemällä tavalla. Ulkoilman olosuhteet ovat esitetty koostetusti liitteessä 1. Laskenta suoritettiin kahden vuoden mittaisena jaksona, jolloin ensimmäisen vuoden aikana materiaalien lämpötila- ja kosteusolosuhteet tasoittuvat vastaamaan ympäristön olosuhteita. Homeindeksien maksimiarvot arvot tarkastelupisteissä määritettiin toisen laskentavuoden tulosten perusteella. Homeindeksin määrittämiseksi tarvitaan lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvot tarkastelupisteessä tunnin välein laskettuina, joten aika-askeleena laskentatarkasteluissa käytettiin yhtä tuntia.

Toisessa laskentavaiheessa tarkasteltavana on ikkuna-aukollisen ulkoseinärakenteen osa. Tarkasteluissa ideana on selvittää kuinka leveä rako ikkunakarmeissa ja sisäkuoren ja apukarmin välissä aiheuttaa yhtä suuren ilman tilavuusvirran, kuin mitä on ilman tilavuusvirta ikkunaa ympäröivät sisäkuoren läpi.

## 5.3 Tiili-villa-tiili-ulkoseinärakenteen tarkastelut ja materiaalit

Tässä tutkimuksessa tarkasteltavat kaikki ulkoseinärakenteet muodostuvat kantavasta puhtaaksimuuratusta sisäkuoresta, mineraalivillalämmöneristekerroksesta, mahdollisesta tuulensuojavillasta ja ulkoilman olosuhteille alttiina olevasta, puhtaaksimuuratusta tiiliverhouksesta. Muuttujina eri rakennetyyppien välillä ovat materiaalien vaihtelevat rakennepaksuudet, tuuletusrako ja tuuletusraon ilmanvaihtuvuus. Eri materiaaleille määritetyt materiaaliominaisuudet säilyvät vakioina kaikissa rakennetyypeissä. Tarkasteltavat rakenteet, rakennekerroksien paksuudet, lämmönläpäisykertoimet ja tarkastelupisteet ovat esitetty kuvassa 5.1. US1 –rakennetta voidaan pitää tyypillisenä tiili-villa-tiili –raken-

teenä 1970 –luvulta aina vuoteen 2003 asti, jolloin tiukentuneiden lämmöneristävyysvaatimuksien seurauksena rakenteeseen ohjeistettiin lisäämään tuulensuojavillalevy tuuletusraon ja varsinaisen lämmöneristyskerroksen väliin parantamaan rakenteen lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa (RT 82-10800 2003, Ympäristöministeriö 2018). Tuulensuojavillalevyllistä rakennetta esittää kuvassa 5.1 US2 –rakenne. Rakenteiden lämmönläpäisykertoimien laskennassa lämmöneristeen kiinnikkeiden ja muuraussiteiden kylmäsilta vaikutukseksi on arvioitu  $0,016 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Nykyisin voimassa oleva asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta edellyttää ulkoseinän lämmönläpäisykertoimen vertailuarvona käytettävän arvoa  $0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$  (A 20.12.2017/1010). Tämä saavutetaan US2 –rakenteella, jossa käytetään vähintään 50 mm tuulensuojavillaa.



### US1 RAKENNE (ikkunan alapuolella):

85–130 mm	reikätiili/täystiili
20–40 mm	tuuletusrako
150 mm	mineraalivilla +puurunko
130 mm	reikätiili

U-arvo  $0,21 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

### US2 RAKENNE (ikkunan alapuolella):

85 mm	reikätiili
20–40 mm	tuuletusrako
25–50 mm	tuulensuojavilla
150 mm	mineraalivilla +puurunko
130 mm	reikätiili

Tuulensuojavillan paksuus:

25 mm	U-arvo $0,18 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
50 mm	U-arvo $0,16 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

**Kuva 5.1.** Laskentatarkasteluihin valittujen rakenteiden US1 ja US2 vaakaleikkaukset ikkunan alapuolelta. Rakenne toistuu samanlaisena muualla ulkoseinärakenteessa, mutta ilman ikkunan alapuolista puurunkoa. Tarkastelupisteet, joissa rakenteen lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa tarkastellaan homeutumisriskin kannalta ovat ympäröity punaisella.

Tiiliverhouksen osalta tutkimuksessa päädyttiin käyttämään yhteensä kahdeksaa erilaista variaatiota, kahdessa eri koossa: punaista ja keltaista reikätiiltä sekä punaista ja keltaista umpitiiltä. Tiilien mitoiksi valittiin  $285 \times 85 \times 75$  ja  $285 \times 130 \times 75$ . Tiiliä on saatavilla

hyvin useilla erilaisilla mittasuhteilla ja joidenkin vanhoissa rakennuksissa käytettyjen tiilien valmistaminen on voitu kokonaan jo lopettaa. Tämän tutkimuksen puitteissa tiilen paksuudella on merkitystä vain kosteuden ja lämmön siirtymisessä ulkoverhouksen läpi ja tiilen korkeudella ja pituudella merkitystä tuuletusraon ilmanvaihtuvuuden kannalta. Laskentatulosten keskinäisen vertailtavuuden takia tiilien mitat haluttiin vakioida. Valitut tiilikoot ovat kompromissi markkinoilla olevista lukuisista eri tiilistä mittasuhteiden osalta.

Tiilen värin aiheuttaa käytetty savilaatu. Tyypillisen punaisen värin tiilelle aiheuttaa suomalaisen saven suuri rautapitoisuus. Tiilen väri vaikuttaa ulkoverhoukseen absorptoituvan lämpösäteilyn määrään. Tummasävyisillä tiilillä absorptiokerroin on huomattavasti suurempi kuin vaaleasävyisillä tiilillä, jolloin lämpösäteilyn vaikutus on suurempi ja ulkoverhouksen kuivuminen nopeampaa sekä kosteuden siirtyminen ulkoverhouksesta tuuletusrakoon voimakkaampaa (Laine & Ylä-Mattila 1982). Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin punatiilen ja keltaisen tiilen eroavaisuuksia rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta. Punatiilen auringonsäteilyn absorptiokertoimenä käytettiin arvoa 0,75 ja keltaisen tiilen kohdalla arvoa 0,55 (RIL 255-1-2014).

Tiilen lämpötekniisiin ominaisuuksiin ja etenkin lämmönjohtavuuteen vaikuttavat tiilen tiheys sekä kosteuspitoisuus. Täystiiltä parempi lämmöneristävyys saavutetaan reikätiilillä, jossa osa tiilen kiinto-osasta on korvattu pystysuuntaisilla ilmarei'illä. Tiilen kosteuspitoisuuden kasvaessa myös lämmönjohtavuus kasvaa. Kosteustekniisiin ominaisuuksiin, kuten tasapainokosteuteen, vedenimukykyyn ja vesihöyrynläpäisevyyteen voidaan vaikuttaa polttolämpötilalla, joka vaikuttaa tiilen sisältämien huokosten määrään ja kokoon. Pakkaskestävyys tiilillä saavutetaan lisäämällä tiilimassaan sahanpuruja, jotka tiilen polttamisen aikana palaa pois muodostaen suljettuja huokosia. (Laine & Ylä-Mattila 1982, RIL 255-1-2014)

Tiili-villa-tiili –ulkoseinärakenteessa lämmöneristeenä sekä tuulensuojana toimiva mineraalivilla on epäorgaaninen, kuitumainen materiaali, joka voidaan jakaa käytetyn pääraaka-aineen mukaisesti lasi- ja kivivillaan. Mineraalivillan kuidut sidotaan yhteen tavallisesti hartsilla ja käsitellään öljyllä pölyämisen vähentämiseksi ja vedenhylykivyyden parantamiseksi. Mineraalivillan tilavuudesta ilmaa on tuotteesta riippuen 92-99 %. (RIL 255-1-2014).

Mineraalivillassa lämpö siirtyy johtumalla, säteilemällä ja konvektiolla. Suljetussa eristetilassa eri siirtymiskomponenttien suuruuteen ja suhteelliseen osuuteen vaikuttavat keskilämpötila, lämpögradientti ja sen suunta, sekä mineraalivillan sisäinen rakenne ja eris-

tetilan mittasuhteet. Mineraalivillan tiheydellä on suuri merkitys lämmöneristävyyteen. Tiheyden kasvaessa lämmönjohtavuus pienenee, koska säteilemällä ja sisäisellä konvektiolla siirtyvän lämmön määrä vähenee. Tiheyden kasvaessa riittävän suureksi alkaa kuituja pitkin johtumalla siirtyvän lämmön osuus kasvaa voimakkaammin kuin säteilemällä ja sisäisellä konvektiolla siirtyvän lämmön määrä vähentyy. (RIL 255-1-2014). Mineraalivillan tiheys on näin ollen eräänlainen kompromissi eri lämmönsiirtymismuotojen välillä tasapainoilussa.

Mineraalivilla ei ime vettä itseensä kapillaarisesti. Lisäksi hygroskooppisestikin kosteuden sitoutuminen on vähäistä. Ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden vaihteluilla ei näin ollen ole suurta merkitystä mineraalivillan lämmöneristyskykyyn. Mineraalivillakerroksen eri puolilla vallitsevat vesihöyryn osapaine-erot tasoittuvat kerroksen läpi tehokkaasti eli mineraalivillalla on hyvin suuri diffusiivinen vesihöyrynläpäisevyys. Ilmanläpäisevyys on voimakkaasti riippuvainen käytetystä mineraalivillatuotteesta. Mineraalivilla on ilmanläpäisevyyden suhteen anisotrooppinen eli riippuvainen ilmavirtauksen suunnasta; mineraalivillan pinnan suuntainen ilmanläpäisevyys on noin 1,5-2 kertaa suurempi kuin pintaa vasten kohtisuora ilmanläpäisevyys (RIL 255-1-2014). Tuulensuojamateriaalivillalevyjen ulkopinta on yleensä pinnoitettu pahvilla, laminaatilla, lasikuituhuvalla tai muulla vastaavalla pinnoitteella, joilla on pieni ilmanläpäisevyys ja jotka alentavat varsinaisen eristekerroksen läpi tapahtuvaa haitallista ilmavirtausta (Laine 2010).

Ikkunan alapuolisissa rungoissa kuten myös muissa puisissa runkorakenteissa yleisin puulaji on mänty tai kuusi. Hygroskooppisena ja kapillaarisena materiaalina puun ominaisuudet ovat voimakkaasti riippuvaisia ympäristön lämpötilasta ja kosteudesta. Orgaanisena materiaalina puun homehtumisherkkyys on huomattavasti korkeampi kuin tarkasteltavan rakenteen muiden materiaalien eli tiilen ja mineraalivillan. Puulle on ominaista myös laadun, kuten lujuusominaisuuksien suuri vaihtelu saman puulajinkin sisällä. Tässä tutkimuksessa ikkunan alapuolisten puurunkojen materiaalina käytetään mäntyä. (RIL 255-1-2014).

Ulkoseinärakenteiden laskentatarkasteluissa käytettyjen materiaalien rakennusfysikaaliset materiaaliominaisuudet ovat esitetty tarkemmin liitteessä 2.

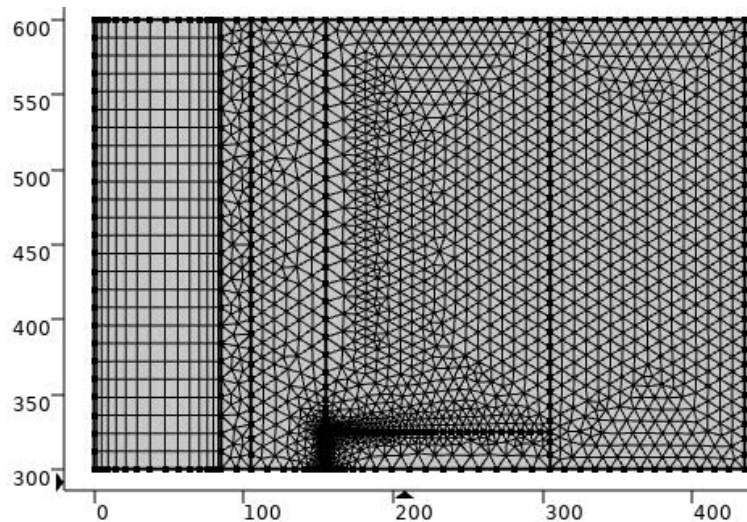
## **5.4 Tiili-villa-tiili-ulkoseinärakenteen laskentamalli**

Ensimmäisessä laskentavaiheessa tiili-villa-tiili-ulkoseinärakenteet oletettiin toimivan ideaalirakenteen tavoin ilman rakenteen läpi tapahtuvia ilmavuotoja. Näin ollen konvektiolla siirtyvää lämpöä ja kosteutta ei ole laskentatarkasteluissa huomioitu. Ideaalirakenteet mallinnettiin Comsolin kaksikulotteisena tasona. Taso edustaa ulkoseinärakenteen

vaakasuuntaista poikkileikkausta. Jokaiselle rakennekerrokselle määritettiin laskentatarkasteluiden suorittamista varten vaaditut materiaaliominaisuudet, joita olivat materiaalin tiheys, ominaislämpökapasiteetti, lämmönjohtavuus, tasapainokosteus, kosteusdiffusiviteetti ja vesihöyrynvastus.

Comsolilla seuraava vaihe geometrian ja materiaaliominaisuuksien määrittelemisen jälkeen oli tarvittavien fysiikkamoduulien lisääminen tarkasteltavaan malliin. Lämmön siirtymistä rakenteessa simuloitiin *Heat Transfer in Building Materials* –nimisellä fysiikkamoduulilla ja vastaavasti kosteuden siirtymistä *Moisture Transport in Building Materials* –nimisellä fysiikkamoduulilla. Käytetyt moduulit perustuvat samoihin hallitseviin energian ja massan säilymisestä johdettaviin osittaisdifferentiaaliyhtälöihin, kuin mitä sovelletaan myös Wufin laskentatarkasteluissa. Fysiikkamoduuleihin lisättiin rakennekerroksien alkuoletukset lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvoilla, sisä- ja ulkopinnoissa vaikuttavat ympäristön olosuhteet ja pintojen lämmön- ja kosteudensiirtokertoimet sekä tuuletusraon lämpö- ja kosteuslähteet. Lisäksi lyhyt- ja pitkäaaltoinen säteily, sekä viistosade asetettiin vaikuttamaan rakenteen ulkopintaan.

Viimeisenä vaiheena ennen laskennan suorittamista rakennettu geometria jaettiin elementteihin. Kaksiulotteinen laskentamalli jaettiin pääosin kolmionmuotoisiin elementteihin, jotka liittyvät toisiinsa solmupisteillä. Elementtien lukumäärän lisääminen lisää solmupisteiden määrää, jolloin laskentamallin tarkkuus paranee, mutta laskenta-aika kasvaa. Elementtien lukumäärää optimoitiin siten, että elementtien kokoa pienennettiin ja solmupisteiden määrää kasvatettiin lähellä materiaalien rajapintoja, joissa on odotettavissa ajoittain jyrkkiä gradientteja lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvoissa. Vastaavasti rakennekerrosten keskellä muutokset lämpötilan ja suhteellisen kosteuden osalta ovat pienempiä, joten myös elementtien koko voitiin säilyttää suurempana laskennan tehostamiseksi. Alla olevassa kuvassa on esitetty eräässä laskentatarkastelussa käytetty elementtiverkko. Kuvasta on selkeästi havaittavissa verkon tihentäminen ikkunan alapuolisen puurungon ulkonurkassa, jonka lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvot määriteltiin kosteusteknisen toiminnan kannalta kriittisimmäksi. Laskentamalli on lisäksi jaettu vaakasuuntaisen symmetria-akselin kohdalta kahtia, jolloin laskenta-aikaa ja tarvittavan muistin määrää saadaan vähennettyä.



**Kuva 5.2.** *Ideaalirakenteen laskentamallin elementtiverkko.*

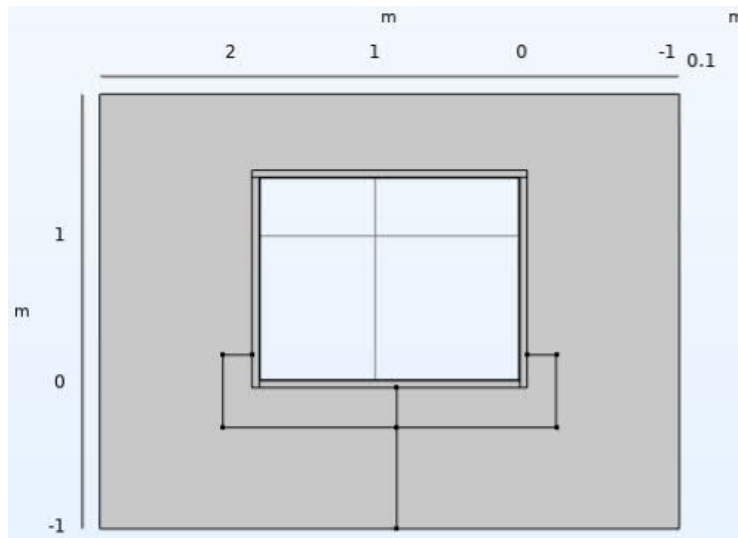
Comsolin suoritettua laskennan tuloksista poimittiin lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvot tarkastelupisteiden kohdista. Aika-askeleena laskennassa käytettiin homemallin edellyttämää yhtä tuntia. Nämä arvot syötettiin Suomalaiseen homemalliin, josta tuloksena saatiin homeindeksin maksimi-arvot valituissa tarkastelupisteissä vuoden mittaisen tarkastelujakson aikana. Homeindeksin maksimi-arvoja vertailemalla pystyttiin tekemään johtopäätöksiä rakenteiden kosteusteknisestä toimivuudesta rakennusfysikaalisten testivuosien olosuhteissa ja vertailemaan erilaisten rakenteiden toimivuutta keskenään.

## 5.5 Ilmavuotojen laskentamalli

Epäideaalirakenteen tarkasteluissa vuotoilmamäärän jakaantumista sisäkuoren ja ikkunan karmirakenteiden välillä tarkasteltiin tilanteissa, joissa sisäilman alipaineisuus ulkoilmaan nähden muuttuu. Sisäkuoren ja ikkunakarmirakenteen kautta tapahtuvien ilmavuotojen suuruuteen ja jakaantumiseen vaikutettiin sisäkuoren ilmanläpäisevyyttä muuttamalla, olettaen sisäkuori, joko puhtaaksimuuratuksi tai rapatuksi. Ikkunaa kiertävien karmirakenteiden ja ikkunan alalaidan apukarmin ja sisäkuoren välille oletettiin yhtenäiset tasalevyiset raot, joiden leveyttä varioitiin 0,25 mm ja 2 mm välillä. Rakojen läpi virtaavan ilman määrää tarkasteltiin tilanteissa, joissa raot olivat täysin avoimia ja virtaus näin ollen esteetöntä. Rakojen läpi virtaavan ilman osalta tarkastettiin Reynoldsin luvun asettama ehto laminaariselle virtaukselle.

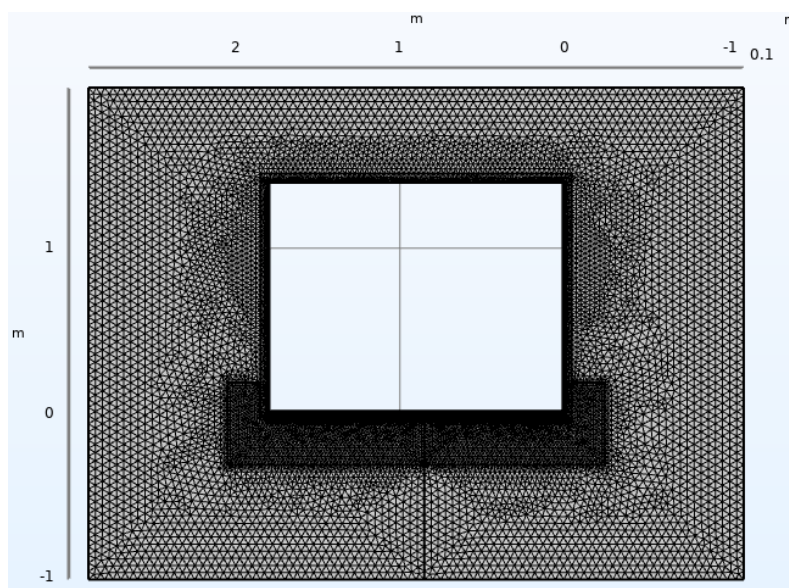
Ilmavuotojen jakaantumista sisäkuoren ja rakojen läpi tarkasteltiin ikkuna-aukollisen ulkoseinärakenteen osalla (5.3). Seinän korkeudeksi asetettiin 3,0 m ja leveydeksi 4,0 m. Ikkunan kooksi valittiin 1,4 x 1,8 m. Ikkunan ympärillä kiertää ikkunan runkopuut, jotka ovat 50 x 150 mm sahatavaraa. Sisäkuoren yhtenäiseksi pinta-alaksi muodostui näin ollen 9,15 m<sup>2</sup> ja ikkunaa ympäröivän raon pituudeksi ikkunakarmeissa 6,4 m. Sisäkuoren

ja apukarmin välinen rako on pituudeltaan 1,8 m. Ikkunakarmin rakojen sekä apukarmin ja sisäkuoren välisen raon oletettiin ilmavuotomallissa olevan täysin avoin virtaukselle.



**Kuva 5.3.** Ikkunallisen ulkoseinärakenteen ilmavuotomalli.

Ilmavuototarkasteluita varten ulkoseinärakenteesta luotiin yksinkertaistettu kolmiulotteinen laskentamalli, joka kuvastaa ikkuna-aukollista tiili-villa-tiili-ulkoseinän osaa (kuva 5.4). Seinärakenteen läpi siirtyvän ilman tilavuusvirran arvioimista varten malliin lisättiin *Darcy's Law* -niminen fysiikkamalli, jossa mineraalivillakerrokselle asetettiin ilmanläpäisevyyden arvo. Muuratulle sisäkuorelle asetettiin kirjallisuudessa esitetty oletus ilmanläpäisevyydestä vaikuttamaan mineraalivillan sisäpinnassa (taulukko 4.1, kaava 4.1), jolloin sisäkuoren geometriaa ei erikseen laskentamalliin tarvinnut lisätä. Ulkopintaan asetettiin vaikuttamaan 0 Pa paine ja sisäilman alipaineisuutta varioitiin 2-10 Pa välillä.

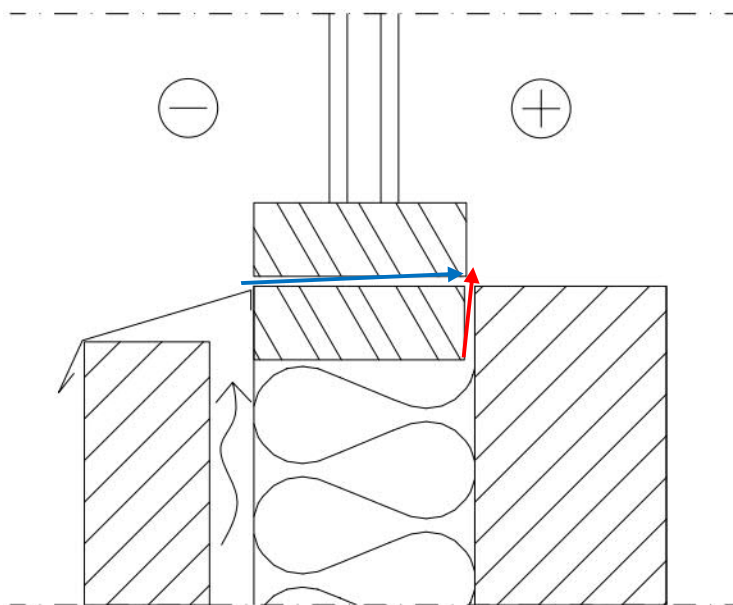


**Kuva 5.4** Ilmavuotomallin elementtiverkko. Elementtiverkkoa on tihennetty ikkuna-aukon ympärillä laskentatarkkuuden parantamiseksi.



Rakojen ominaisuudet ja rakojen välillä vallitsevat paine-erot lisättiin malliin *Fracture Flow* –fysiikkamallilla. Rakojen sijoittuminen ja leveys perustuvat kirjallisuuskatsauksen pohjalta tehtyihin havaintoihin, sekä FCG Suunnittelu ja Tekniikka Oy:n tutkimissa koh-teissa aistinvaraisin havainnoin, merkkiainekokein ja lämpökamerakuvaksin todettuihin ilmavuotoihin sekä näiden sijainteihin ja mittasuhteisiin.

Kuvassa 5.5 on esitetty sinisellä nuolella ikkunakarmin läpi ulottuva rako ja ilmavirtaus ulko- ja sisäilman välillä ja punaisella nuolella rako ja ilmavirtaus apukarmin ja muuratun sisäkuoren välissä. Raoissa ei oleteta olevan tilkemateriaalia, joka lisäisi virtausvastusta. Apukarmin ja sisäkuoren välisen raon kautta tapahtuvan ilman tilavuusvirran suuruuteen vaikuttaa kuitenkin lämmöneristekerroksen ilmanläpäisyvastus. Lämmöneristekerros on huokoista mineraalivillaa, jonka ilmanläpäisyvastus on alhainen ja vaikutus ilman tilavuusvirtaan näin ollen vähäinen. Ilmavuotomallissa tämä kuitenkin huomioitiin asetta-malla apukarmin raon alanurkkaan reunaehdoksi lähdetermi, joka on riippuvainen kysei- sessä pisteessä vallitsevan paineen erotuksesta sisäilmassa vallitsevaan paineeseen nähden. Näin saatu paine-ero sijoitettiin kappaleessa 2.1 esitettyyn kaavaan 2.4, jolloin saatiin määriteltyä ilman tilavuusvirta apukarmin raon läpi raon leveyden funktiona. Läm-möneristekerroksen vaikutus ilman tilavuusvirran suuruuteen pystyttiin nyt eri tilanteissa määrittämään apukarmin alanurkan ja ulkoilman välisestä paine-erosta.



**Kuva 5.5** Ilmavuotomallin raot: sininen nuoli kuvastaa ilmavirtausta ikkunakarmin raon kautta ja punainen nuoli ikkunan apukarmin ja sisäkuoren välisen raon kautta.

## 6. LASKENNAN TULOKSET

### 6.1 Tiili-villa-tiili-ulkoseinärakenne

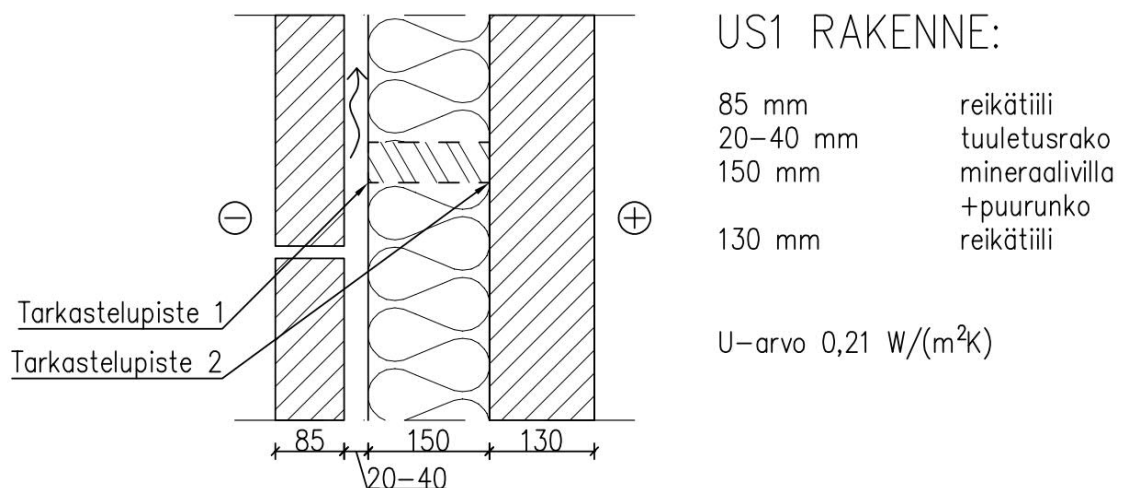
Tiili-villa-tiili –ulkoseinärakenteen laskentatarkasteluissa varioitiin tuuletusraon paksuutta ja ilmanvaihtuvuutta, ulkoverhoustiilen paksuutta, väriä ja tiilen tyyppiä sekä tarkasteltiin tuulensuojavillan lisäämisen vaikutuksia rakenteen lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan. Tiiliverhouksen ominaisuuksien muuttuminen ja tuulensuojavillan lisäämisen vaikutukset rakenteen lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan laskettiin olettaen tuuletusraon paksuudeksi 40 mm, jota suositellaan viistosateelle alttiille tai korkeille tiiliverhouksille.

Toimintakriteerinä erilaisille tiili-villa-tiili –ulkoseinärakenteille käytetään homeindeksiä. Kyseistä rakennetta tarkasteltaessa on syytä huomioida ulkoseinärakenteen suurelta osin koostuvan vain tiilestä, muurauslaastista ja mineraalivillasta. Nämä materiaalit kuuluvat homehtumisherkkyysluokaltaan kohtalaisen kestävään eli HHL3-luokkaan. Homehtumisen kannalta herkempää materiaalia eli puuta käytetään sen sijaan tiili-villa-tiili-ulkoseinärakenteissa vain ikkunoiden ja ovien karmi- ja runkorakenteissa.

Laskentatarkastelujen tulokset esitetään kootusti taulukoissa ja kuvaajissa, joihin homeindeksien maksimiarvot ovat laskettu käyttäen materiaalien homehtumisherkkyysluokkina seuraavia: hyvin herkkä HHL1, herkkä HHL2 ja kohtalaisen kestävä HHL3. Yleisesti tarkastelun kohteena olevan ulkoseinärakenteen ikkunan alapuolisessa puurungossa on käytetty mitallistettua eli karkeahöylättyä mänty- tai kuusipuuta tai höylättyä mäntyä, jotka kuuluvat HHL1-luokkaan. Homeindeksien maksimiarvoja on verrattu myös HHL2-luokan materiaalien pinnoilla, joihin kuuluvat muun muassa höylätty kuusi, puupohjaiset levyt, sekä paperipintaiset tuotteet ja kalvot. Puhdas mineraalivilla on materiaalina epäorgaanista eikä näin ollen ole yhtä herkkä homekasvustolle kuin puu orgaanisena materiaalina. Homehtumisherkkyysluokaltaan mineraalivilla kuuluu luokkaan HHL3.

### 6.1.1 Ulkoseinärakenteen kriittinen tarkastelupiste

Tiili-villa-tiili –ulkoseinärakenteen kosteusteknisesti kriittisimmän alueen selvittämiseksi suoritettiin laskentatarkasteluita yksi ja kaksi kerrosta korkeille rakenteille, sekä ikkunan alapuoliselle rakenteelle, jonka korkeudeksi oletettiin yksi metri. Eri korkuisten ulkoseinärakenteiden kosteusteknistä toimintaa arvioitiin lähes täysin tukkeutuneen 20 mm paksun tuuletusraon tapauksessa ja nykysuositusten mukaisen avoimen 40 mm paksun tuuletusraon tapauksessa. Yksi- ja kaksikerroksissa tiiliverhouksissa homeindeksin suuruutta tarkasteltiin vain HHL3-luokkaan kuuluvan mineraalivillan osalta ja ikkunan alapuolisessa rakenteessa lisäksi HHL1 tai HHL2-luokkaan kuuluvan ikkunan runkotolpan osalta. Tarkasteltavan ulkoseinärakenteen US1 vaakaleikkaus ja tarkastelupisteiden sijainnit ovat esitetty alla olevassa kuvassa.



**Kuva 6.1.** Ulkoseinärakenteen US1 vaakaleikkaus ja tarkastelupisteet.

Ulkoseinärakenteen korkeuden kasvaessa tuuletusraon ilmanvaihtuvuus pienenee, koska tuuletusraon tilavuus kasvaa. Tämän seurauksena rakenteen kuivumiskyky heikkenee ja edelleen homeindeksin arvot kasvavat. Alla olevasta taulukosta (6.1) tämä voidaan havaita tarkastelemalla HHL3-luokkaan kuuluvan mineraalivillan homeindeksin arvoja ulkoseinän korkeuden muuttuessa. Puhtaan mineraalivillan osalta homeindeksin arvot pysyvät kuitenkin matalina myös heikosti toimivien tuuletusrakojen tapauksessa.

Tarkasteltaessa tilannetta ikkunan alapuolisessa ulkoseinärakenteessa on tilanne hyvin toisenlainen verrattuna homogeeniseen seinärakenteeseen. Ikkunan alapuolinen puurunko tarjoaa homekasvustolle suotuisan kasvualustan. Puurungon muodostuessa HHL1-luokan materiaalista homeindeksin arvot nousevat yli viiden, joka tarkoittaa jo runsasta silmin havaittavaa kasvustoa. Ero HHL2-luokan puumateriaaliin on homeindeksin kannalta merkittävä. HHL2-luokkaan kuuluvan puumateriaalin pinnalla homeindeksi koostuu hieman yli kahden, joka viittaa mikroskoopilla selvästi havaittavaan kasvustoon.

**Taulukko 6.1.** Homeindeksien ja suhteellisen kosteuden maksimi-arvot rakenteen US1 tarkastelupisteessä 1, kun yhtenäisen tuuletusraon korkeus vaihtelee.

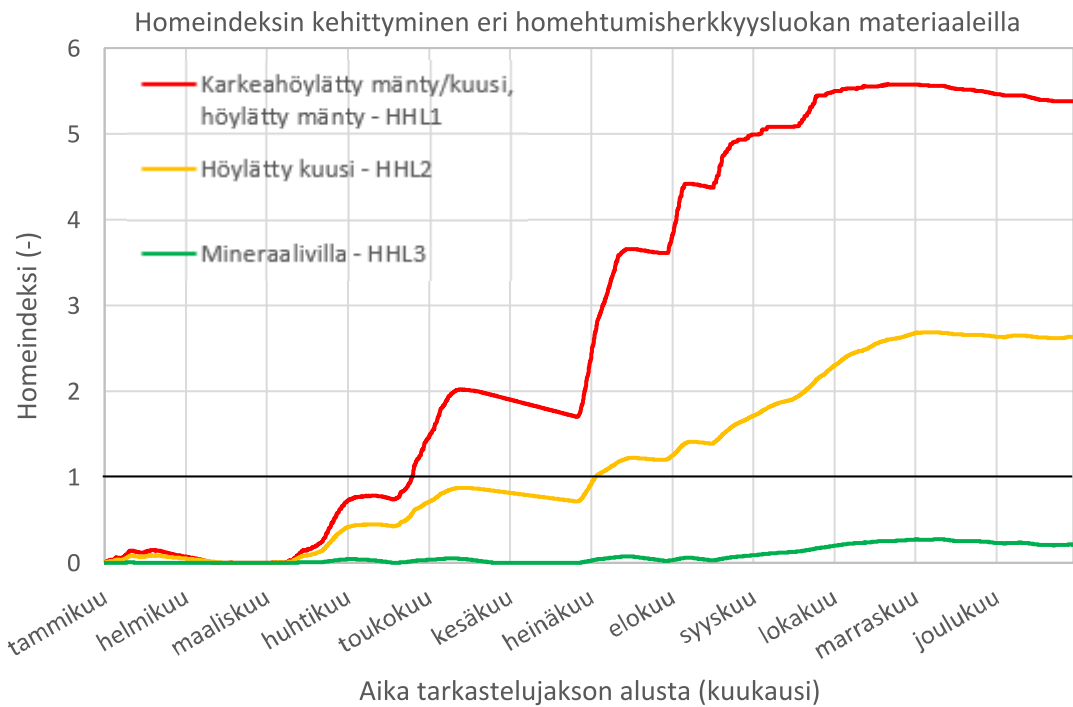
Yhtenäisen tuuletusraon korkeus	Tuuletusraon paksuus (mm)	Tuuletusraon avoimuus	Vuoden keskimääräinen ilmanvaihtuvuus tuuletusraossa (1/h)	Tarkastelupiste 1		
				Homeindeksi (-)		
				HHL1	HHL2	HHL3
Ikkunan alla / 1,0 m	20	Heikko	5,2	<b>5,58</b>	<b>2,69</b>	0,28
	40	Hyvä	52,4	0,81	0,46	0,04
1-kerroksinen / 3,0 m	20	Heikko	3,0	-	-	0,43
	40	Hyvä	30,3	-	-	0,11
2-kerroksinen / 6,0 m	20	Heikko	2,1	-	-	0,45
	40	Hyvä	21,3	-	-	0,15

Tarkasteltaessa homeindeksien arvoja eristekerroksen lämpimällä sisäpinnalla ja sisäilman laadun kannalta kriittisemmällä puolella (taulukko 6.2) voidaan huomata arvojen olevan kaikissa tilanteissa hyvin lähellä nollaa. Homekasvuston edellyttämää pitkään jatkuvaa korkeaa suhteellista kosteutta ei pääse muodostumaan eristekerroksen lämpimälle puolelle edes tilanteissa, joissa tuuletusraon ilmanvaihtuvuus on heikkoa. Huokoisuuden lämmöneristekerroksen läpi sekä lämmöneristekerroksen mahdollisten epäjatkuvuuskohtien kautta lämmöneristeen ulkopinnan mikrobit ja näiden aineenvaihduntatuotteet pääsevät helposti siirtymään lämmöneristekerroksen sisäpintaan. Lämmöneristekerroksen sisäpinnan hyvät olosuhteet eivät näin ollen takaa rakenteen toimivuutta.

**Taulukko 6.2.** Homeindeksien ja suhteellisen kosteuden maksimi-arvot rakenteen US1 tarkastelupisteessä 2, kun tiiliverhouksen korkeus vaihtelee.

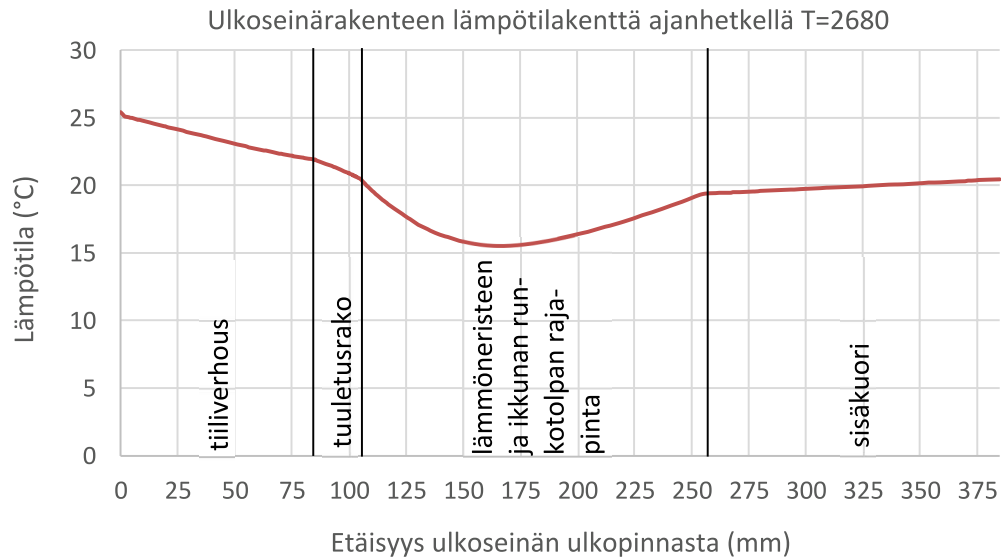
Tiiliverhouksen korkeus	Tuuletusraon paksuus (mm)	Tuuletusraon avoimuus	Vuoden keskimääräinen ilmanvaihtuvuus tuuletusraossa (1/h)	Tarkastelupiste 2		
				Homeindeksi (-)		
				HHL1	HHL2	HHL3
Ikkunan alla / 1,0 m	20	Heikko	5,2	0,32	0,17	0,00
	40	Hyvä	52,4	0,00	0,00	0,00
1-kerroksinen / 3,0 m	20	Heikko	3,0	-	-	0,06
	40	Hyvä	30,3	-	-	0,00
2-kerroksinen / 6,0 m	20	Heikko	2,1	-	-	0,06
	40	Hyvä	21,3	-	-	0,00

Seuraavan sivun kuvassa 6.2 on esitetty homeindeksin kehittyminen ulkoseinärakenteen eri homehtumisherkkyysluokkaan kuuluvien materiaalien osalta. Arvot perustuvat taulukon 6.1 laskentatarkasteluun, jossa ilmanvaihtuvuus on ikkunan alapuolisessa 20 mm paksussa tuuletusraossa keskimäärin 5,2 1/h. Tarkastelujakson pituus on yksi vuosi. Kuvasta havaitaan homeindeksin kasvun olevan voimakkainta keväällä sekä loppukesän ja syksyn aikana, kun tarkastelupisteen olosuhteet täyttävät kappaleessa 3.6.3 esitetyt vaatimukset homekasvustolle lämpötilan ( $> 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ja suhteellisen kosteuden osalta ( $> 80\%$ ).

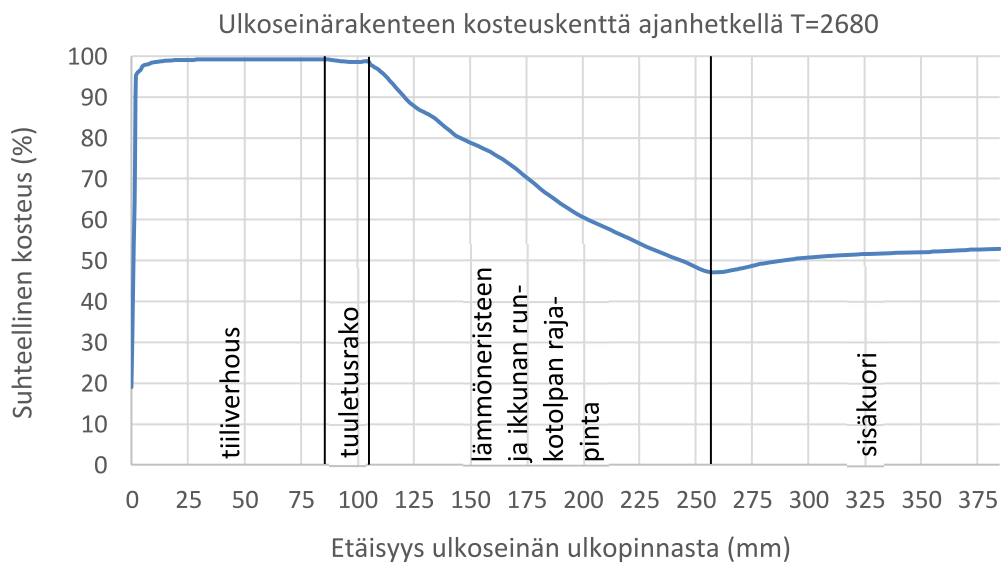


**Kuva 6.2.** Homeindeksin kehittyminen eri homehtumisherkkyysluokan materiaaleilla vuoden aikana, kun tuuletusraon paksuus on 20 mm ja ilmanvaihtuvuus on 5,2 1/h.

Seuraavan sivun kuvissa (6.3 ja 6.4) on havainnollistettu ikkunan alapuolisen ulkoseinärakenteen (US1) lämpötila- ja kosteuskenttä, kun ikkunan alapuolisen puurungon ulkonurkassa saavutetaan tarkastelujakson korkein suhteellinen kosteus (98,81 %). Aikaa tarkastelujakson alusta on tällöin kulunut 2680 tuntia, joka päivämääräksi ja kellonajaksi muunnettuna on huhtikuun 22. kello 16:00. Tarkasteluhetkellä ulkoilman lämpötila on +9,7 °C ja suhteellinen kosteus 35,3 %. Edeltävien tuntien aikana tiiliverhouksen ulkopintaan kohdistunut Auringon lyhytaaltainen säteily on ollut voimakasta, jonka seurauksena tiiliverhouksen ulkopinnan lämpötila on kohonnut ulkoilmaa huomattavasti korkeammaksi saavuttaen lämpötilan +25 °C. Tämän seurauksena edeltävien päivien sateiden seurauksena kastuneessa tiiliverhouksessa kosteuden siirtyminen diffuusiovirtauksena syvemmälle rakenteeseen voimistuu. Tuuletusraon ilmanvaihtuvuus on tarkasteluhetkellä vain 6,5 1/h, jonka seurauksena tuuletusraon rakennetta kuivattava vaikutus jää vähäiseksi ja suhteellinen kosteus pysyy edelleen korkeana myös lämmöneristeen ulkopinnassa.



**Kuva 6.3.** Ikkunan alapuolisen ulkoseinärakenteen (US1) lämpötilakenttä, kun lämmoneristeen ulkopinta saavuttaa suurimman suhteellisen kosteuden arvon (98,81 %) tarkastelujakson aikana. Tuuletusraon paksuus on 20 mm ja keskimääräinen ilmanvaihtuvuus 5,2 1/h

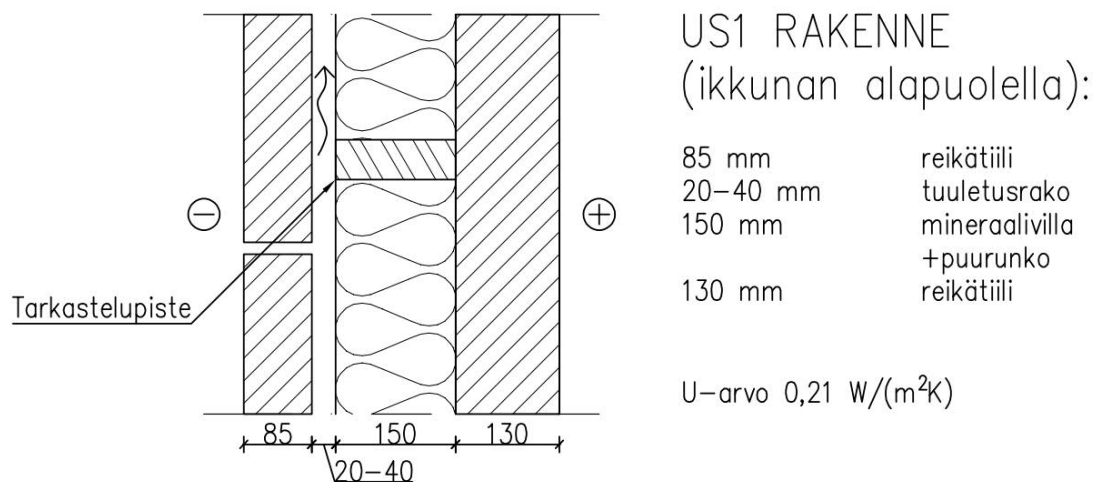


**Kuva 6.4.** Ikkunan alapuolisen ulkoseinärakenteen (US1) kosteusKenttä, kun lämmoneristeen ulkopinta saavuttaa suurimman suhteellisen kosteuden arvon (98,81 %) tarkastelujakson aikana. Tuuletusraon paksuus on 20 mm ja keskimääräinen ilmanvaihtuvuus 5,2 1/h

Tarkasteltaessa homeindeksien arvoja eristekerroksen lämpimällä ja sisäilman laadun kannalta kriittisemmällä puolella (taulukko 6.2) voidaan huomata arvojen olevan kaikissa tilanteissa hyvin lähellä nollaa. Homekasvuston edellyttämää pitkään jatkuvaa korkeaa suhteellista kosteutta ei pääse muodostumaan eristekerroksen lämpimälle puolelle edes tilanteissa, joissa tuuletusraon ilmanvaihtuvuus on heikkoa.

### 6.1.2 Tuuletusraon paksuuden ja ilmanvaihtuvuuden merkitys

Tuuletusraon paksuuden ja ilmanvaihtuvuuden merkitystä tiili-villa-tiili ulkoseinärakenteen (US1) kosteustekniseen toimintaan tarkasteltiin kahdella erilaisella tuuletusraon paksuudella. Tarkasteluissa mukana oli 20 mm tuuletusrako kolmella erilaisella ilmanvaihtuvuuden arvolla sekä 40 mm tuuletusrako kahdella erilaisella ilmanvaihtuvuuden arvolla. Perusteet valituille ilmanvaihtuvuuksille on esitetty kappaleessa 4.2.2. 20 mm tuuletusraolla tarkasteltiin myös tilannetta, jossa tuuletusrako on ala- ja yläpäästä täysin suljettu ja näin ollen ilmanvaihtuvuus on nolla.

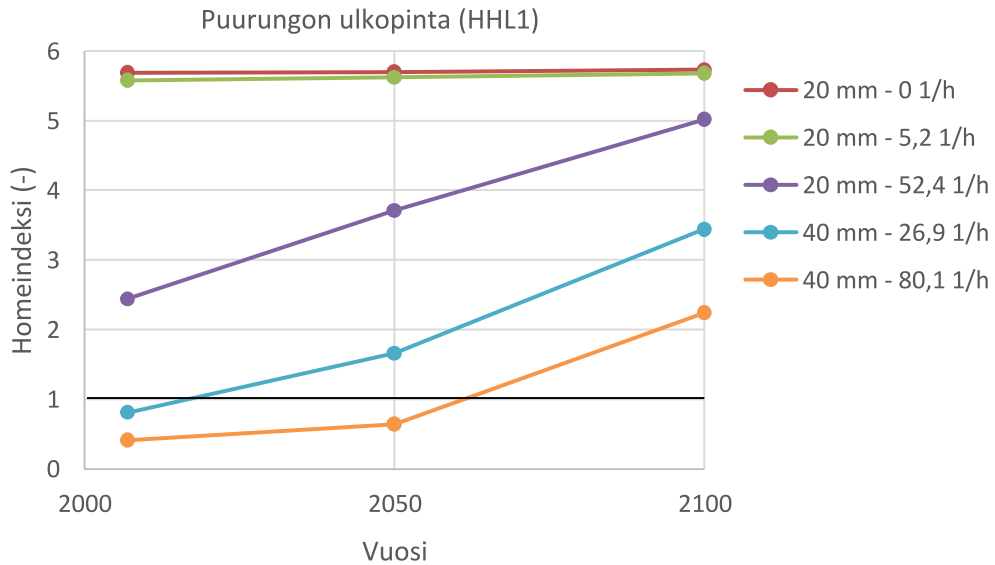


**Kuva 6.5.** Vaakaleikkaus, ikkunan alapuolelta, ulkoseinärakenteesta US1 ja tarkastelupiste.

Ikkunan alapuolisen puurungon ulkopinnassa US1-ulkoseinärakenteessa homeindeksien maksimiarvot nousivat jo nykyilmastossa selvästi yli homeen kasvun alkamisen raja-arvon, kun tuuletusraon paksuudeksi asetettiin vanhoille tiiliverhotuille ulkoseinärakenteille tyypillinen 20 mm. Puumateriaalina käytettiin HHL1-luokkaan kuuluvaa mänty- tai kuusipuuta (kuva 6.6). Edes laastipurseista tyhjä 20 mm tuuletusrako, jossa ilmanvaihtuvuus on tiiliverhottujen seinien mittapuulla hyvällä tasolla ei riitä varmistamaan homeen kasvun suhteen kosteusteknisesti turvallista toimintaa nykyilmastossa. Nykyilmastossa toimivina voidaan pitää kyseistä ulkoseinärakennetta, jossa tuuletusraon paksuus on 40 mm eikä tuuletusraossa ole merkittävää määrää laastipurseita heikentämässä ilmanvaihtuvuutta.

Tuuletusraon ja ilmanvaihtuvuuden erilaisista variaatioista selvästi vähäisintä homekasvuston muodostuminen oli rakenteessa, jossa tuuletusraon kaikki alimman tiilirivin pystysaumamat ovat avoimia, jolloin ilman tilavuusvirta ja näin ollen ilmanvaihtuvuus pääsevät kasvamaan merkittävästi verrattuna tilanteeseen, jossa vain joka kolmas alimman tiilirivin sauma on auki. Kyseinen rakenne säilyy toimivana vielä vuoden 2050 ilmastossakin.

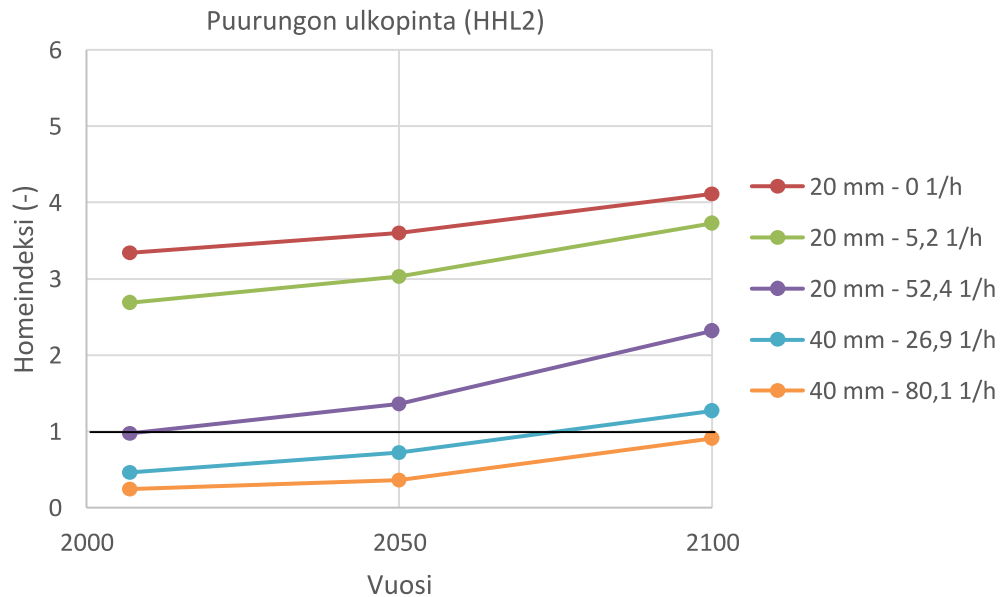
Vuoden 2100 ilmastossa US1-ulkoseinärakenteessa homeindeksit kohoavat ikkunan alapuolisen puurungon ulkopinnassa reilusti riippumatta tuuletusraon paksuudesta ja ilmanvaihtuvuudesta.



**Kuva 6.6.** Tuuletusraon paksuuden ja ilmanvaihtuvuuden vaikutus homeindeksin maksimiarvoihin ikkunan alapuolisen puurungon ulkopinnassa, jonka homehtumisherkkyyssluokka on HHL1. Tarkasteltava rakenne on US1

Ikkunan alapuolisen puurungon materiaalina on voitu käyttää myös höylättyä kuusipuuta, joka homehtumisherkkyyssluokaltaan edustaa HHL2-luokkaa eikä näin ollen tarjoa homekasvustolle yhtä edullista kasvualustaa vastaavissa rasisolosuhteissa kuin HHL1-luokan materiaalit (kuva 6.7). HHL2-luokan puumateriaalissa homeindeksin arvot jäävät alhaisemmiksi, mutta homekasvusto on edelleen runsasta rakenteessa, jossa tuuletusraon paksuus on 20 mm. 40 mm tuuletusrako voi säilyä toimivana vielä vuoden 2100 ilmastossakin, jos ilmanvaihtuvuus on korkea.





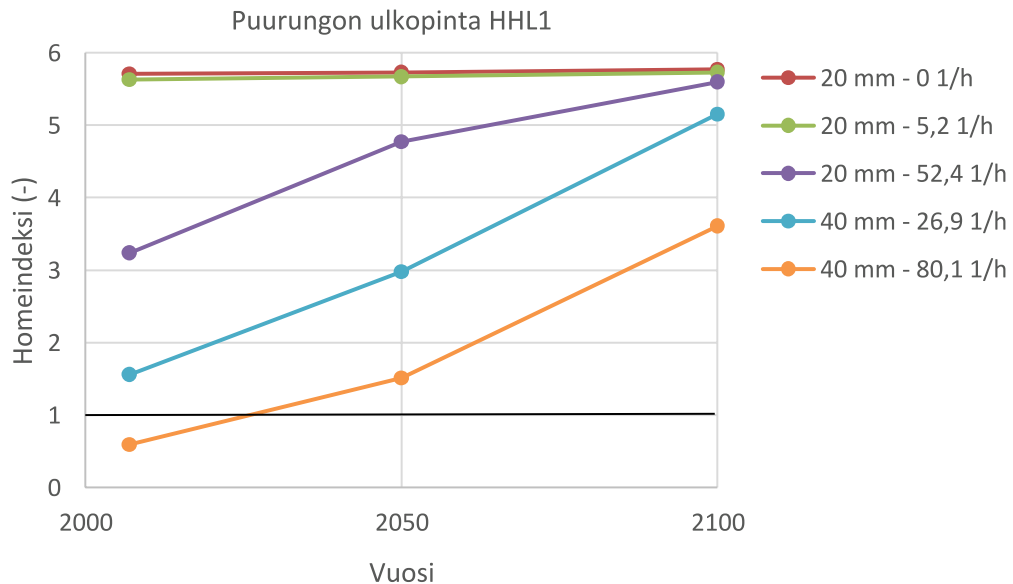
**Kuva 6.7.** Tuuletusraon paksuuden ja ilmanvaihtuvuuden vaikutus homeindeksin maksimiarvoihin ikkunan alapuolisen puurungon ulkopinnassa, jonka homehtumisherkkyysluokka on HHL2. Tarkasteltava rakenne on US1.

Jokela on omassa diplomityössään (2018) suorittanut laskentatarkasteluita erilaisilla tuuletusraon ilmanvaihtuvuuksilla tiiliverhouksen takana. Tässä tutkimuksessa samoilla ilmanvaihtuvuuksilla suoritettavat laskentatarkastelut ovat vähemmän kriittisiä ikkunan alapuolisen puurungon ulkopinnan suhteen, kuin Jokelan saamat tulokset runkotolpan ulkopinnassa. Eriäviä tekijöitä tutkimuksissa olivat Jokelan tarkastelema ulkoseinrakenne, joka tästä tutkimuksesta poiketen oli puurankarunkoinen. Mahdollisesti eroavaisuuksia oli myös ulkoseinään kohdistuvassa viistosaderasituksessa ja materiaaliominaisuuksissa, joissa etenkin tiilelle asetut materiaaliominaisuudet voivat vaikuttaa merkittävästi kosteuden siirtymiseen tiiliverhouksen läpi ja näin ollen myös homeindeksien arvoihin tuuletusrakoon rajautuvassa puumateriaalissa. Myös Jokelan käyttämä laskentaohjelma oli eri (Delphin).

### 6.1.3 Viistosateen tunkeutuminen tiiliverhouksen läpi

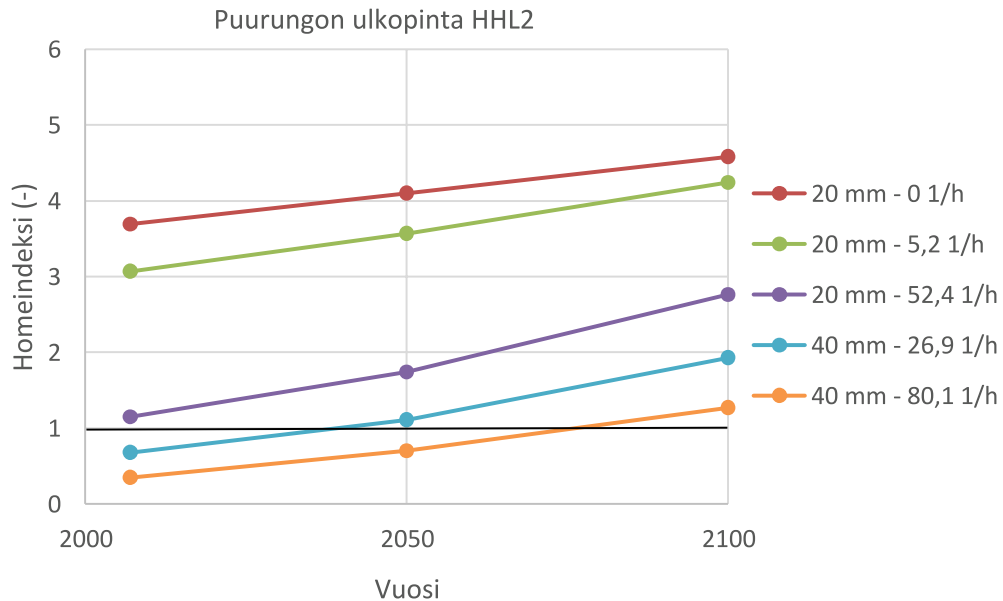
Laskentatarkasteluita suoritettiin myös ulkoseinärakenteille, joiden ulkopuolisen tiiliverhouksen läpi oletettiin tunkeutuvan yhden prosentin osuus julkisivuun kohdistuvasta viistosaderasituksesta ASRAE 160 standardin (2008) mukaisesti. Yhden prosentin osuudella viistosateesta pyritään huomioimaan muuraussaumojen ja mahdollisten halkeamien kautta tiiliverhouksen läpi tunkeutuvaa vuotoa kosteuslähteenä. Kosteuslähteä kohdistettiin laskentamallissa vaikuttamaan suoraan mineraalivillan ja puurungon ulkopintoihin.

Kuvissa 6.8. ja 6.9. on esitetty tiiliverhouksen läpi tunkeutuvan viistosateen vaikutukset ikkunan alapuolisen puurungon ulkopinnan homeindeksin arvoihin vastaavilla tuuletusraon paksuuksilla ja ilmanvaihtuvuuksilla kuin kappaleessa 6.1.2. Viistosateen tunkeutuminen nostaa puurungon ulkopinnan ja mineraalivillan suhteellista kosteutta ja kasvattaa puurungon ulkopinnan homeindeksien arvoja entisestään.



**Kuva 6.8.** Tuuletusraon paksuuden ja ilmanvaihtuvuuden vaikutus homeindeksin maksimi-arvoihin ikkunan alapuolisen puurungon ulkopinnassa (HHL1). Mineraalivillan ja puurungon ulkopintoihin kohdistuu 1 % suuruisen osuus viistosateesta. Tarkasteltava rakenne on US1.

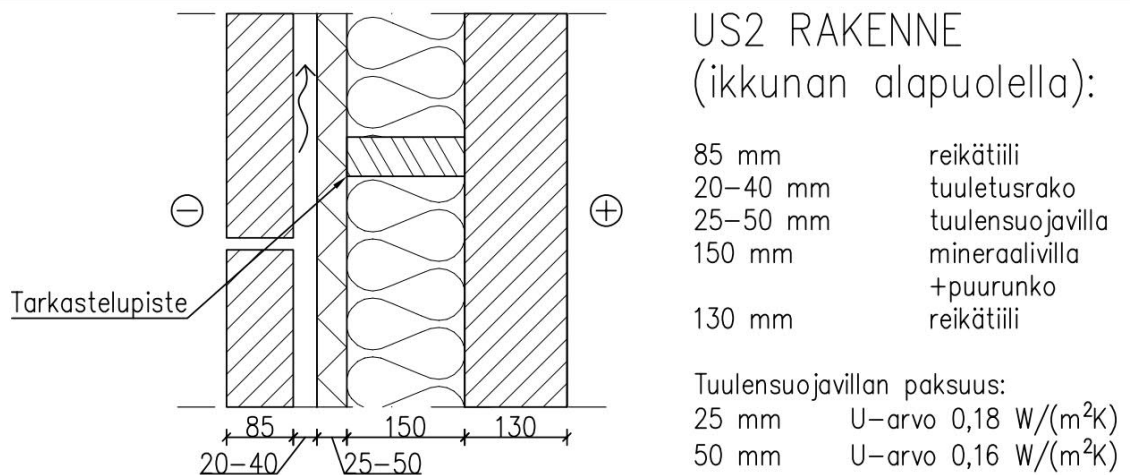
HHL2-luokan puumateriaalin pinnalla ei vielä nykyilmastossa esiinny homekasvustoa, kun tuuletusraon paksuus on 40 mm. Tulevaisuuden ilmastoissa homekasvuston ehkäisemiseksi vaadittu tuuletusraon ilmanvaihtuvuus kasvaa ja vuoden 2100 ilmastossa edes tiiliverhouksen alaosan tuuletusaukkojen lisääminen ei paranna riittävästi ilmanvaihtuvuutta, jotta homekasvustolta vältyttäisiin.



**Kuva 6.9.** Tuuletusraon paksuuden ja ilmanvaihtuvuuden vaikutus homeindeksin maksimiarvoihin ikkunan alapuolisen puurungon ulkopinnassa (HHL2). Mineraalivillan ja puurungon ulkopintoihin kohdistuu 1 % suuruisen osuus viistosateesta. Tarkasteltava rakenne on US1.

#### 6.1.4 Tuulensuojavillan merkitys

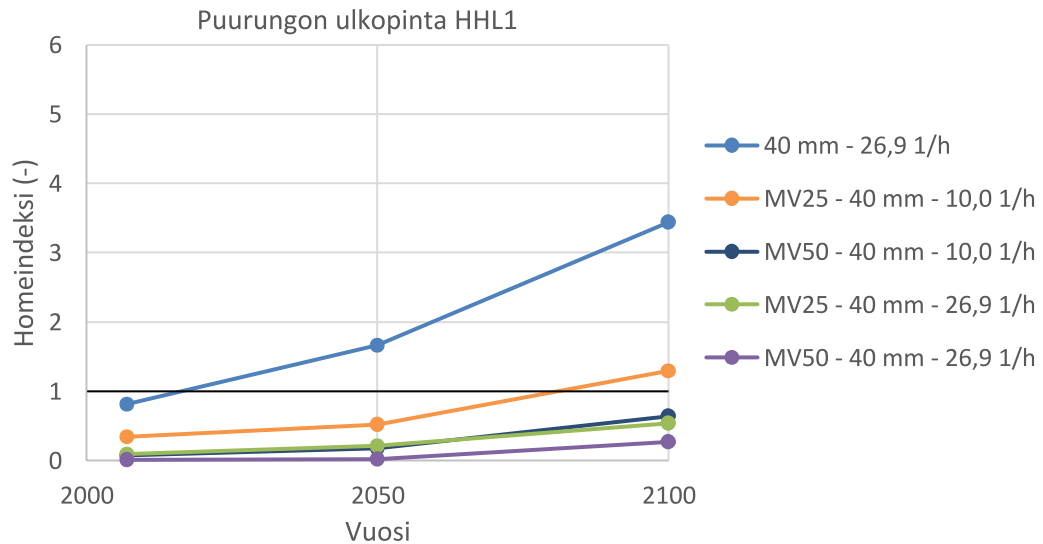
Tuulensuojavillan lisäämisen vaikutuksia rakenteen toimintaan (kuva 6.10) tarkasteltiin kahdella eripaksuisella tuulensuojavillalla (25 mm ja 50 mm).



**Kuva 6.10.** Vaakaleikkaus, ikkunan alapuolelta, ulkoseinärakenteesta US2 ja tarkastelupiste.

Kuvasta 6.11 nähdään että, lämmöneristekerroksen pintaan asennettava lämpöä eristävä ja diffuusioavoin tuulensuojavilla pudottaa ikkunan alapuolisen puurungon ulkopinnan homeindeksin arvoja merkittävästi. Homekasvustoa nykyilmastossa tai vuosien 2050 ja 2100 ilmastoissa ei esiinny, kun tuuletusraon ilmanvaihtuvuus on suunnitelmien

mukaista ja tuulensuojavillalevyn paksuus on 25 mm tai 50 mm. Vuoden 2100 ilmastossa homekasvustoa esiintyy tilanteissa, joissa tuulensuojavillalevyn paksuus on 25 mm ja ilmanvaihtuvuus heikentynyt esimerkiksi virheellisesti asennettujen ikkunapeltien seurauksena. Näin ollen suositeltavana vähimmäispaksuutena tuulensuojavillalle voidaan pitää 50 mm.



**Kuva 6.11.** Tuulensuojamineraalivillan (MV) vaikutus ikkunan alapuolisen puurungon ulkonurkan homeindeksien maksimiarvoihin (HHL1).

Hyvin lämpöä eristävän ja diffuusioavoimen tuulensuojavillan merkitystä rakenteen kosteustekniseen toimintaan ovat tutkineet myös Mäkitalo (2012) ja Jokela (2018) omissa diplomitöissään. Mäkitalon tuloksien perusteella tuulensuojalevyn paksuus tulee olla vähintään 75 mm, jotta homekasvusto HHL1-luokkaan kuuluvan runkotolpan ulkonurkassa voidaan välttää myös vuoden 2100-ilmastossa. Jokelan tuloksissa homekasvustoa esiintyi tietyillä rakenteilla vielä 100 mm tuulensuojalevyn paksuuksilla.

Mahdollisia selittäviä tekijöitä tulosten välillä ovat erot käytetyissä laskentamalleissa ja niihin asetetuissa olosuhteissa tai materiaaliominaisuuksissa. Rakenteen ulkopintaan kohdistettu viistosaderasitus voi olla Jokelan ja Mäkitalon tarkasteluissa laskettu erilaisilla kertoimilla, jolloin tiiliverhotun rakenteen tapauksessa erot seinärakenteen kosteusolosuhteisiin ovat herkästi suuria. Jokela ja Mäkitalo suorittivat laskentatarkastelut puurankarunkoisella tiiliverhotulla seinällä, jolloin tästä tutkimuksesta poikkeava lämmöneristekerroksen sisäpuolinen rakenne voi vaikuttaa myös tuloksiin.

### 6.1.5 Tiiliverhouksen merkitys

Tiili-villa-tiili-ulkoseinärakenteen viistosateelle alttiin tiiliverhouksen ominaisuuksien muuttumisen seurauksia rakenteen kosteustekniseen toimintaan vertailtiin ulkoseinärakenteella US1, jossa käytettiin 40 mm avointa tuuletusrakoa. Tiiliverhouksen ominaisuuksia varioitiin muuttamalla tiiliverhouksen paksuutta, tiilen tyyppiä ja tiilen väriä. Auringon lyhytaaltoisen säteilyn absorptiokertoimenä punaisella tiilellä käytettiin arvoa 0,75 ja keltaisella arvoa 0,55.

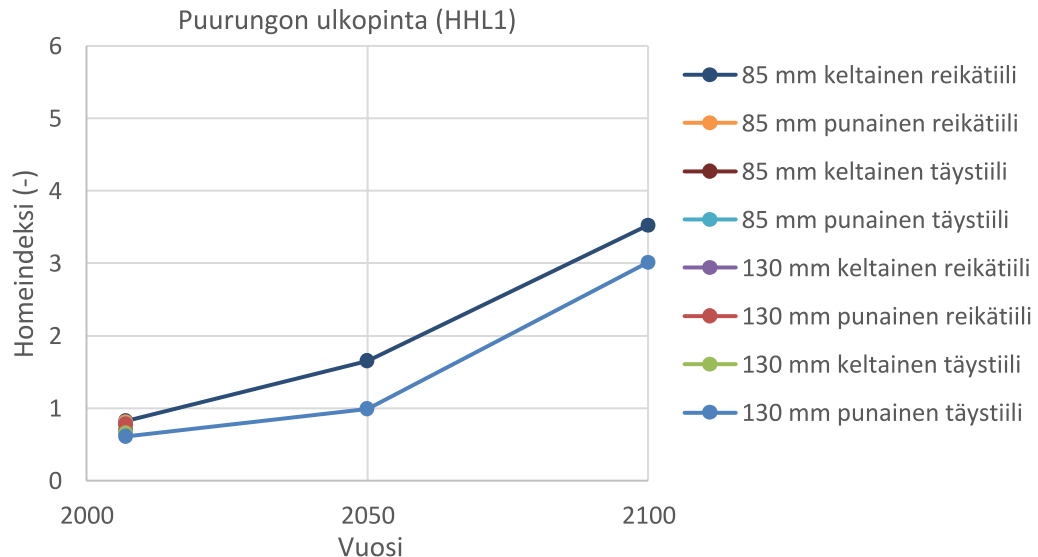
Tulosten perusteella suurin vaikutus rakenteen kosteustekniseen toimintaan on tiilentyypillä, eli sillä käytetäänkö tiiliverhouksessa reikätiiltä vai täystiiltä. Tiilen väri ja paksuus eivät muodostuneet yhtä merkittäväksi tekijöiksi laskentatarkasteluissa. Laskentaan valittujen tiilientyyppien osalta merkittävimmät erot materiaaliominaisuuksissa kosteusteknisen toiminnan suhteen ovat tiilten huokoisuuksissa (reikätiili: 0,30 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, täystiili: 0,24 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>), lämmönjohtavuuksissa (reikätiili: 0,45 W/m·K, täystiili: 0,60 W/m·K) ja kosteusdiffusiviteeteissa. Jokelan (2018) laskentatarkasteluissa tiilen huokoisuutena on käytetty suurempaa arvoa: 0,35 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>. Suurempi tiilen huokoisuus voimistaa esimerkiksi tiiliverhouksen ulkopintaan kohdistuvan viistosateen imeytymistä syvemmälle ulkoseinärakenteen sisäosiin ja voi osaltaan selittää Jokelan kriittisempiä tuloksia tiiliverhottujen seinien kosteusteknisen toiminnan osalta.

**Taulukko 6.3.** Homeindeksin maksimiarvot ikkunan alapuolisen puurungon (HHL1) ulkonurkassa, kun ulkoverhouksen paksuus, tiilen väri ja tiilientyyppi muuttuvat. Tuuletusrako 40 mm, vuoden keskimääräinen ilmanvaihtuvuus 26,9 1/h.

Ulkoverhouksen paksuus (mm)	Tiilen väri	Tiilientyyppi	HHL1
85	keltainen	Reikätiili	0,82
85	punainen	Reikätiili	0,81
85	keltainen	Täystiili	0,69
85	punainen	Täystiili	0,68
130	keltainen	Reikätiili	0,78
130	punainen	Reikätiili	0,77
130	keltainen	Täystiili	0,65
130	punainen	Täystiili	0,61

Ulkopuolisen kosteuden siirtyminen syvemmälle seinärakenteeseen oli vähäisintä 130 mm punaisella täystiilellä nykyilmastossa, jolloin ikkunan alapuolisen puurungon ulkopinnan homeindeksi sai vertailun pienimmän arvon. Vastaavasti korkein homeindeksin arvo muodostui puurungon ulkopintaan 85 mm keltaisella reikätiilellä.

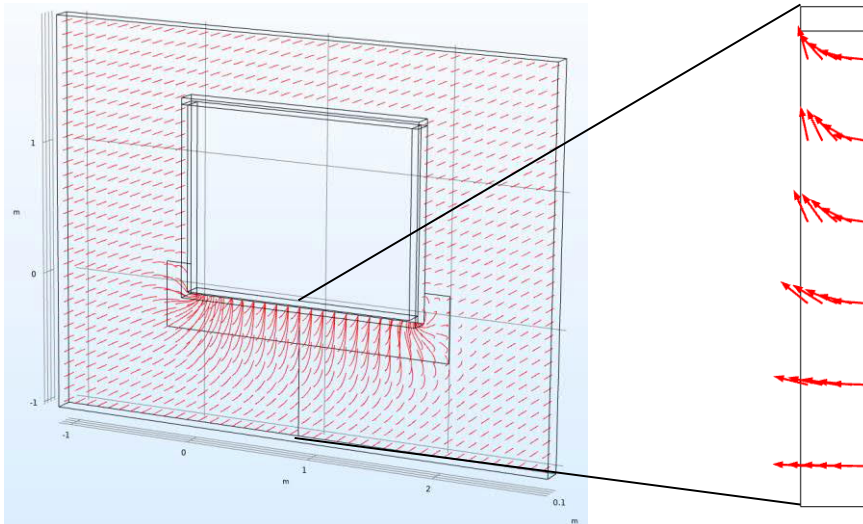
Edellä mainituille tiiliverhouksille suoritettiin tarkastelut myös vuosien 2050 ja 2100 ilmastoissa (kuva 6.12). Taulukon 6.3 muiden tiiliverhouksien tulokset puurungon ulkopinnan homeindeksin suhteen asettuvat tulevaisuuden ilmastoissa edellä esitettyjen tiiliverhouksien väliin eikä näin ollen tarkasteluita näille ollut tarpeen suorittaa.



**Kuva 6.12** Erilaisten tiiliverhousten vaikutus ikkunan alapuolisen puurungon ulkonurkan homeindeksien maksimiarvoihin. Tuuletusraon paksuus on 40 mm ja vuoden keskimääräinen ilmanvaihtuvuus 26,9 1/h.

## 6.2 Ilmavuototarkastelut

Ilmavuototarkasteluissa käytetty laskentamalli ja esimerkkiseinärakenteeseen valitut mittasuhteet ovat tarkemmin esitelty kappaleessa 5.5. Kuvassa 6.13 on havainnollistettu tilannetta, jossa ilmavuoto tapahtuu ikkunan alalaidan apukarmin ja sisäkuoren välistä. Ilmavirtaukset jakaantuvat virtausvastusten suhteen, jolloin apukarmin ja sisäkuoren välisen raon kautta tapahtuvat ilmavirtaukset vähentävät paikallisesti raon läheisyydessä tapahtuvia virtauksia sisäkuoren läpi. Ilmavuodot, jotka tapahtuvat suoraan ikkunaa ympäröivien ikkunakarmin rakojen kautta eivät vaikuta lämmöneristekerroksessa tapahtuviin ilmavirtauksiin.



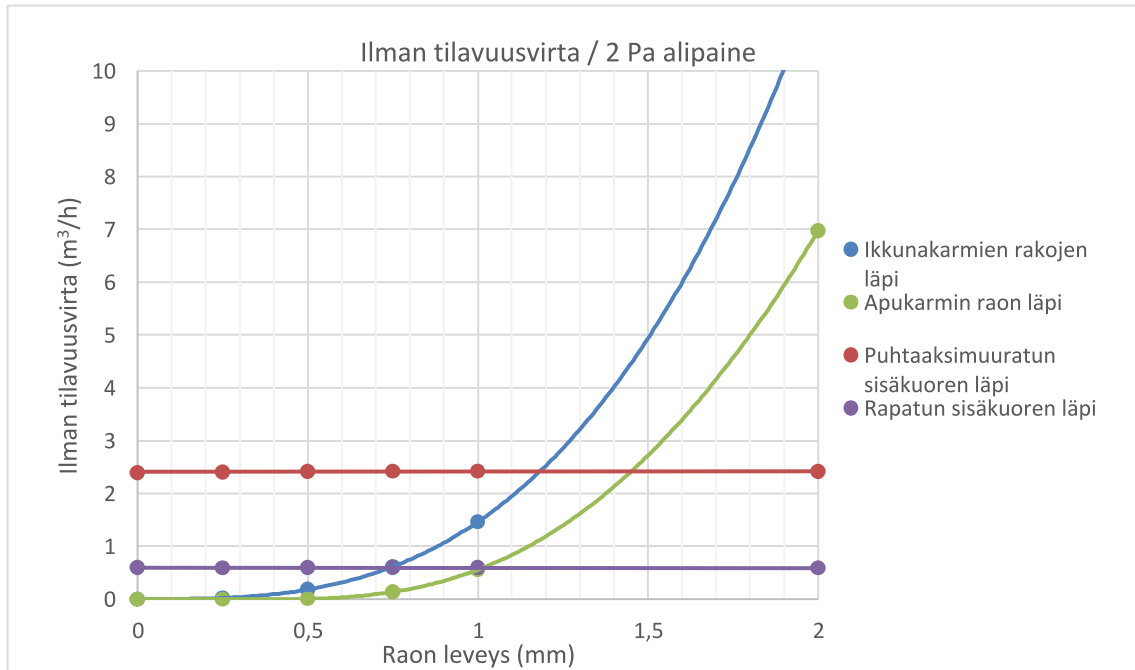
**Kuva 6.13.** Havainnekuva ilmavirtauksien jakaantumisesta sisäkuoren sekä sisäkuoren ja apukarmin välisen raon välillä, kun sisäkuori on rapattu, raon leveys on 1 mm ja sisäilman alipaine 10 Pa. Kuvassa oikealla leikkauskuva ikkunan alapuolisesta seinärakenteesta.

Ilmavuototarkasteluita suoritettiin vakio-paine-eroilla: 2 Pa, 5 Pa ja 10 Pa. Sisäilma asetettiin alipaineiseksi, jolloin ilmavuotojen suunta oli ulkoilmasta sisäilmaan päin. Ilman tilavuusvirran jakaantuminen sisäkuoren ja rakojen välillä eri painesuhteilla on esitetty kuvissa 6.14-6.16. Ilman tilavuusvirran arvot ovat esitetty yksikössä  $\text{m}^3/\text{h}$  eli kuutiometreinä tunnissa.

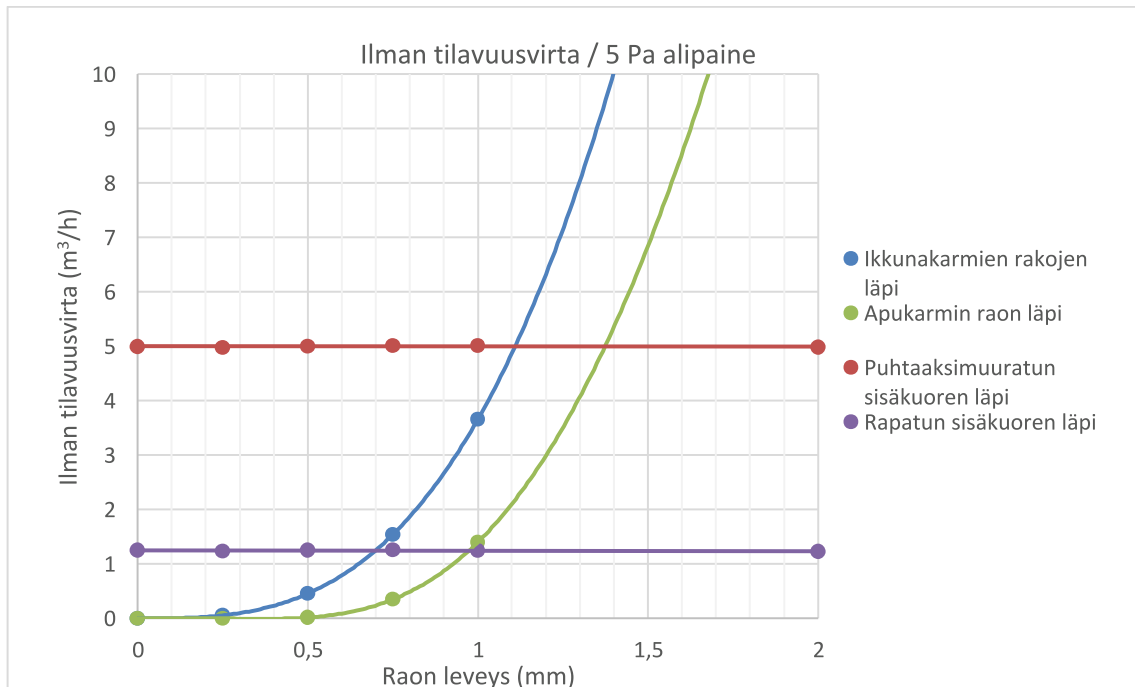
Tuloksista voidaan huomata 2 Pa paine-erolla ikkunakarmien rakojen kautta siirtyvän ilman tilavuusvirran ylittävän ilman tilavuusvirran puhtaaksimuuratun sisäkuoren läpi, kun rakojen leveys kasvaa suuremmaksi kuin 1,2 mm. Rapatun sisäkuoren osalta vastaava raja-arvo rakojen leveydelle on noin 0,7 mm. Apukarmin ja sisäkuoren välisen raon osalta vastaavat lukemat ovat hieman alle 1,5 mm puhtaaksimuuratun sisäkuoren tapauksessa ja noin 1,0 mm rapatun sisäkuoren tapauksessa. Sisäilman alipaineen kasvaessa rakojen kautta tapahtuvat ilmavuodot voimistuvat suhteessa enemmän kuin ilmavuodot sisäkuoren läpi.

Ilmavuotomalliin valituilla ikkuna-aukon mittasuhteilla apukarmin ja sisäkuoren välisen raon kautta ilman tilavuusvirta jää alhaisemmaksi kuin ikkunaa ympäröivien ikkunakarmin rakojen kautta. Rakojen merkittävyyttä ilmavuotojen kannalta vertailtaessa on kuitenkin huomioitava ikkunaa kiertävän ikkunakarmin rakojen yhteenlasketun pituuden olevan 6,4 m, kun apukarmin ja sisäkuoren välisen raon pituus on vain 1,8 m. Lisäksi raon pituus ilmavirtauksen suuntaisesti tarkasteltuna on ikkunakarmin rakojen tapauksessa 150 mm ja apukarmin ja sisäkuoren välisen raon tapauksessa vain 50 mm johtuen käytetystä sahatavarasta. Apukarmin kautta tapahtuva ilmavuoto ei ole suoraan yhteydessä ulkoilmahan vaan lämmöneristekerrokseen. Eristekerroksen ilmanvastuksella on

näin ollen vaikutusta myös apukarmin raossa tapahtuvan ilmavirtauksen suuruuteen. Vaikutus on kuitenkin vähäinen johtuen lämmöneristekerroksen suuresta ilmanläpäisevyyden arvosta.

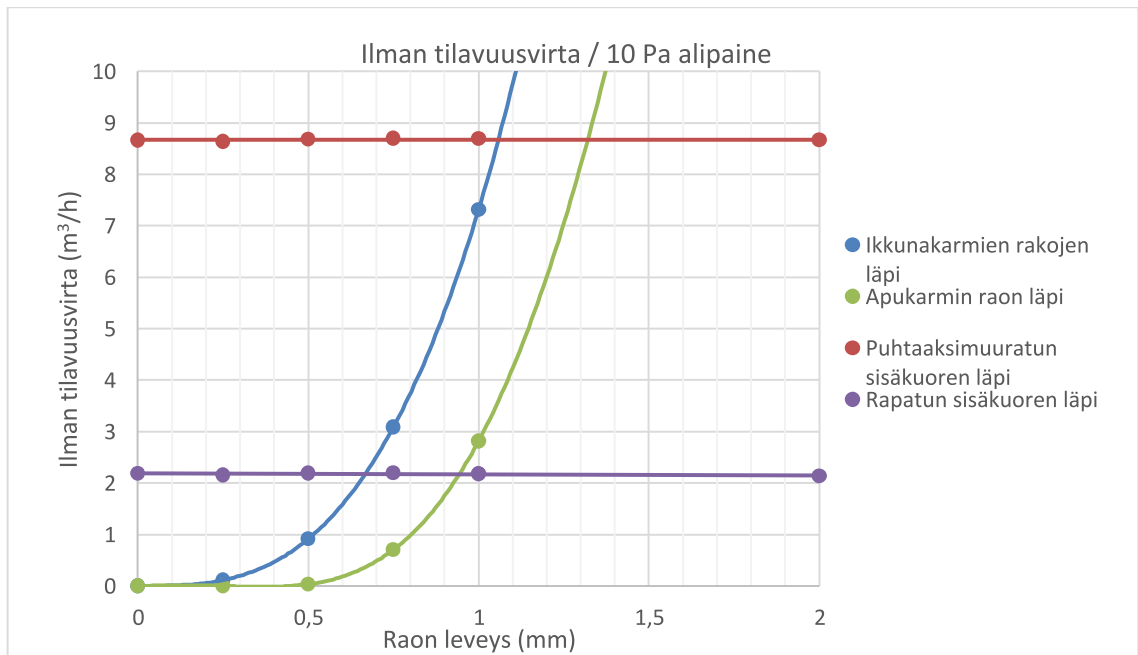


**Kuva 6.14.** Ilman tilavuusvirta ( $m^3/h$ ) sisäkuoren ja rakojen läpi, kun sisäilman alipaine on 2 Pa.



**Kuva 6.15.** Ilman tilavuusvirta ( $m^3/h$ ) sisäkuoren ja rakojen läpi, kun sisäilman alipaine on 5 Pa.

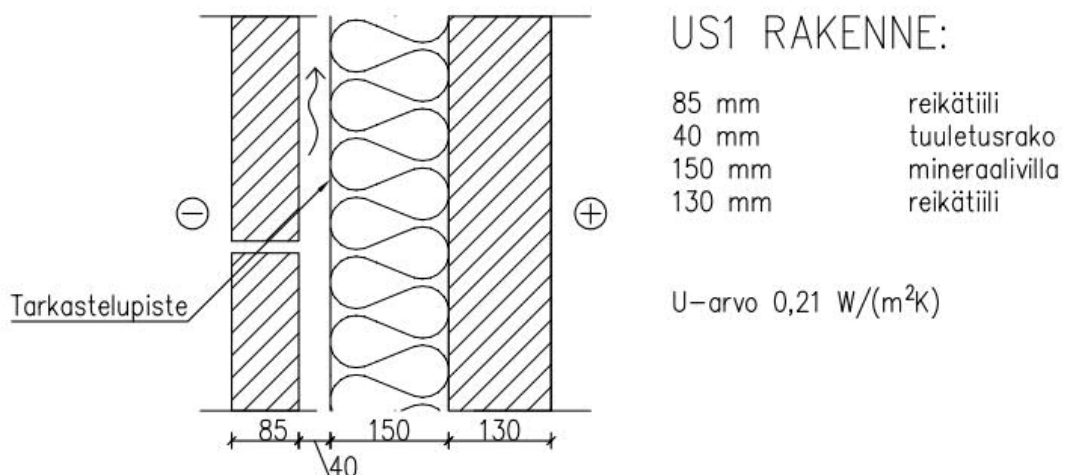




**Kuva 6.16.** Ilman tilavuusvirta ( $m^3/h$ ) sisäkuoren ja rakojen läpi, kun sisäilman alipaine on 10 Pa.

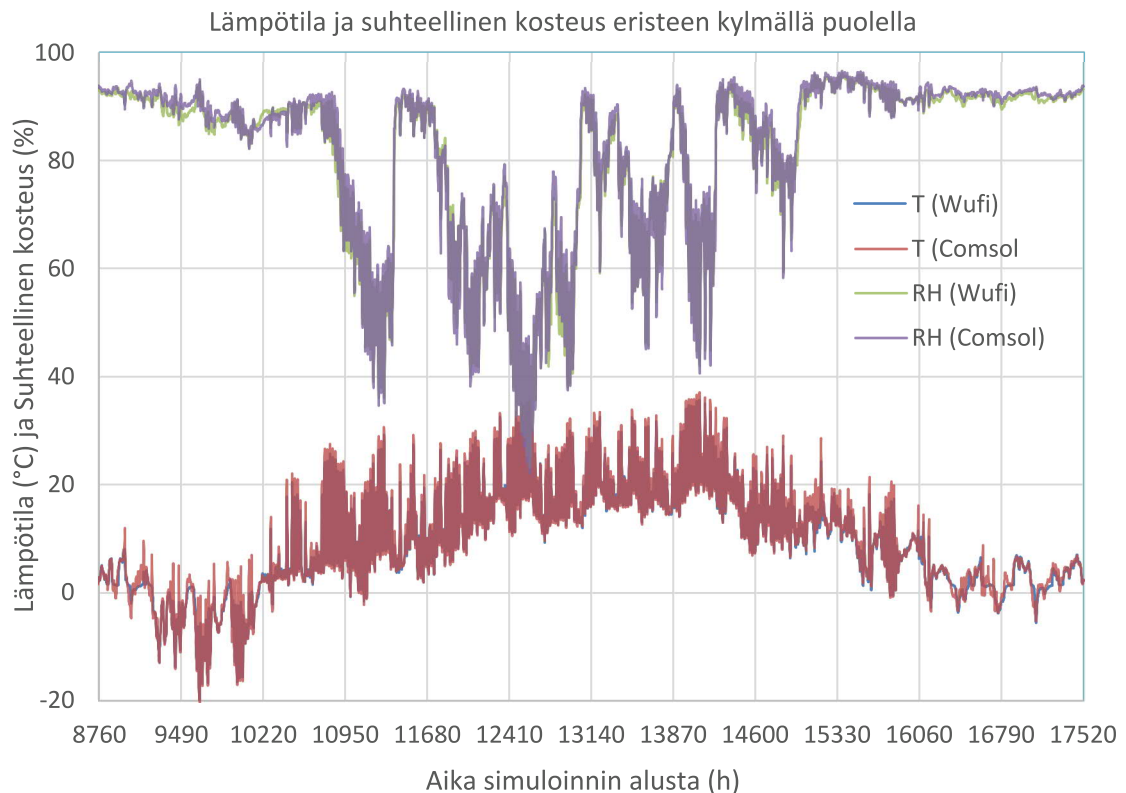
### 6.3 Tulosten vertailu laskentaohjelmien välillä

Laskentatarkastelujen luotettavuutta arvioitiin suorittamalla vertailulaskelmia WUFI Pro 6.3 –ohjelmalla. Tulosten vertailu Comsolin ja Wufin välillä toteutettiin yksiuotteisilla rakennemalleilla. Ennen laskentaohjelmien välistä vertailua varmistuttiin Comsolin tulosten olevan vertailukelpoisia ja lähes identtisiä kaksiuotteisen ja yksiuotteisen mallin välillä, kun tarkastelupisteet sijaitsevat kaukana rakenteen epäjatkuvuuskohtista. Molemmilla ohjelmilla tarkasteltiin alla olevassa kuvassa esitettyä rakennetta US1, joka ohjelmiin mallinnettiin samanlaisena. Ilmasto-olosuhteina molemmissa ohjelmissa käytettiin Vantaan 2007 testivuoden olosuhteita.



**Kuva 6.17** Laskentaohjelmien vertailussa käytetty ulkoseinärakenteen US1 vaakaleikkaus.

Alla olevassa kuvassa 6.18 on esitetty lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvot eriste-kerroksen ja tuuletusraon välisessä rajapinnassa eli lämmöneristekerroksen kylmällä puolella molempien laskentaohjelmien osalta. Tarkastelupisteessä simulointijakson aikana lämpötilan ja suhteellisen kosteuden muutoksissa trendi on laskentaohjelmien välillä hyvin samankaltainen. Pieniä eroja voitiin kuitenkin huomata olosuhteiden muutosnopeudessa. Lämpötilat tyypillisesti reagoivat nopeasti olosuhteiden muutoksiin, mutta suhteellisen kosteuden osalta muutos on hitaampaa. Suurin ero laskentaohjelmien välisissä tuloksissa aiheutuu nimenomaan suhteellisen kosteuden arvoissa, Wufin antamat arvot tarkastelujaksolta ovat keskimäärin 0,7 %-yksikköä pienempiä kuin Comsolin vastaavat arvot. Lämpötilan osalta Wufin antaa keskimäärin 0,3 astetta alhaisempia lämpötila-arvoja. Kyseisen rakenteen tapauksessa Comsolin tulokset ovat hieman kriittisempiä rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta.



**Kuva 6.18.** Comsolin ja Wufin välinen vertailu lämpötilan ja suhteellisen kosteuden osalta lämmöneristeen kylmällä puolella. Tarkasteltava rakenne US1.

Nusser ja Teibinger ovat omissa vertailulaskelmissaan (2012) havainneet materiaalin korkeilla suhteellisen kosteuden arvoilla Comsolin tuloksien olevan aavistuksen suurempia kuin Wufin. Tältä osin tässä tutkimuksessa saadut tulokset vertautuvat hyvin Nusserin ja Teibingerin laskentatarkasteluissa saamiin tuloksiin.

## 7. JOHTOPÄÄTÖKSET

### 7.1 Tiili-villa-tiili-ulkoseinärakenne

Tulosten perusteella voidaan todeta tuuletusraon paksuuden, ilmanvaihtuvuuden ja tuuletusraon läpi kulkevan ilman tilavuusvirran suuruuden vaikuttavan seinärakenteen kosteustekniseen toimivuuteen. Ulkoseinärakenteen korkeuden tai tuuletusraon paksuuden kasvaessa tuuletusraon ilmatilavuus kasvaa tuuletusaukkojen pinta-alan säilyessä vakiona. Tämän seurauksena tuuletusraon ilmanvaihtuvuuskerroin pienenee, kun taas ilman tilavuusvirran ja tuuletusraosta poistuvan kosteuden määrän voidaan olettaa likimain pysyvän vakiona. Tuuletusraon rakennekerroksia kuivattava vaikutus riippuu ilman tilavuusvirran suuruudesta tuuletusraossa. Ilman tilavuusvirran suuruuteen voidaan vaikuttaa ennen kaikkea tuuletusaukkojen pinta-alalla ja tuuletusraon avoimuudella.

Tiiliverhoukseen imeytynyt viistosade siirtyy diffuusiolla ja kapillaarisesti tiiliverhouksen pinnasta syvemmälle rakenteeseen. Kosteuden siirtymistä tiiliverhouksesta edelleen syvemmälle rakenteeseen voidaan kuitenkin vähentää mahdollistamalla tuuletusraossa hyvä ilmanvaihtuvuus. Tämä varmistetaan huolellisella muuraustyöllä ja muuraustyön seurauksena tuuletusraon alaosaan tippuneiden laastipurseiden poistamisella. Ilmanvaihtuvuuden kannalta erittäin oleellista on kiinnittää huomiota tiiliverhouksen alaosan tuuletusaukkojen riittävyteen. Alimman tiilirivin osalta on tyypillisesti ohjeistettu jättämään, joka kolmas pystysauma auki tuuletusraon ilmanvaihtuvuuden mahdollistamiseksi. Laskentatarkasteluiden tuloksista voidaan kuitenkin havaita merkittävä paranus tuuletusraon ilmanvaihtuvuuteen ja edelleen seinän kosteustekniseen toimivuuteen, jos alimmasta tiilirivistä voidaan jättää jokainen pystysauma auki.

Tuuletusraon paksuuden kasvattaminen vähentää tiiliverhouksesta diffuusiolla siirtyvän kosteuden määrää lämmöneristekerrokseen. Lisäksi laskentatarkasteluissa käytetty 40 mm tuuletusrako on myös ohuempaan tuuletusrakoon nähden vikasietoisempi tiiliverhouksen läpi mahdollisesti tunkeutuvaa viistosadetta vastaan. Paksummassa tuuletusraossa laastipurseet eivät myöskään yhtä herkästi tuki tuuletusrakoa ja aiheuta ilmanvaihtuvuuden heikentymistä. Tukkeutuneessa tuuletusraossa laastipurseet voivat aiheuttaa lämmöneristekerrokseen sekä puiisiin rakenteisiin merkittäviä paikallisia kosteusrasituksia ollessaan kontaktissa näiden kanssa. Tämä ongelma korostuu varsinkin seinän alaosissa, jonne saumojen välistä pursuava ylimääräinen laasti pääsee tippumaan.

Tiili-villa-tiili –ulkoseinärakenteessa puhdas mineraalivilla kestää korkeakin suhteellista kosteutta epäorgaanisena materiaalina hyvin ilman merkittävää riskiä homeen kasvulle. Tuuletusrakoon voi mahdollisesti kulkeutua epäpuhtauksia ulkoilmasta, jotka tarttuvat huokoisen mineraalivillan pintaan ja lisäävät homekasvuston herkkyyttä. Tästä ei kuitenkaan vielä ole saatavilla selkeää tutkimusnäyttöä, joten mineraalivillaa käsiteltiin laskentatarkasteluissa puhtaana materiaalina. Ulkoseinärakenteen homeutumisherkkyyden kannalta kriittiseksi tarkastelupisteeksi määriteltiin näin ollen ikkunoiden alapuolinen rakenne, jossa lämmöneristekerroksessa sijaitsevien puurunkojen kylmä puoli eli tuuletusrakoon rajoittuva pinta on olosuhteiden ja materiaalin osalta todennäköisin paikka homekasvuston esiintymiselle.

Merkittävä parannus tiili-villa-tiili-ulkoseinärakenteen toimivuuteen saavutetaan hyvin lämpöä eristävällä ja diffuusioavoimella tuulensuojavillalla. Tuulensuojavillan käyttö rakenteessa nostaa ikkunan alapuolisen puurungon ulkopinnan lämpötilaa, jonka seurauksena suhteellinen kosteus puurungon ulkopinnassa laskee. Tämän seurauksena homekasvustolle suotuisat olosuhteet muuttuvat harvinaisemmiksi ja kestoaltaan lyhyemmiksi tilanteissa, joissa tuuletusraon paksuus on nykyisten suositusten mukaisesti 40 mm ja ilmanvaihtuvuus suunnitellulla tasolla ilman merkittäviä kertahäviöitä.

Tiili-villa-tiili –ulkoseinärakenteiden kannalta nykyisin voimassa olevan ulkoseinärakenteita käsittelevän RT 82-11006 -ohjekortin tiili-villa-tiili –ulkoseinärakennetta voidaan tämän tutkimuksen mukaan pitää toimivina myös 2050 ja 2100 vuoden ilmastoissa. Lisäksi vanhemman, jo kumotun RT 82-10800 -ohjekortin mukaisesti toteutetut rakenteet toimivat saatujen tutkimustulosten perusteella myös tulevaisuuden ilmastoissa, mutta ovat vähemmän vikasietoisia tuuletusraon virheille. Erittäin tärkeää kosteusteknisen toiminnan varmistamiseksi on käyttää rakenteessa 40 mm tuuletusrakoa ja huolehtia tuuletusraon esteettömästä ilmanvaihtuvuudesta. Suositeltavaa on tehostaa ilmavaihtuvuutta jättämällä alimman tiilirivin jokainen pystysauma auki, jos tämä tiiliverhouksen vakavuuden kannalta vain on mahdollista. Ikkunan alapuolisissa ulkoseinärakenteissa erityisesti huomiota tulee kiinnittää ikkunapelteihin ja näiden kautta tapahtuvan tuuletusraon ilmanvaihtuvuuden varmistamiseksi.

Tiiliverhouksessa käytettyjen tiilien merkittävyys ulkoseinärakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta on verrattain vähäinen, kun verrataan tuuletusraon ilmanvaihtuvuuden ja lämpöä hyvin eristävän tuulensuojavillan merkitystä rakenteen kokonaisuuden kannalta. Tutkimukseen valittujen tiilien ominaisuuksien kannalta merkittävin ero syntyi reikätiilen ja täystiilen välillä johtuen tiilien erilaisesta rakenteesta ja toisistaan poikkeavista huokoisuuden, lämmönjohtavuuden ja kosteusdiffusiviteetin arvoista. Tiilen värin

merkitys oli laskentatarkasteluihin valituilla absorptiokertoimen arvoilla hyvin vähäinen. Paksumpi tiiliverhous hidastaa kosteuden siirtymistä syvemmälle rakenteeseen alentaen näin ollen kosteusrasitusta ikkunan alapuolisen puurunkojen ja mineraalivillan osalta. Nykyisten suunnitteluohjeiden suositusta vähintään 120 mm tiiliverhouksesta voidaan pitää perusteltuna korkeilla tai voimakkaalle viistosateelle altistuvilla ulkoseinillä. Tiiliverhouksen osalta huomio tulisikin kiinnittää etupäässä muuraussaumojen kautta tapahtuvaan viistosateen tunkeutumiseen ja pyrkiä muurauslaastin ja oikeiden muuraustekniikoiden avulla vähentämään saumojen kautta tapahtuvaa viistosateen tunkeutumista. Viistosateelle alttiiden seinien muurauslaastiksi tulisikin valita tiivis muurauslaasti, jolla voidaan alentaa tiiliverhouksen läpäisevän viistosateen osuutta.

## 7.2 Ilmavuototarkastelut

Ilmavuototarkasteluiden perusteella ikkunaa ympäröivien karmien ja ikkunan alalaidan apukarmin kautta tapahtuvat ilmavuodot nousevat valituilla tiili-villa-tiili –ulkoseinän mitasuhteilla merkittäväksi sisäkuoren ilmavuotoihin nähden, kun rakojen leveydet karmirakenteissa kasvavat suuruusluokaltaan noin 1 mm kokoisiksi. Sisäkuoren ilmanläpäisevyyden pienentyessä yhä pienemmät raot nousevat oleellisiksi koko ulkoseinän ilmatiiviiden kannalta.

Ilmavuodot ikkunan alalaidan apukarmin ja sisäkuoren välistä vähentävät raon läheisyydessä sisäkuoren läpi tapahtuvia ilmavirtauksia, vaikutus on kuitenkin vähäinen. Vastavasti mineraalivillan suuren ilmanläpäisevyyden takia mineraalivillan vaikutus apukarmin kautta tapahtuvan ilmavuodon määrään on pieni. Apukarmin ja sisäkuoren välinen rako on raon läpi tapahtuvalla ilman tilavuusvirralla mitattuna suuruusluokaltaan verrattavissa suoraan ikkunaa ympäröivien karmirakenteiden läpi tapahtuviin ilmavuotoihin, kun rakojen leveydet vastaavat toisiaan. Ikkunaa kiertävien karmirakenteiden rakojen kautta yhteys sisäilman ja ulkoilman välillä on suurempi, kuin lämmöneristekerroksen sisäpintaan rajoittuvalla apukarmin ja sisäkuoren välisellä raolla. Tällä voi olla merkitystä esimerkiksi rakennuksen energiatehokkuuteen.

Sisäilman ollessa alipaineinen ulkoilmaan nähden ilman mukana siirtyvä kosteus ei ole rakenteen kannalta kriittinen eikä näin ollen kosteuskonvektion huomioiminen ole tarpeellista. Sisäilman ollessa alipaineinen huomio tulee kiinnittää ilmavuotoreittien kautta siirtyviin epäpuhtauksiin eli ulkoilmasta tai mikrobivaurioituneista rakenteista peräisin oleviin partikkeleihin. Raon leveyden kasvaessa partikkeleiden kokojakauma sekä virtausmäärät raon läpi kasvavat merkittävästi, joten leveä rako on haitallisempi sisäilman laadun kannalta kuin monta kapeampaa rako, vaikka näiden yhteenlaskettu pinta-ala

olisikin yhtä suuri. Alipaineen voimistuminen saa yhä suuremman osuuden partikkeleista siirtymään raon läpi. Laboratoriokokeissa 2 Pa paine-erolla 2 µm kokoisista partikkeleista vain 2 % läpäisi 0,5 mm leveän raon, kun 5 Pa paine-erolla vastaava läpäisyprosentti oli jopa 40 % (Mosley et al. 2001). Rakennusvaipan yli vallitsevien painesuhteiden osalta tulisi pyrkiä tasapainotilanteeseen, jolloin sisäilmaan kulkeutuvien partikkeleiden määrä sekä sisäilmasta rakenteisiin tunkeutuva kosteus saataisiin minimoitua.

### 7.3 Laskentatarkasteluiden luotettavuus ja vertailtavuus

Tämän tutkimuksen aikana suoritettuihin rakennusfysikaalisiin laskentatarkasteluihin liittyy erilaisia epävarmuustekijöitä olosuhteiden, materiaaliominaisuuksien ja rakenteen mahdollisen epäideaalimaisen toiminnan suhteen. Erilaiset epävarmuustekijät vaikuttavat laskentatulosten luotettavuuteen, jolloin tulosten vastaavuus todelliseen tilanteeseen nähden heikkenee. Ensiarvoisen tärkeänä voidaan pitää näiden epävarmuustekijöiden tunnistamista. Kun epävarmuustekijät ovat tunnistettu, seuraava askel on pyrkiä haaroitamaan epävarmuustekijän vaihteluväli riittävällä tarkkuudella. Tämän jälkeen on mahdollista toteuttaa erilaisia herkkyystarkasteluita, joissa epävarmuustekijälle annetaan lukuaroja vaihteluväliltä ja tarkastellaan vaikutuksia rakenteen toiminnan kannalta.

Ulkoilman olosuhteiden alueelliset vaihtelut voivat olla suuria. Tämä konkretisoituu etenkin viistosateen kohdalla, joka tarkasteltavaan ulkoseinärakenteen kohdistuvista rasitustekijöistä on hyvin kriittinen. Ulkoseinärakenteeseen kohdistuva viistosade on voimakkaasti riippuvainen ilmansuunnasta, ympäröivistä esteistä ja suojaavista rakenteista kuten räystäistä. ASHRAE 160 standardin suositusta käyttää laskentatarkasteluissa yhden prosentin viistosadeosuuden tunkeutumisesta suoraan ulkoverhouksen läpi voidaan pitää hyvin karkeana tapana mallintaa vuotava rakenne. Vanhojen rakenteiden kohdalla etenkin tiiliverhouksessa ja muurauslaastissa voi olla paljon hajontaa viistosateen läpäisevyyden suhteen, jolloin suositus on herkästi ali- tai ylilimitoitu. Suunnitteluvaiheessa ulkoseinärakenteen vikasietoisuuden arvioimista varten kyseisen suosituksen sisällyttäminen laskentatarkasteluihin voi olla perusteltua, vaatien kuitenkin tapauskohtaista arviointia laskentatarkastelun suorittajalta.

Tässä tutkimuksessa tarkastelut suoritettiin keskitetysti ikkunoiden alapuolisiin rakenteisiin, joka tiili-villa-tiili-ulkoseinärakenteessa on ainoa alue, jossa käytetään orgaanista ja näin ollen homehtumiselle herkkää materiaalia. Lisäksi suurin osa ilmapuodoista keskittyvät lisäksi ikkunarakenteiden ympärille, jolloin mahdolliset mikrobivauriot ikkunarakenteen läheisyydessä voivat vaikuttaa merkittävästi sisäilman laatuun. Epäorgaanisen mi-

neraalivillan osalta homehtumisherkkyyden on kuitenkin havaittu kohoavan merkittävästi, kun mineraalivilla on ollut riittävän kauan kontaktissa orgaanisen materiaalin kanssa homekasvustolle suotuisissa olosuhteissa (Viitanen 2004). Tuuletusrakoon rajautuvalla mineraalivillalla tilanteen voi jossain määrin ajatella olevan edellä esitetyn tilanteen kaltainen. Huokoinen mineraalivilla on altis tuuletusraon mahdollisille epäpuhtauksille, kuten esimerkiksi siitepölylle. Mineraalivillaan tarttuvat ulkoilman epäpuhtaudet voivat mahdollisesti kasvattaa mineraalivillan homehtumisherkkyyttä. Mineraalivillan homehtumisherkkyyden kasvua tukevat myös kuntotutkimuksissa kerätyt materiaalinäytteet mineraalivillasta, joissa on laboratoriotutkimuksissa havaittu vaihtelevasti mikrobikasvustoa. Epäpuhtauksien kulkeutuminen mineraalivillakerroksen läpi sekä epäpuhtauksien vaikutus mineraalivillan homehtumisherkkyyteen voisivat olla mahdollisia jatkotutkimusaiheita tämän tutkimuksen pohjalta.

Tuuletusraossa vallitseva lämpötilaero ulkoilmaan nähden perustuu mittauksiin, jotka on toteutettu eteläpuoleisella ulkoseinällä, jossa tiiliverhouksena on käytetty 85 mm paksumaa punaista reikätiiltä. Keltaisen tiiliverhouksen takana lämpötilaero jää voimakkaalla auringonpaisteella mahdollisesti hieman alhaisemmaksi johtuen keltaisen tiilen pienemmästä lyhytaaltoisen säteilyn absorptiokertoimesta. Tämän seurauksena lämpötilan aiheuttama noste vähenee, joka alentaa edelleen myös tuuletusraon keskimääräistä ilmanvaihtuvuutta. Todellisuudessa tiilen värillä voi siis olla suurempi vaikutus ulkoseinän kosteustekniseen toimivuuteen kuin mitä tämän tutkimuksen puitteissa suoritettujen laskelmat osoittavat. Tämä vaatisi kuitenkin kenttätutkimuksia, joissa tutkittaisiin tuuletusraon olosuhteita erilaisten tiiliverhousten takana.

Ilmavuotomallissa suurimmat epätarkkuudet liittyvät rakojen mittasuhteiden määrittelyyn. Olemassa olevasta rakennuskannasta on erittäin vaikeaa, ellei jopa mahdotonta poimia laskentamallia varten edustava arvo, koska ilmavuotojen kaltaisissa epäideaalitalanteissa hajonta on hyvin suurta. Lisäksi rakojen pintojen karkeuteen liittyvä epävarmuus aiheuttaa hajontaa tuloksiin. Comsolissa raot määriteltiin tasalevyisiksi, olettaen ilmavirtauksen raossa tapahtuvan sileäpintaista rakoa pitkin. Todellisuudessa rakojen pinnat etenkin puun ja tiilimuurauksen tapauksessa ovat enemmän tai vähemmän epätasaisia ja karkeita aiheuttaen ilmavirtaukselle virtausvastusta. Myös sisäkuoren ilmanläpäisevyyden arvoissa voi olla paljon hajontaa vastaavalla tavalla kuin tiiliverhouksen viistosateen läpäisevyydessä. Ulkoseinän yli vallitsevat paine-ero eivät todellisuudessa säily vakiona vaan muuttuvat alati tuulen, lämpötilan ja ilmanvaihdon vaikutuksesta.

Tässä tutkimuksessa ideaalirakenteilla toteutetut vertailulaskelmat osoittivat Comsolin ja Wufin välillä laskentaerojen olevan hyvin pieniä ja rakenteiden kosteusteknisen analysoinnin ja arvioinnin kannalta merkityksettömiä. Vähäiset erot ohjelmien välisissä tuloksissa selittyvät ohjelmien erilaisesta numeerisesta tavasta ratkaista osittaisdifferentiaaliyhtälöitä lämmön ja kosteuden siirtymisen suhteen.



## 8. YHTEENVETO

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli tarkastella tiili-villa-tiili –ulkoseinärakenteen rakennusfysikaalista toimintaa ja vertailla erilaisten rakenneratkaisujen vaikutusta seinän lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan ja arvioida samalla nykysuositusten mukaisen tiili-villa-tiili-ulkoseinärakenteen toimintaedellytyksiä tulevaisuuden ilmastossa, jossa tiiliverhoukseen kohdistuva viistosateen määrä tulee kasvamaan voimistuneiden tuulten ja lisääntyneiden sateiden seurauksena.

Nykyilmastossa vanhojen tiili-villa-tiili –ulkoseinärakenteiden toimintaa voidaan pitää heikkona ja homekasvuston esiintymistä ikkunoiden alapuolisten puurunkojen ulkopinnoissa todennäköisenä. Tämä on pitkälti seurausta rakenteen heikosta kuivumispotentiaalista, joka aiheutuu tuuletusraon alhaisesta ilmanvaihtuvuudesta. Vanhojen 1960-1980 -luvun tiiliverhottujen ulkoseinärakenteiden takana on tyypillisesti käytetty 20 mm tuuletusrakoa, joka entisaikaan on mielletty asennusvaraksi tiiliverhouksen muuraamista ajatellen eikä niinkään tuuletusraoksi, jolla parannettaisiin ulkoseinän kosteusteknisestä toimintaa. Ohut tuuletusrako voi olla alaosastaan laastipurseiden tukkima, jolloin ilmanvaihtuvuus on huomattavasti heikentynyt avoimeen tuuletusrakoon verrattuna.

Tiili-villa-tiili –ulkoseinärakenteiden tiiliverhouksessa esiintyvät pakkasen tai epätasaisen painumisen aiheuttamat raot ja halkeamat aiheuttavat viistosateen tunkeutumista suoraan tiiliverhouksen läpi aina lämmöneristekerrokseen saakka. Ohut 20 mm tuuletusrako yhdistettynä heikkoon ilmanvaihtuvuuteen ei pysty poistamaan tiiliverhouksen läpi tunkeutunutta ylimääräistä kosteutta riittävän tehokkaasti, joten seinärakenteen toiminta heikkenee entisestään. Tuuletusraon kasvattaminen ja ilmanvaihtuvuuden parantaminen lisäävät rakenteen vikasietoisuutta myös tiiliverhouksen läpi mahdollisesti tapahtuvien vuotojen tapauksissa.

Merkittävä parannus rakenteen toiminnassa saavutetaan paksummalla tuuletusraolla, huolellisella tiiliverhouksen muurauksella ja mahdollisten laastipurseiden putsamisella pois tuuletusraosta. Tiiliverhouksen alaosan tuuletusaukot muodostavat pullonkaulan ilman tilavuusvirralle ja edelleen ilmanvaihtuvuudelle ja voivat alentaa ilmanvaihtuvuuden tuuletusraossa jopa kymmenesosaan puuverhottuihin rakenteisiin verrattuna. Ilmanvaihtuvuutta voidaankin huomattavasti parantaa, jos tiiliverhouksen alimman tiilirivin avointen pystysaumojen lukumäärää kasvatetaan. 40 mm avoimella tuuletusraolla varustetut tiili-villa-tiili–ulkoseinärakenteet ovat toimivia vielä nykyilmastossa, ellei tiiliverhouksen läpi tapahdu voimakasta viistosateen tunkeutumista halkeamien ja laastisaumojen kautta.

2000-luvun alkuvuosista lähtien tiili-villa-tiili –ulkoseinärakenteissa on ohjeistettu käyttämään hyvin kosteutta kestäväää tuulensuojavillaa, joka kiinnitetään lämmöneristekerroksen läpi muurattuun sisäkuoreen. Tässä tutkimuksessa saatujen tulosten perusteella voidaan nykyilmastossa ja tulevaisuuden ilmastossa toimivia tiili-villa-tiili-ulkoseinärakenteita toteuttaa nykyohjeiden mukaisesti käyttäen 50 mm hyvin lämpöä eristävää ja diffuusioavointa mineraalivillatuulensuojalevyä. Ulkoseinärakenne täyttää tällöin nykyisin voimassa olevan asetuksen ulkoseinän lämmöneristävyyden osalta, kun varsinaisen mineraalivillan paksuus on 150 mm. Kosteusteknisen toimivuuden varmistamiseksi tuuletusraon paksuutena on suositeltavaa käyttää 40 mm tuuletusrakoa ja varmistua tuuletusraon riittävästä ilmanvaihtuvuudesta. Riittävä ilmanvaihtuvuus varmistetaan huolehtimalla muurauksen aikana syntyneet laastipurseet pois tuuletusraon alaosasta, sekä kiinnittämällä huomiota tiiliverhouksen alimman tiilirivin tuuletusaukkojen lukumäärään. Ikkunan alapuolisissa rakenteissa tulee varmistua ikkunapeltien asentamisesta, siten ettei tuuletusraon ilmanvaihtuvuutta heikennetä.

Materiaalivalinnoilla voidaan alentaa ulkopuolista kosteusrasitusta ja edellytyksiä homekasvuston syntymiselle. Tiiliverhouksen läpi tunkeutuvan viistosateen määrää voidaan alentaa tiiliverhousta paksuntamalla ja käyttämällä tiivistä muurauslaastia. Ikkunan alapuolisissa puurungoissa höylätyn puun käyttäminen heikentää homekasvuston mahdollisuuksia puun pinnalla verrattuna karkeahöylättyyn puuhun. Tiili-villa-tiili ulkoseinärakenteen osalta puuta tarvitaan vain ikkuna- ja ovirunkoihin, joten kustannus karkeahöylätyn puun vaihtamisesta höylättyyn puumateriaaliin on vähäinen.

Tässä tutkimuksessa ikkuna-aukollisen tiili-villa-tiili –ulkoseinärakenteen läpi tapahtuvien ilmavuotojen jakaantumista muuratun sisäkuoren ja ikkunarakenteen yhteydessä esiintyvien rakojen välillä tarkasteltiin puhtaaksimuuratun sekä rapatun sisäkuoren tapauksissa. Ikkunakarmien kautta tapahtuvat ilmavuodot nousivat suuremmiksi kuin ympäröivän sisäkuoren läpi tapahtuvat ilmavuodot, kun rakojen leveys on noin 1 mm. Sisäilman alipaineisuuden voimistuminen kasvattaa rakojen läpi tapahtuvaa ilmavirtausta enemmän kuin sisäkuoren läpi tapahtuvaa ilmavirtausta. On kuitenkin selvää, että useat erilaiset rakenneratkaisut, seinien ikkunoiden ja rakojen mittasuhteet sekä muuttuvat painesuhteet aiheuttavat paljon hajontaa ilmavuotojen määrään ja suuruusluokkaan ja näin ollen on hankalaa valita laskentatarkasteluihin edustavia parametreja.

Ilmavuototarkasteluiden osalta voidaan todeta sama kuin rakenteen kosteusteknisen toiminnankin osalta. Kriittisin kohta ulkoseinärakenteessa sijoittuu ikkunoiden ympärille, jossa ilmavuotoja suurimmalla todennäköisyydellä esiintyy. Mahdollinen mikrobivaurio

ikkunakarmien ja ikkunan alapuolisen puurungon läheisyydessä yhdistettynä ikkunakarmien kautta tapahtuviin ilmavuotoihin voivat aiheuttavaa sisäilman laadun heikkene- mistä ja terveyshaittoja tilojen käyttäjille. Ilmavuotojen mukana kulkeutuvan ilman ja il- man sisältämien epäpuhtauksien kulkeutuminen sisäilmaan on kuitenkin voimakkaasti riippuvainen raon leveydestä ja sisäilman alipaineisuudesta. Mikrobivaurio rakenteessa ei näin ollen automaattisesti tarkoita sisäilmaongelmaa eikä sisäilmaongelmat aina johdu rakenteissa esiintyvistä mikrobivaurioista. Vaikka näiden välillä selvä korrelaatio onkin. Vanhoja epäideaaleja rakenteita tarkastellessa arviot rakenteen kosteusteknisestä toi- mivuudesta ja ilmavuotojen mahdollinen sisäilman laatua heikentävä vaikutus tulee ar- vioida tapauskohtaisesti kosteus- ja sisäilmateknisen kuntotutkimuksen pohjalta.

# LÄHTEET

- A 20.12.2017/1009. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171009>, (viitattu 14.12.2019).
- A 20.12.2017/1010. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171010>, (viitattu 22.3.2019).
- A 24.12.2017/782. Ympäristöministeriön asetus rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170782>, (viitattu 7.11.2019).
- Aho Hanna, Korpi Minna, (toim.) (2009). Ilmanpitävien rakenteiden ja liitosten toteutus asuinrakennuksissa. Tampere, 100 s.
- Björkholtz, D. (1997). Lämpö ja kosteus: rakennusfysiikka. 2. painos, Rakennustieto Oy, Helsinki, 150 s.
- Blocken, B. and Carmeliet, J. (2004). A review of wind-driven rain research in building science. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 92, pp. 1079-1130.
- Blocken, B., Derome, D. and Carmeliet, J. (2013). Rainwater runoff from building facades: A review. *Building and Environment*, Vol. 60, pp. 339-361.
- Dickson, D.J. (1981). Air flow through and within masonry walls. Chester, 17 p.
- Falk, J. (2014). Rendered rainscreen walls - cavity ventilation, ventilation drying and moisture-induced cladding deformation. Lund University, 83 p.
- Falk, J., Molnár, M. and Larsson, O. (2014). Investigation of a simple approach to predict rainscreen wall ventilation rates for hygrothermal simulation purposes. *Building and Environment*, Vol. 73, pp. 88-96.
- Ge, H., (2015). Influence of time resolution and averaging techniques of meteorological data on the estimation of wind-driven rain load on building facades for Canadian climates. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 143, pp. 50-61.
- Hagentoft, C. (2001). Introduction to building physics. Studentlitteratur, Lund, Sweden, 422 p.
- Hens, H. (2012). Building physics: heat, air and moisture: fundamentals and engineering methods with examples and exercises. Ernst & Sohn, Berlin, Germany, 284 p.
- Hens, H., Janssens, A., Depraetere, W., Carmeliet, J. and Lecompte, J. (2007). Brick cavity walls: a performance analysis based on measurements and simulations. *Journal of Building Physics*, Vol. 31, pp. 95-124.
- Jokela, T. (2018). Kipsilevytuulensuojallisten puurunkoisten ulkoseinien rakennusfysiikallinen toiminta. Tampereen teknillinen yliopisto, 113 s. + 29 liites.
- Jylhä, K., Ruosteenoja, K., Räisänen, J., Venäläinen, A., Tuomenvirta, H., Ruokolainen, L., Saku, S. & Seitola, T. (2010). Arvioita Suomen muuttuvasta ilmastosta sopeutumistutkimuksia varten. ACCLIM-hankkeen raportti 2009. 102 s.

- Kauppi, A., Rautiainen, L. & Saarimaa, J. (1990). Tiili- ja puuseinät: ongelmat, syyt, ratkaisut. Rakentajain kustannus, Helsinki, 47 s.
- Kronvall, J. (1980). Air flows in building components. Lund Institute of Technology, 194 p.
- Laine, K. (2010). Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet. 122 s. + 32 liites.
- Laine, M. & Ylä-Mattila, R. (1982). Tiilirakenteet. Oy Lohja Ab, Oy Partek Ab, Suomen Tiiliteollisuusliitto ry, Helsinki, 98 s.
- Langmans, J., Desta, T.Z., Alderweireldt, L. and Roels, S. (2016). Field study on the air change rate behind residential rainscreen cladding systems: A parameter analysis. *Building and Environment*, Vol. 95, pp. 1-12.
- Liu, D. and Nazaroff, W.W. (2003). Particle penetration through building cracks. *Aerosol Science & Technology*, Vol. 37, pp. 565-573.
- Liu, D. and Nazaroff, W.W. (2001). Modeling pollutant penetration across building envelopes. *Atmospheric Environment*, Vol. 35, pp. 4451-4462.
- Long, C.M., Suh, H.H., Catalano, P.J. and Koutrakis, P. (2001). Using time-and size-resolved particulate data to quantify indoor penetration and deposition behavior. *Environmental science & technology*, Vol. 35, pp. 2089-2099.
- Mäkiö, E. (1994). Kerrostalot 1960-1975. Rakennustietosäätiö, Helsinki, 288 s.
- Mäkitalo, M. (2012). Puurunkoisten ulkoseinien kosteustekinen toimivuus nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Tampereen teknillinen yliopisto, 134 s. + 37 liites.
- Mayer, E. and Künzeli, H. (1983). Untersuchungen über die notwendige Hinterlüftung an Außenwandbeleidung aus großformatigen Bauteilen. *Franhofer Institut für Bauphysik, Forschungsbericht B Ho*, Vol. 1, 83 Seiten.
- Mosley, R.B., Greenwell, D.J., Sparks, L.E., Guo, Z., Tucker, W.G., Fortmann, R. and Whitfield, C. (2001). Penetration of ambient fine particles into the indoor environment. *Aerosol Science & Technology*, Vol. 34, pp. 127-136.
- Nazaroff, W.W., (2004). Indoor particle dynamics. *Indoor Air*, pp. 175-183.
- Neuvonen, P. (2006). Kerrostalot 1880-2000: arkkitehtuuri, rakennustekniikka, korjaaminen. Rakennustieto, Helsinki, 288 s.
- Nevander, L.E. & Elmarsson, B. (1994). *Fukthandbok: praktik och teori. 2., rev. utg., Svensk byggtjänst*, Stockholm, 504 p.
- Nieminen, J. (1988). Rakennusta ympäröivä mikroilmasto: mittauksia koetalosta. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo, 100 s.
- Nusser, B. and Teibinger, M., (2012). Coupled Heat and Moisture Transfer in Building Components-Implementing WUFI Approaches in COMSOL Multiphysics, *Proceedings of the COMSOL Users Conference 2012 Milan (2012)*, pp. 4 p.
- Peat, J.K., Dickerson, J. and Li, J. (1998). Effects of damp and mould in the home on respiratory health: a review of the literature. *Allergy*, Vol. 53, pp. 120-128.

- Pentti, M. & Hyypöläinen, T. (1999). Ulkoseinärakenteiden kosteustekninen suunnittelu. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, 147 s.
- Philipona, R., Philipona, R., Froehlich, C., Fröhlich, C., Betz, C. and Betz, C. (1995). Characterization of pyrogeometers and the accuracy of atmospheric long-wave radiation measurements. *Applied Optics*, Vol. 34, pp. 1598-1605.
- Pinterić, M. (2017). *Building physics: from physical principles to international standards*. Springer, Cham, Switzerland, 256 p.
- Pirinen, J. (1999). Hyvän rakentamistavan mukainen pientalojen kosteuden hallinta eri vuosikymmeninä: lisensiaatintutkimus. Tampereen teknillinen korkeakoulu, 126 s.
- Puhakka, E. & Sisäilmätietokeskus (1996). *Terveellinen sisäilma. Suomen sisäilmaston mittauspalvelu*, Helsinki, 71 s.
- RakMK, C.2. (1998). *Kosteus, määräykset ja ohjeet 1998*. Ympäristöministeriö, Helsinki, 7 s.
- RakMK, D.2. (2011). *Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto, määräykset ja ohjeet 2012*. Ympäristöministeriö, Helsinki, 34 s.
- RakMK, D.5. (2012). *Rakennusten energiatehokkuus, määräykset ja ohjeet 2012*. Ympäristöministeriö, Helsinki, 72 s.
- Reijula, K., Ahonen, G., Alenius, H., Holopainen, R., Lappalainen, H., Palomäki, E. & Reinman, M. (2012). *Rakennusten kosteus- ja homeongelmat*. Eduskunnan tarkastusvaliokunta, 207 s.
- RIL 107-2012 *Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet*. Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL, Helsinki, 219 s.
- RIL 250-2011 *Kosteudenhallinta ja homevaurioiden estäminen*. Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry, Helsinki, 243 s.
- RIL 99 (1975). *Muuratut rakenteet*. Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry, Helsinki, 238 s.
- ROTI 2019 (2019). *Rakennetun omaisuuden tila*. Saatavissa: [https://www.ril.fi/media/2019/roti/roti\\_2019\\_raportti.pdf](https://www.ril.fi/media/2019/roti/roti_2019_raportti.pdf), (viitattu 1.8.2019).
- RT 07-11299 (2018). *Sisäilmastoluokitus, 2018 - Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset*. Rakennustieto Oy, Helsinki, 24 s.
- RT 82-10438 (1990). *Ulkoseinärakenteita*. Rakennustieto Oy, Helsinki, 32 s.
- RT 82-10510 (1993). *Tiilirakenteet*. Rakennustieto Oy, Helsinki, 11 s.
- RT 82-10800 (2003). *Ulkoseinärakenteita*. Rakennustieto Oy, Helsinki, 36 s.
- RT 82-11006 (2010). *Ulkoseinärakenteita*. Rakennustieto Oy, Helsinki, 32 s.
- Salonvarra, M., Karagiozis, A.N., Pazera, M. and Miller, W., (2007). Air cavities behind claddings-what have we learned, *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings Tenth International Conference (2007)*, pp. pp. 2-7.
- Sandin, K. (1991). *Skalmurskonstruktionens fukt-och temperaturbetingelser*. Statens råd för byggnadsforskning, 12 p.

- Seppänen, K. (2010). Painesuhteet rakennuksen ulkovaipan yli. 9, Kuopio, 41 s.
- Serth, R.W.& Lestina, T. (2014). Process heat transfer: principles and applications. Second, Academic Press, Oxford, [England]; Waltham, [Massachusetts], 680 p.
- Seuri, M.& Palomäki, E. (2000). Haasteellinen sisäilma: riskianalyysi sisäilmaongelmissa. Rakennustieto, Helsinki, 138 s.
- SFS-EN 1991-1-4 (2011). Rakenteiden kuomat. Osa 1-4: Yleiset kuomat. Tuulikuormat. Suomen standarditoimistoliitto SFS ry, Helsinki, 256 s.
- SFS-EN ISO 10456 (2010). Building materials and products. Hygrothermal properties. Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values. Technical Corrigendum 1 (ISO 10456:2007/Cor 1:2009). Suomen standarditoimistoliitto SFS ry, Helsinki, 5 p.
- SFS-EN ISO 6946 (2017). Building components and building elements. Thermal resistance and thermal transmittance. Calculation methods (ISO 6946:2017). Suomen standarditoimistoliitto SFS ry, Helsinki, 50 p.
- SFS-EN ISO 9972 (2015). Thermal performance of buildings. Determination of air permeability of buildings. Fan pressurization method (ISO 9972:2015). Suomen standarditoimistoliitto SFS ry, Helsinki, 31 p.
- Siikanen, U. (1996). Rakennusfysiikka: perusteet ja sovelluksia. Rakennustieto Oy, Helsinki, 219 s.
- Straube, J.F. and Burnett, E., (2000). Simplified prediction of driving rain on buildings, Proceedings of the international building physics conference (2000). , Eindhoven University of Technology Eindhoven, the Netherlands, pp. pp. 375-382.
- Straube, J. & Burnett, E. (1995). Vents, ventilation, and pressure moderation. Ottawa, University of Waterloo, 166 p.
- Straube, J., VanStraaten, R., Burnett, E. & Schumacher, C. (2004). Development of design strategies for rainscreen sheathing membrane performance in wood frame walls. University of Waterloo, Report 8, .
- Straube, J.F., (2001). The influence of low-permeance vapor barriers on roof and wall performance. Proceedings of Thermal Performance of Whole Buildings VIII, Clearwater, FL, 12 p.
- Straube, J. and Finch, G. (2009). Ventilated Wall Claddings: review, field performance, and hygrothermal modeling. Building Science Corporation, pp. 1-25.
- Suomalainen homemalli (2018). Rakennusfysiikan tutkimusryhmä. Saatavissa: <https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/suomalainen-homemalli/>, (viitattu 14.5.2019).
- TenWolde, A., (2008). ASHRAE Standard 160P--criteria for moisture control design analysis in buildings. ASHRAE Transaction, Vol. 114, pp. 167-169.
- Tilastokeskus (2018). Rakennuskanta 2018. Saatavissa: [https://www.stat.fi/til/rakke/2018/rakke\\_2018\\_2019-05-21\\_kat\\_002\\_fi.html](https://www.stat.fi/til/rakke/2018/rakke_2018_2019-05-21_kat_002_fi.html), (viitattu 1.8.2019).
- Trechsel, H.R.& American Society for Testing and Materials (2001). Moisture analysis and condensation control in building envelopes. ASTM, West Conshohocken (PA), 192 p.

Van Straaten, R. (2003). Measurement of Ventilation Drying of Vinyl Siding and Brick Clad Wall Assemblies. University of Waterloo, 182 p.

Viitanen, H. (2004). Betonin ja siihen liittyvien materiaalien homehtumisen kriittiset olosuhteet-betonin homeenkesto. 6, 25 s.

Vinha, J. (2007). Hygrothermal Performance of Timber-Framed External Walls in Finnish Climatic Conditions: A Method for Determining the Sufficient Water Vapour Resistance of the Interior Lining of a Wall Assembly. Tampere University of Technology, 338 p. + App. 10 p.

Vinha, J. & Käkelä, P. (1999). Vesihöyryn siirtyminen seinärakenteissa diffuusion ja konvektion vaikutuksesta. Tampereen teknillinen korkeakoulu, 110 s.

Vinha, J., Korpi, M., Kalamees, T., Eskola, L., Palonen, J., Kurnitski, J., Valovirta, I., Mikkilä, A. & Jokisalo, J. (2005). Puurunkoisten pientalojen kosteus- ja lämpöolosuhteet, ilmanvaihto ja ilmatiiviys. 102 s. + 10 liites.

Vinha, J., Valovirta, I., Korpi, M., Mikkilä, A. & Käkelä, P. (2005). Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona. 101 s. + 211 liites.

Vinha, J. (2019). RAK-33500 Rakennusfysiikka, Lämmön konvektio, Tampereen teknillinen yliopisto . 45 s.

Vinha, J. (2014). Rakennusfysiikka: 1, Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Suomen Rakennusinsinöörien liitto, Helsinki, 500 s.

Vinha, J., Korpi, M., Kalamees, T., Jokisalo, Juha, Eskola, L., Palonen, J., Kurnitski, J., Aho, H., Salminen, M., Salminen, K. & Keto, M. (2009). Asuinrakennusten ilmanpitävyys, sisäilmasto ja energiatalous. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan laitos, 148 s.

Vinha, J., Laukkarinen, A., Mäkitalo, M., Nurmi, S., Huttunen, P., Pakkanen, T., Kero, P., Manelius, E., Lahdensivu, J., Köliö, A., Lähdesmäki, K., Piironen, J., Kuhno, V., Pirinen, M., Aaltonen, A. & Suonketo, J. (2013). Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos, 354 s. + 43 liites.

Vinha, J., Tuominen, T., Kurnitski, J., Korpi, M. & Mattila, J. (2009). RT 80-10974. Teollisesti valmistettujen asuinrakennusten ilmanpitävyyden laadunvarmistusohje. 24 s.

Viúdez-Mora, A. (2011). Atmospheric downwelling longwave radiation at the surface during cloudless and overcast conditions. Measurements and modeling. Universitat de Girona, 138 p.

Weijo, I., Lahdensivu, J., Turunen, T., Ahola, S., Sistonen, E., Vornanen-Winqvist, C. & Annala, P. (2019). Kosteus- ja mikrobivaurioituneiden rakennusten korjaus. Ympäristöministeriö, Helsinki, 284 s.

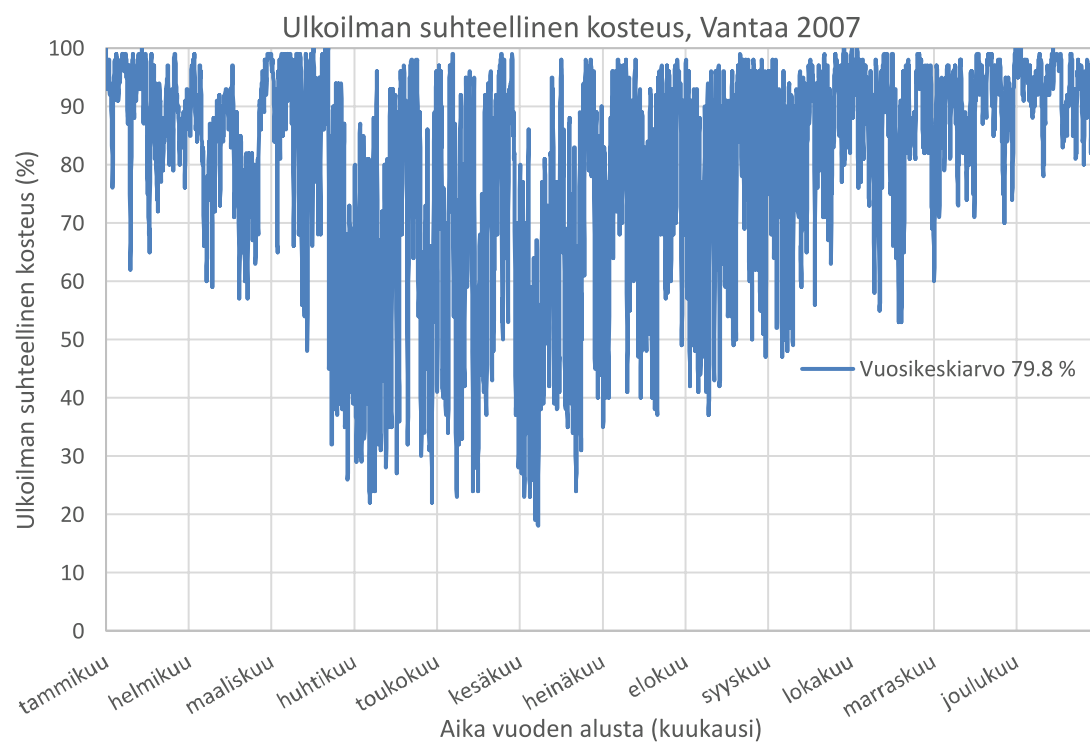
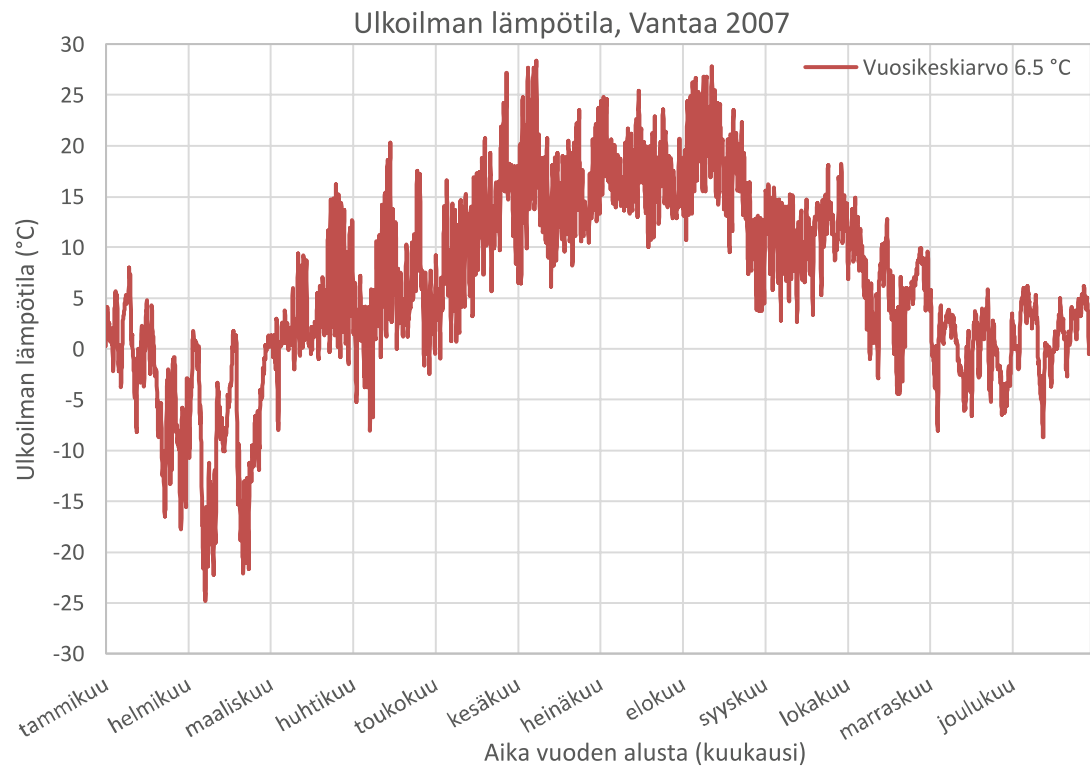
Ympäristöministeriö (2018). Tyypillisiä olemassa olevien vanhojen rakennusten alkuperäisiä suunnittelu-arvoja - Energiatodistusoppaan 2018 liite. 49 s.

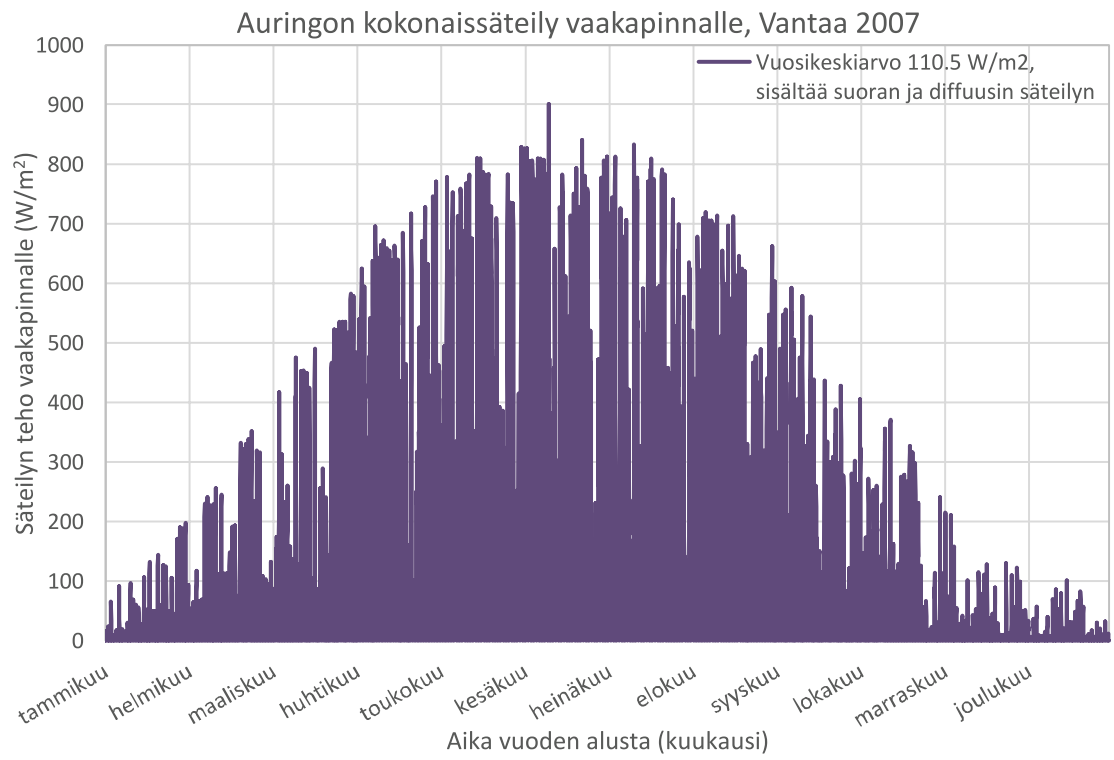
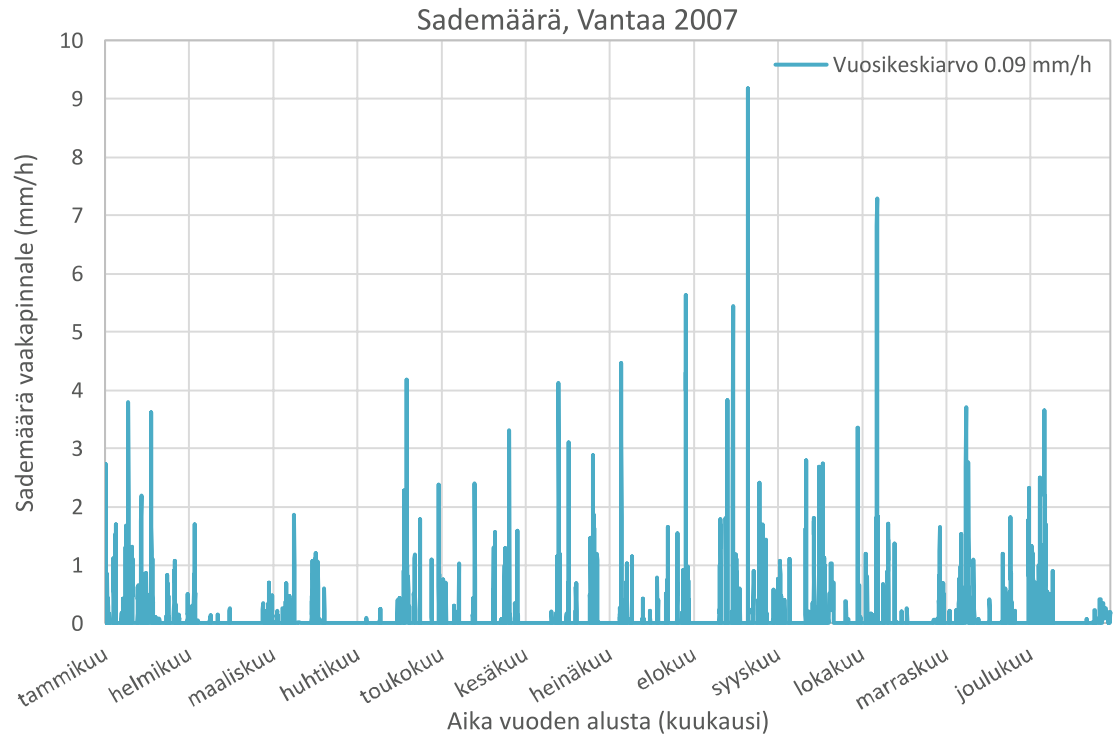
Ympäristöopas, 2. (2016). Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus. Ympäristöministeriö, Helsinki, 234 s.

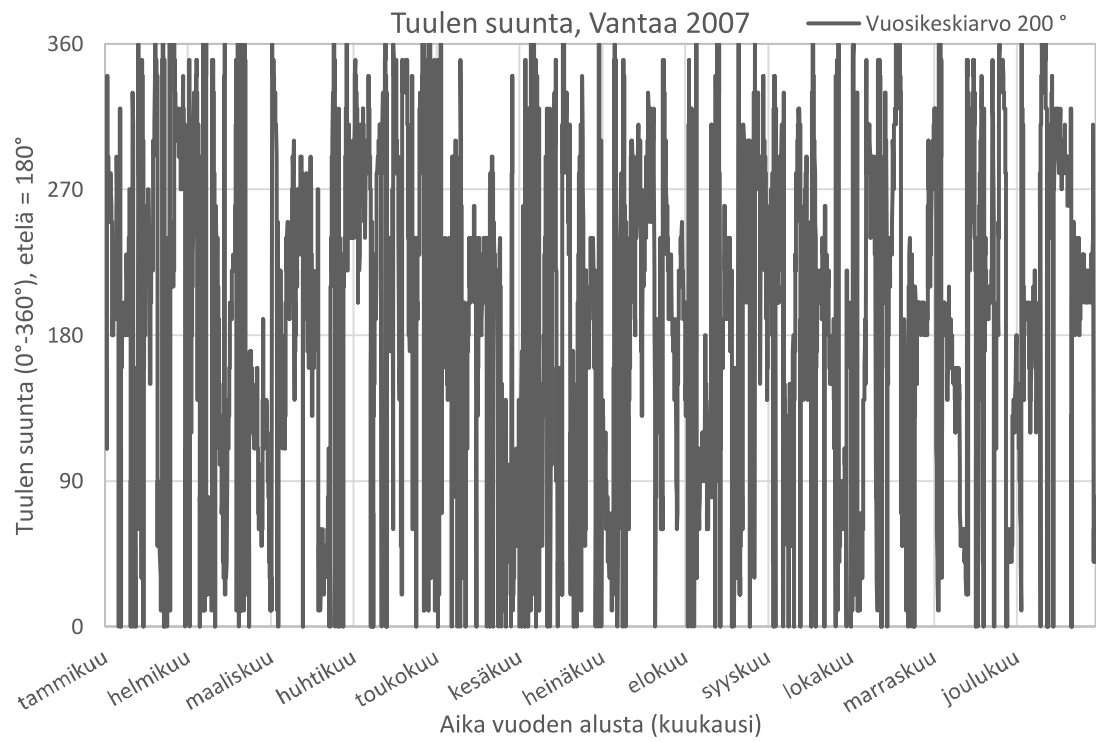
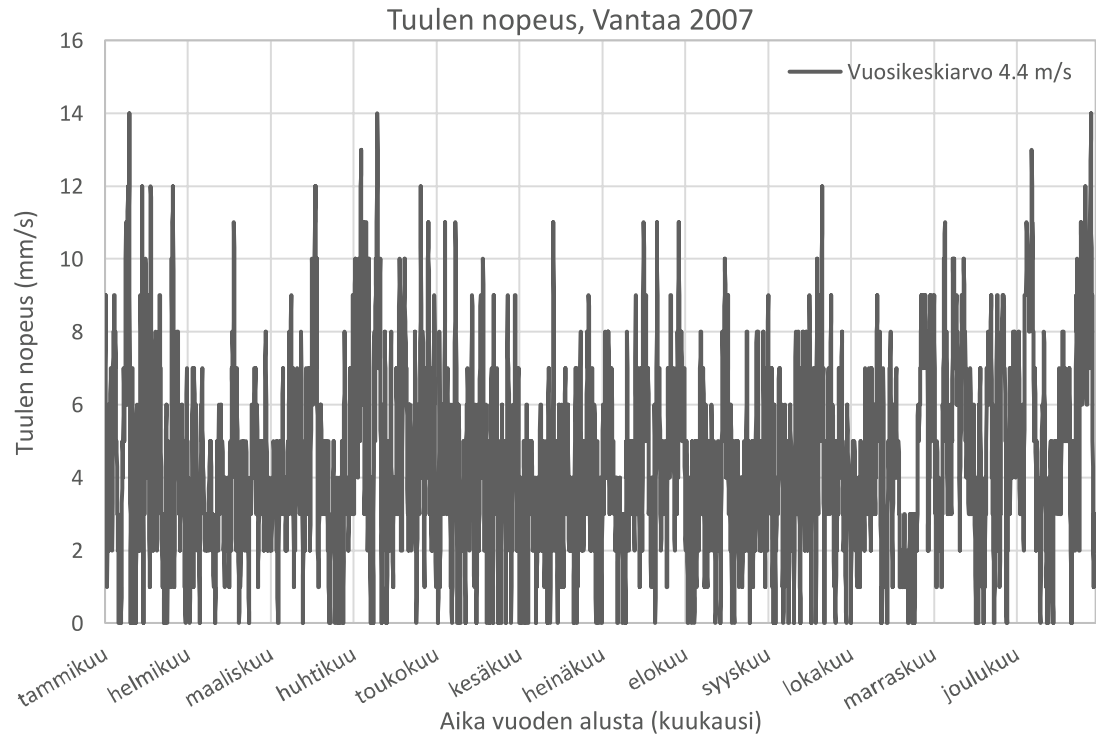
Young, H.D., Freedman, R.A. & Ford, A.L. (2016). University physics with modern physics. Vol 14, Pearson, Harlow, 752 p.

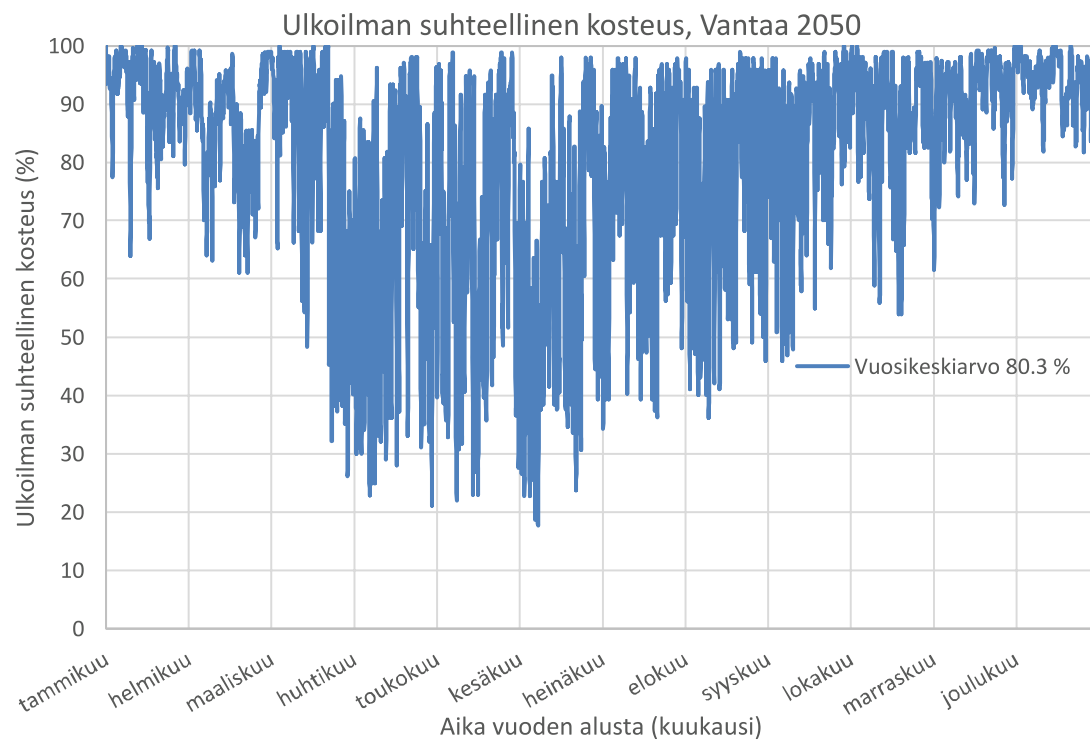
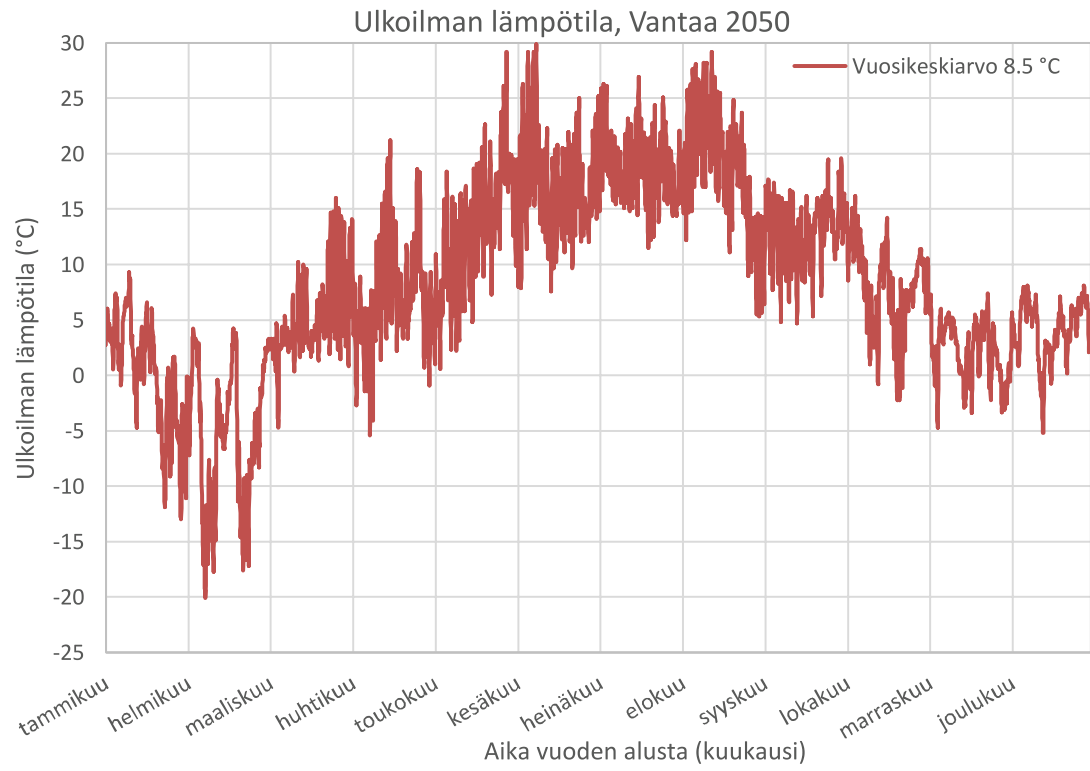


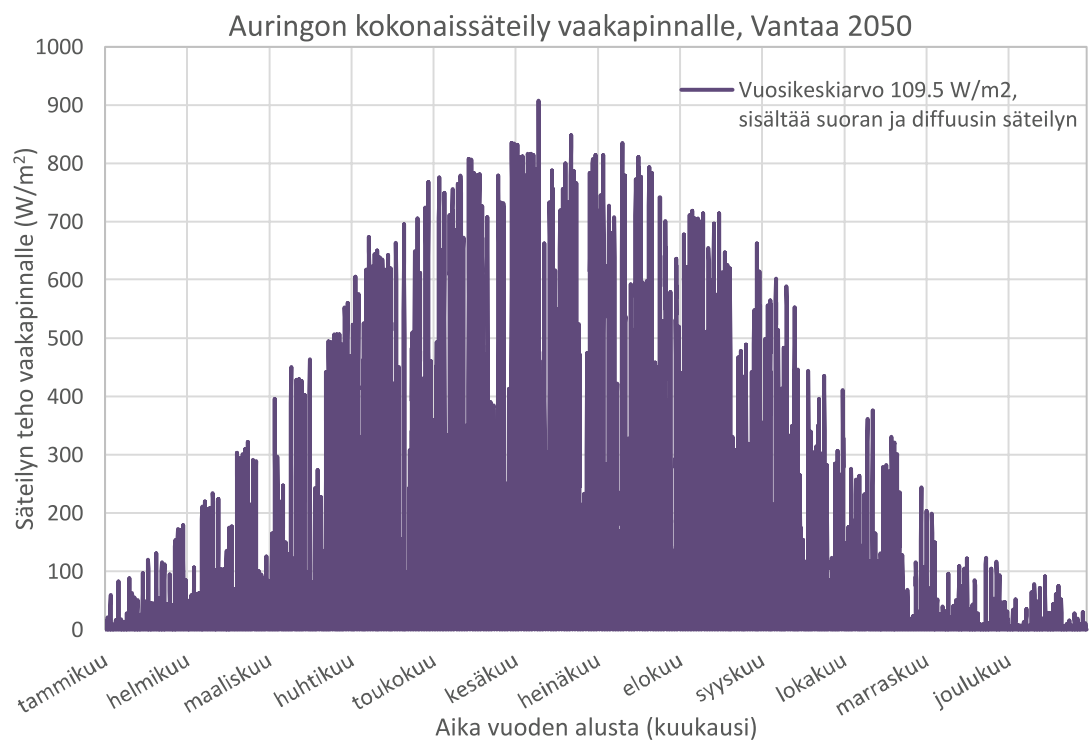
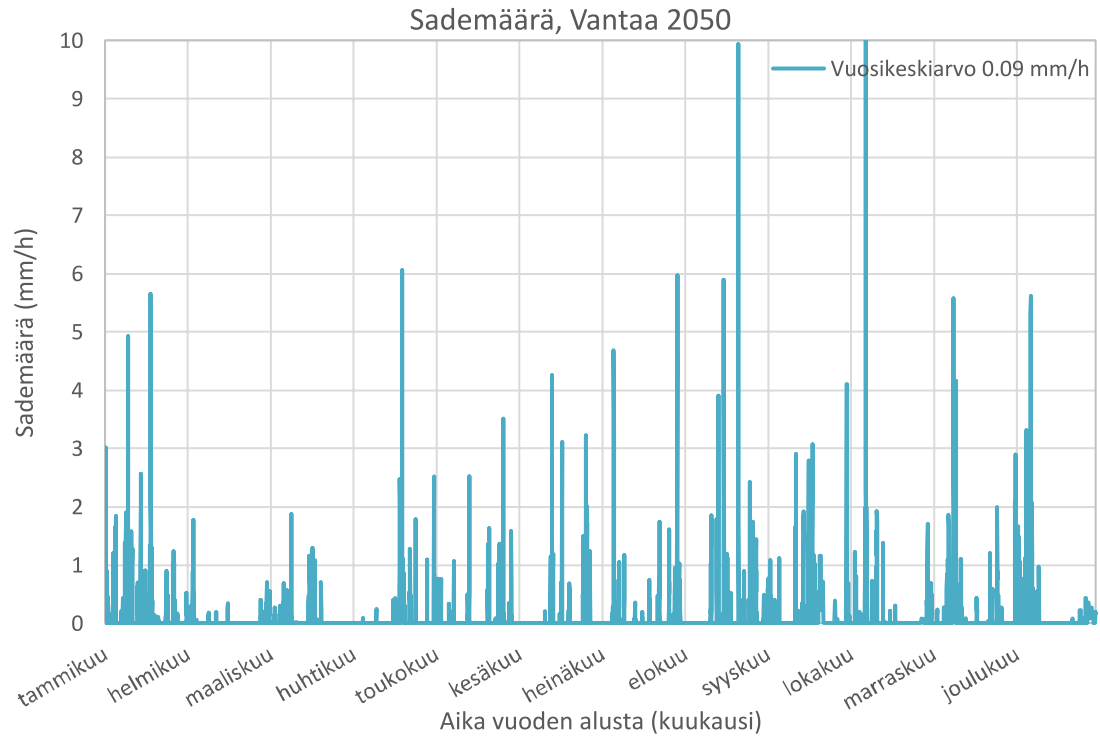
# LIITE 1: ULKOILMAN OLOSUHTEET

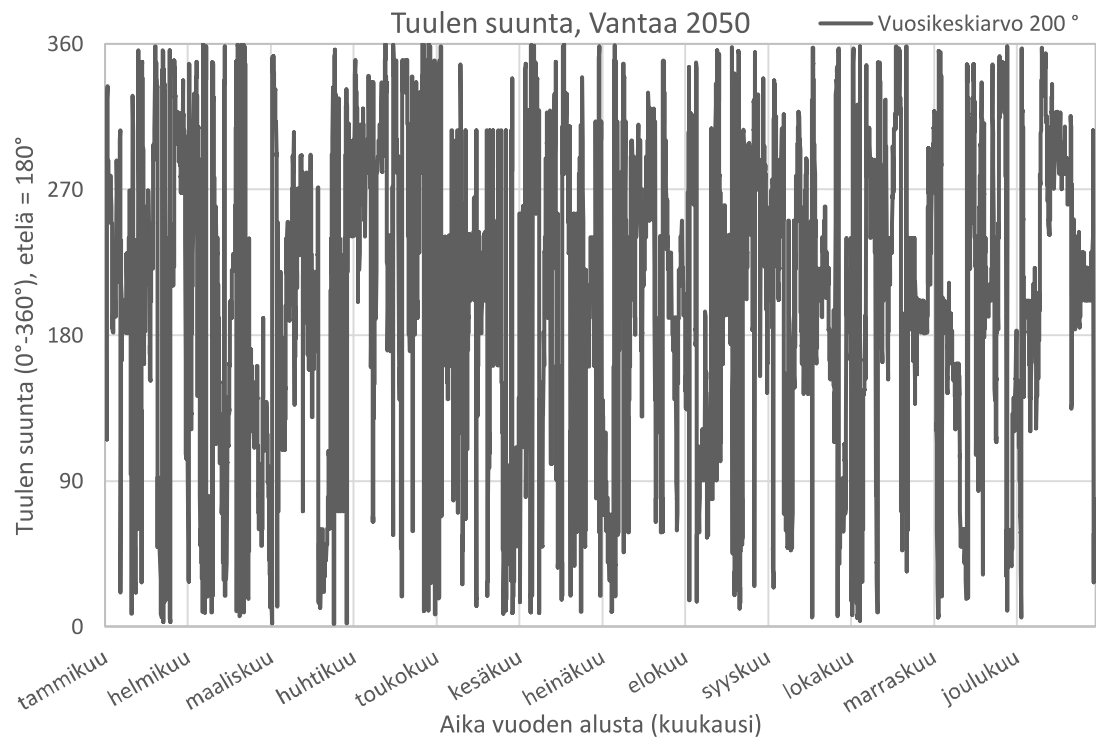
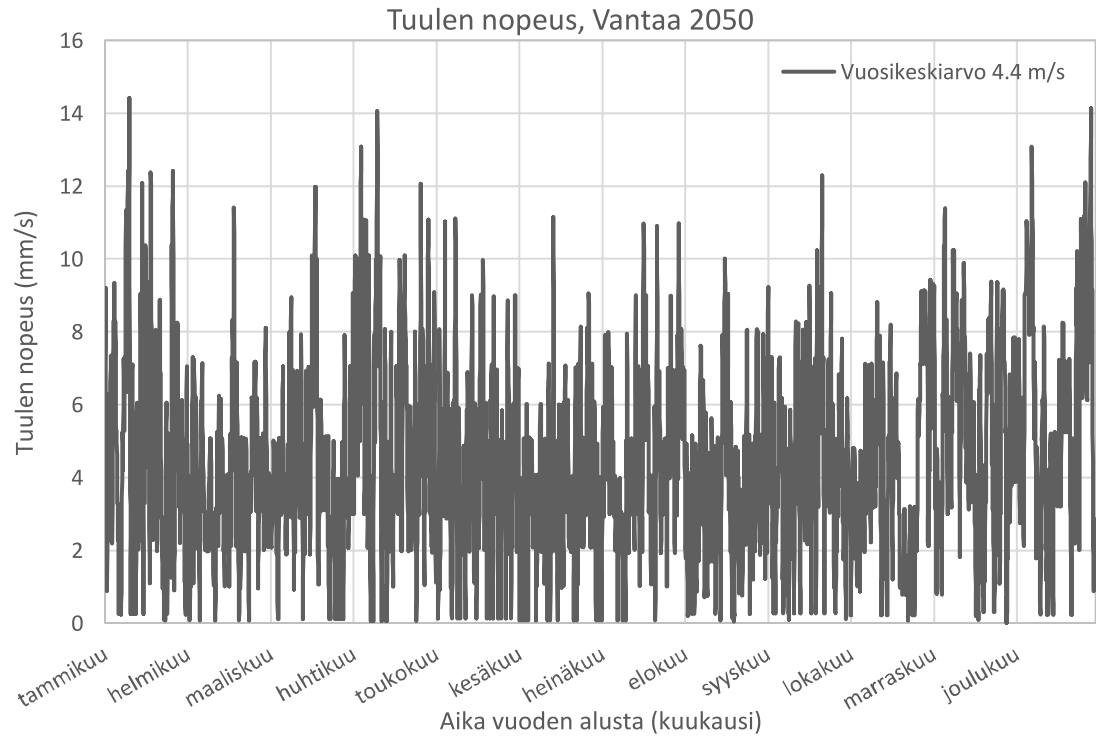




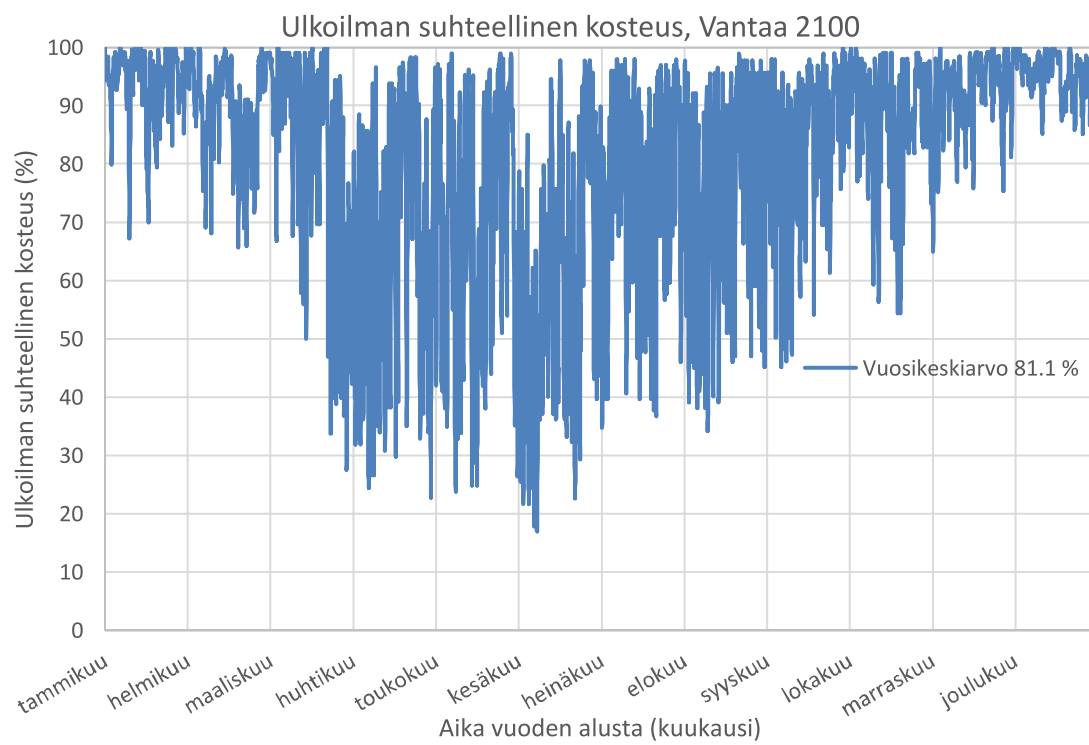
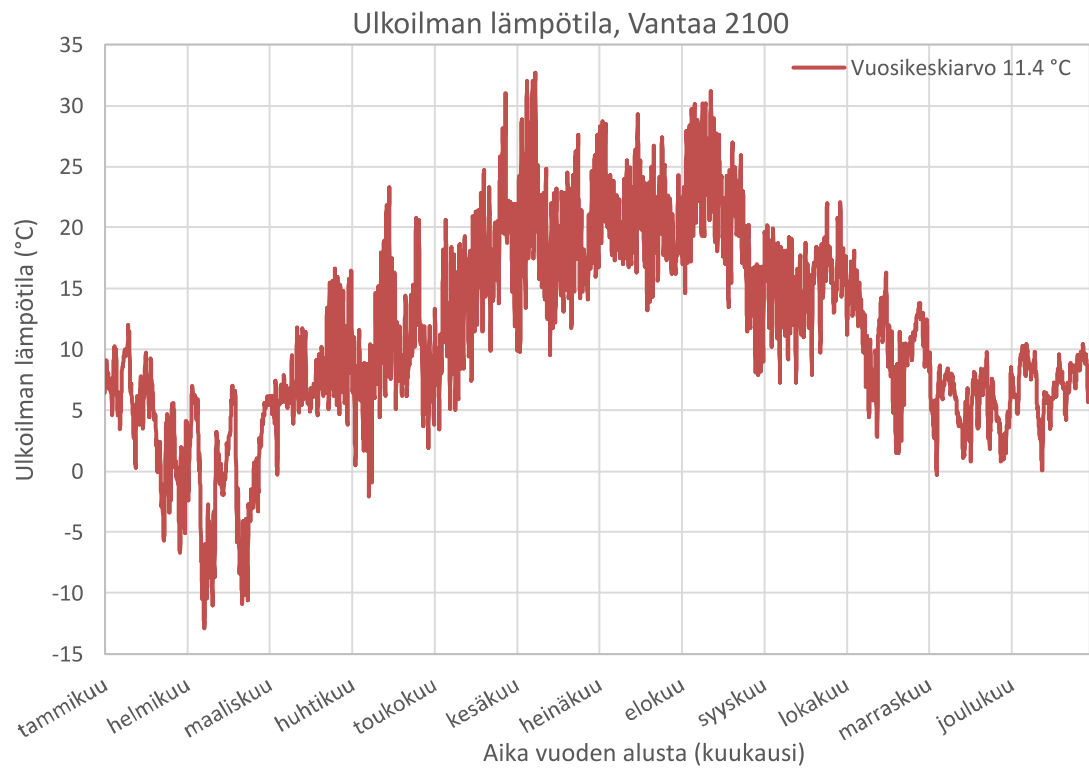


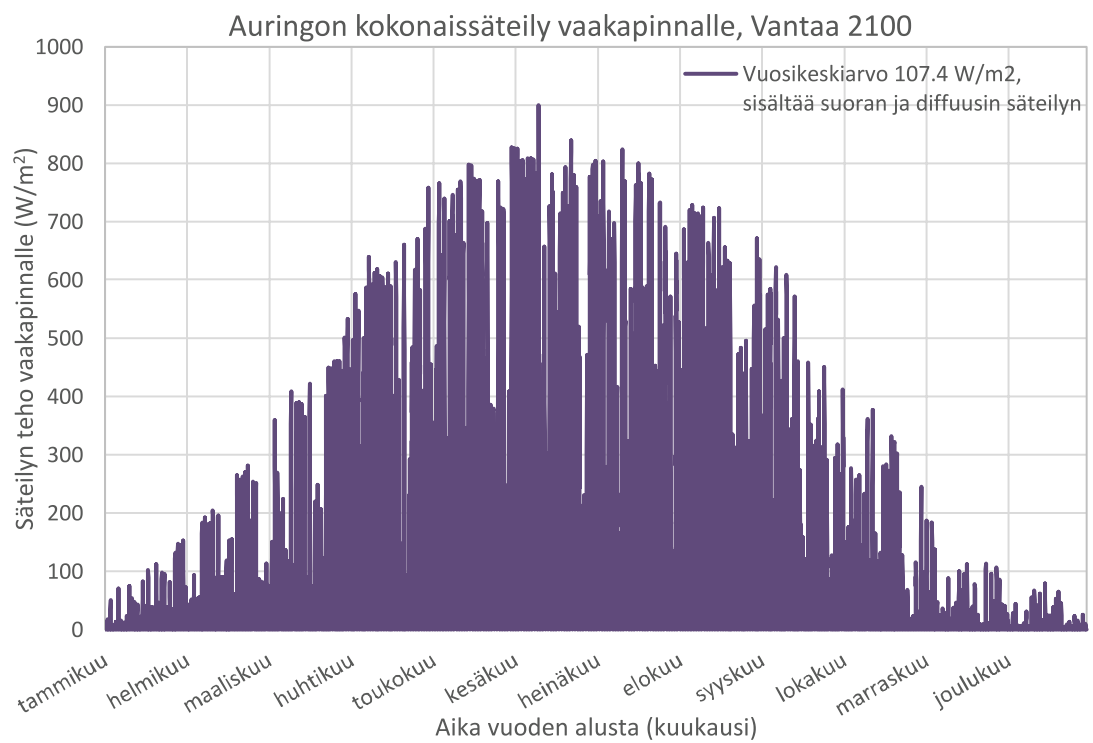
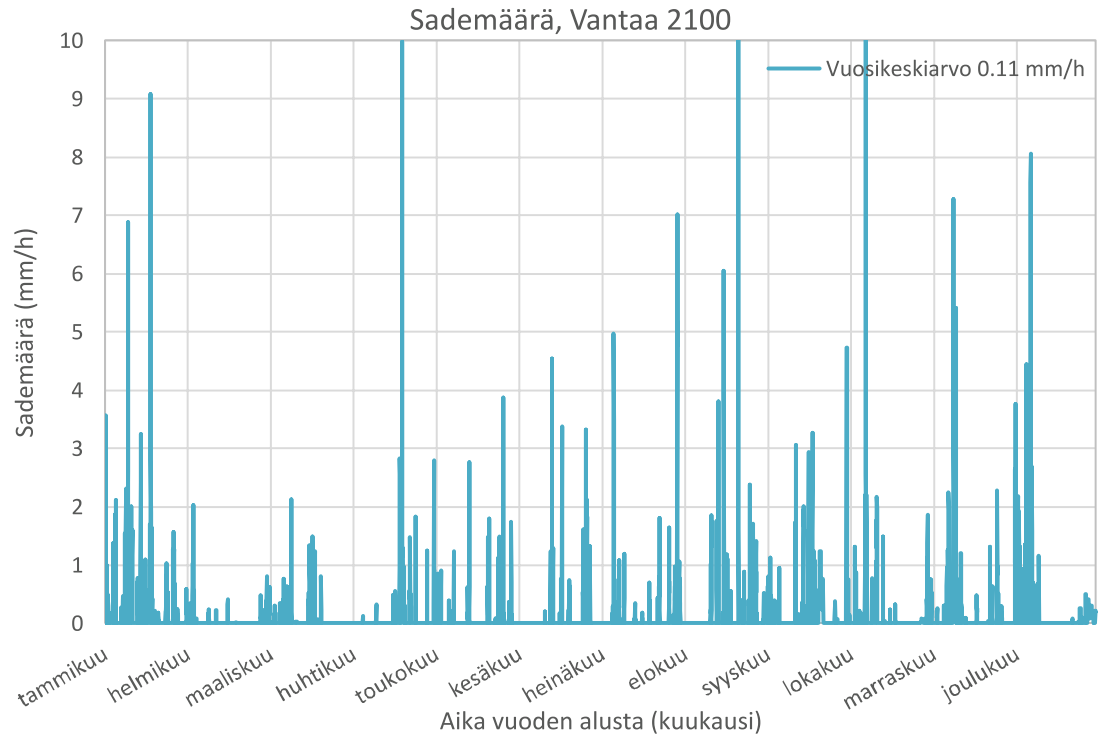




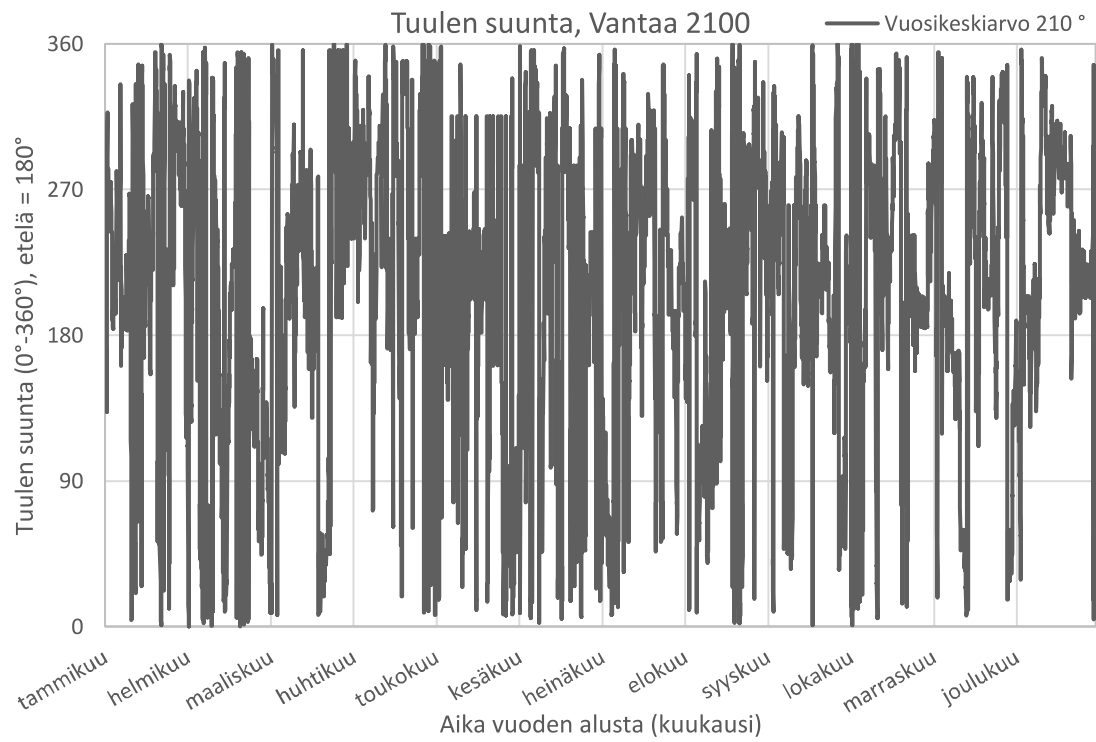
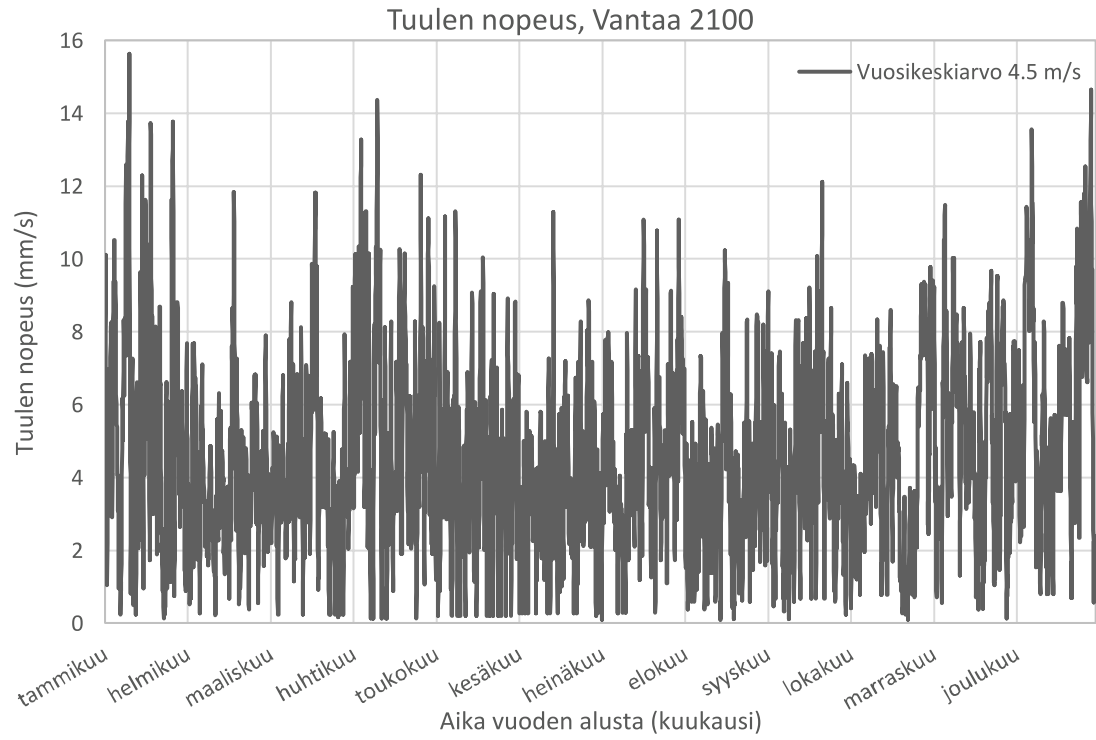


## Vantaa 2100









## LIITE 2: PARAMETRIT JA MATERIAALIOMINAISUUDET

**Taulukko L1.** Pintojen ominaisuudet, sisäilman lämpötila

	Arvo	Kerroin
Ulkopinnan pintavastus	0,04 m <sup>2</sup> ·K/W	R <sub>se</sub>
Sisäpinnan pintavastus	0,13 m <sup>2</sup> ·K/W	R <sub>si</sub>
Ulkopinnan vesihöyrynvastus	60 s/m	Z <sub>se</sub>
Sisäpinnan vesihöyrynvastus	360 s/m	Z <sub>si</sub>
Sisäilman lämpötila	21 °C	T <sub>int</sub>

**Taulukko L2.** Tiiliverhouksen absorptiokertoimet ja emissiviteetit säteilylle.

Materiaali	$\alpha_s$ (-)	$\alpha_{lw}$ (-)	$\epsilon_{lw}$ (-)
Punainen poltettu reikätiili	0,75	0,93	0,93
Punainen poltettu täystiili	0,75	0,93	0,93
Keltainen poltettu reikätiili	0,55	0,93	0,93
Keltainen poltettu täystiili	0,55	0,93	0,93

**Taulukko L3.** Yleiset Materiaaliominaisuudet

Materiaali	Tiheys (kg/m <sup>3</sup> )	Huokoisuus (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Ominaislämpökapasiteetti (J/kg·K)	Lämmönjohtavuus (W/m·K)	Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin (-)
Poltettu täystiili	1900	0,24	850	0,60	10,0
Poltettu reikätiili	1430	0,30	900	0,45	12,0
Puu (mänty)	532	0,90	2700	0,12	84
Mineraalivilla (lasivilla)	22	0,98	850	0,035	1,2
Tuulensuojavilla	73	0,94	850	0,031	1,4
Ilmaväli	1,3	0,999	1000	0,13	0,56

**Taulukko L4. Tasapainokosteuskäyrät**

Poltettu täystiili	RH (%)	0	10	20	30	40	50	55	60	65
	w (kg/m <sup>3</sup> )	0	0,55	1,23	2,11	3,26	4,84	5,89	7,17	8,8
	RH (%)	70	75	80	85	90	91	92	93	94
	w (kg/m <sup>3</sup> )	10,9	13,8	18,0	24,5	36,2	43,9	49,0	55,2	63,1
	RH (%)	95	96	97	98	99	100			
	w (kg/m <sup>3</sup> )	63,1	73,3	87,1	106	137	190			
Poltettu reikätiili	RH (%)	0	11,3	22,8	32,8	43,2	57,6	75,2	84,3	90
	w (kg/m <sup>3</sup> )	0	1,37	1,60	1,99	3,91	5,91	10,3	15,9	18,6
	RH (%)	96	96,9	99	99,3	99,7	99,8	99,9	100	
	w (kg/m <sup>3</sup> )	26,4	33,3	75,3	103	143	172	209	262	
Puu (mänty)	RH (%)	0	33	55	65	75	80	83	86	93
	w (kg/m <sup>3</sup> )	0	32,2	45	62,6	80,1	97,5	108	126	169
	RH (%)	97	100							
	w (kg/m <sup>3</sup> )	185	870							
Mineraalivilla (lasivilla)	RH (%)	0	33	55	65	75	80	83	86	93
	w (kg/m <sup>3</sup> )	0	0,45	0,54	0,68	0,78	0,98	1,10	1,30	1,90
	RH (%)	97	100							
	w (kg/m <sup>3</sup> )	2,40	45,0							
Tuulen-suojavilla	RH (%)	0	33	55	65	75	80	83	86	93
	w (kg/m <sup>3</sup> )	0,51	0,58	0,60	0,62	0,91	1,10	1,60	2,90	3,30
	RH (%)	97	100							
	w (kg/m <sup>3</sup> )	3,30	4,10							
Ilmaväli	RH (%)	0	100							
	w (kg/m <sup>3</sup> )	0	0,017							

**Taulukko L5. Materiaalien lämmönjohtavuudet kosteuspitoisuuden funktiona**

Poltettu täystiili	w (kg/m <sup>3</sup> )	0	240				
	$\lambda$ (W/m·K)	0,60	1,74				
Poltettu reikätiili	w (kg/m <sup>3</sup> )	0	300				
	$\lambda$ (W/m·K)	0,45	1,21				
Puu (mänty)	w (kg/m <sup>3</sup> )	0	32	62	123	185	900
	$\lambda$ (W/m·K)	0,10	0,11	0,12	0,10	0,15	0,60

**Taulukko L6. Materiaalien lämmönjohtavuudet lämpötilan funktiona**

Mineraalivilla (lasivilla)	T (°C)	-20	80
	$\lambda$ (W/m·K)	0,029	0,049
Tuulensuojavilla	T (°C)	-20	80
	$\lambda$ (W/m·K)	0,025	0,045

**Taulukko L7. Materiaalien kosteusdiffusiviteetit**

Materiaali	w (kg/m <sup>3</sup> )	DWS / DWW (m <sup>2</sup> /s)
Poltettu täystiili	0	0
	10,0	1,50E-10
	190	1,70E-6
Poltettu reikätiili	0	0
	13	3,10E-9
	262	2,20E-6
Puu (mänty)	0	0
	62,6	1,32E-13
	870	8,03E-11

**Taulukko L8. Materiaalien ja sisäkuoren ilmanläpäisevydet**

Materiaali	Ilmanläpäisevyys	
Mineraalivilla	1,00E-4 (m <sup>3</sup> /m·s·Pa) (levyä vasten kohtisuora)	
	2,00E-4 (m <sup>3</sup> /m·s·Pa) (levyn suuntainen)	
Puu (mänty)	8,30E-13 (m <sup>3</sup> /m·s·Pa)	
Puhtaaksimuurattu sisäkuori	3,33E-5 (m <sup>3</sup> /m·s·Pa <sup>n</sup> )	n = 0,8
Rapattu sisäkuori	8,33E-6 (m <sup>3</sup> /m·s·Pa <sup>n</sup> )	n = 0,8