



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Teemu Jokela

KIPSILEVYTUULENSUOJALLISTEN PUURUNKOISTEN ULKO-
SEINIEN RAKENNUSFYSIKAALINEN TOIMINTA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Juha Vinha
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
24. syyskuuta 2018

TIIVISTELMÄ

TEEMU JOKELA: Kipsilevytuulensuojallisten puurunkoisten ulkoseinien rakennusfysikaalinen toiminta

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 113 sivua, 29 liitesivua

Joulukuu 2018

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: professori Juha Vinha

Avainsanat: puurunkoinen ulkoseinä, tuuletusvälin ilmanvaihtuvuus, ilmakehän pitkäaaltoinen säteily, ilmavuoto, Suomalainen homemalli, kipsilevy

Muuttuneet energiatehokkuusvaatimukset ja ennustettu ilmastonmuutos vaikuttavat vaipparakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan. Aiemmissä tutkimuksissa on havaittu, että tuulensuojakerroksen lämmönvastuksella on suuri vaikutus ulkoseinärakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan.

Kipsilevy on laajalti käytetty tuulensuojalevy puurunkoisissa ulkoseinärakenteissa. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, kuinka tuulensuojakipsilevy pystyy suojaamaan siihen liittyviä rakennusmateriaaleja homehtumiselta. Lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan arviointi suoritettiin simulointitarkastelujen avulla Delphin 5.8.3 -ohjelmalla. Simulointitarkasteluja varten kirjallisuudesta selvitettiin nykyisin tiedossa olevat menetelmät ilmakehästä alaspäin suuntautuvan pitkäaaltoisen säteilyn ja tuuletusvälissä virtaavan ilman arvioimiseksi, joilla on vaikutusta ulkoseinärakenteen lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan.

Laskentatarkasteluissa käytettiin Tampereen teknillisessä yliopistossa kehitettyä rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmää, jossa rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa tarkastellaan laskennallisesti mitoittavissa ulko- ja sisäilman olosuhteissa. Tarkastelukriteerinä homeen kasvua ei sallittu rakenteissa valituissa tarkastelupisteissä, jolloin Suomalaisen homemallin homeindeksin maksimiarvon (M_{max}) tuli olla alle homeen kasvun alkamisen raja-arvon yksi.

Tutkimuksessa tarkasteltiin käyttötilanteessa ideaalisia rakenteita, joissa ei ollut ilmavuotoja rakenteeseen, sekä rakenteita, joissa oli ilmavuotoja. Ilmavuototarkasteluissa rakenteeseen mallinnettiin raot, joista vuotoilmavirta siirtyi rakenteeseen paine-erojen aiheuttaman konvektion vaikutuksesta. Käyttötilanteen tarkasteluiden lisäksi rakenteiden kuivumista tarkasteltiin erilaisilla alkukosteusmäärillä.

Ilmastonmuutoksen aiheuttamien olosuhteiden muutokset heikensivät kipsilevytuulensuojallisen puurungon ulkoseinärakenteen lämpö- ja kosteusteknistä toimivuutta. Tällaisen rakenteen toimivuutta voidaan parantaa merkittävästi tuulensuojakipsilevykerroksen ulkopuolisella lisälämmöneristeellä sekä vähentämällä kipsilevyn homehtumisherkyyttä.

Suuren vesihöyrynvastuksen omaava höyrynsulku toimi vesihöyryä läpäisevämpää höyrynsulkukerrosta paremmin sekä mineraalivilla- että puukuitueristeisessä rakennetyypissä. Tulos koski sekä käyttötilanteen että kuivumisen tarkasteluja ilman ilmavuotojen

vaikutusta. Ilmavuodot aiheuttivat rakenteisiin haitallisissa määrin kosteuden kulkeutumista. Jo pienillä ilmavuotomäärillä rakenteen ulko-osissa homeindeksien maksimiarvot nousivat lähelle Suomalaisen homemallin asteikon ylärajaa.

Tiiliverhotut rakenteet toimivat puuverhottuja rakenteita selvästi huonommin tiiliverhouksen läpi siirtyvän suuren kosteuskuorman vaikutuksesta. Jo nykyilmastossa tiiliverhotuissa rakenteissa olosuhteet olivat homeen kasvulle mahdolliset.

ABSTRACT

TEEMU JOKELA: Hygrothermal Performance of Timber-Framed External Walls with Gypsum Board Sheathing

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 113 pages, 29 Appendix pages

December 2018

Master's Degree Programme in Construction Technology

Major: Construction Engineering

Examiner: Professor Juha Vinha

Keywords: timber-framed external wall, ventilated cavity, atmospheric downward longwave radiation, air leakage, Finnish mould growth model, gypsum board

The new energy performance requirements and the predicted climate change affect the hygrothermal performance of the building envelope. Recent studies have revealed that the thermal resistance of sheathing can have a significant effect on the hygrothermal performance of timber-framed external walls.

Gypsum boards are widely used in timber-framed external walls. The main purpose of this thesis was to evaluate the impact that exterior gypsum board sheathing can have on the building physical performance of timber-framed external walls. The evaluations were made using numerical simulation program Delphin 5.8.3. A literature review was made to create hourly data sets on atmospheric downward longwave radiation and air velocities in ventilated cavities using existing semi-empirical relations. Both of them affect the hygrothermal performance of the building envelope.

The hygrothermal evaluations were made using the moisture analysis method developed in Tampere University of Technology. The analysis method's aim is to allow building physical designer to design moisture safe building envelope structures. Mould growth was not acceptable in the selected monitoring points inside the structure ($M_{\max} < 1,0$ according to the Finnish mould growth model). The studied wall assemblies were studied both without and with air leakages. The air leakages had their entry points in the vapour barrier near the stud. Hygrothermal calculations were also made for the wall assemblies with increased initial moisture content.

The predicted climate change lead to an increased risk for mould growth in timber-framed external walls with gypsum board sheathing. The hygrothermal performance can be improved significantly by adding a thermal insulation on sheathing's external side and improving the mould growth resistance of gypsum board.

Internal vapour barriers with relatively high diffusion resistance performed better than more permeable vapour barriers with both mineral wool and cellulose insulation. Relatively very small air leakages increased excessive moisture load in the structures causing mould growth. The mould growth was also very sensitive to the increased air leakages.

Walls with brick veneer cladding are exposed to higher moisture load compared to walls with timber cladding as a consequence of moisture ingress from the masonry to the in-

ner part of the wall. Consequently, risk for mould growth was significant even in the current climatological test year for building physics in Finland.

ALKUSANAT

Haluan kiittää Tampereen teknillisen yliopiston tukisäätiötä lahjoituksesta, jonka avulla tämä diplomityö tehtiin. Kiitos myös Max Tollanderille työn aiheesta sekä osallistumisesta diplomityötä käsitteleviin palavereihin.

Kiitos Anssi Laukkariselle työn ohjaamisesta ja kommentoimisesta sekä työtä edistäneiden laskentaohjelmien tekemisestä. Kiitän myös Topi Moisiota avusta laskentatarkastelujen aloituksessa. Topi teki samaan aihepiiriin kuuluvaa diplomityötä ja häneltä sain myös omaan työhöni lähtötietoja käytettäväksi.

Kiitos Juha Vinhalle tämän työn tarjoamisesta, ohjauksesta ja tarkastamisesta. Rakenusfysiikan laskentatarkastelut ovat hyvin mielenkiintoisia, joten tätä työtä oli mielekäs tehdä.

Kiitos kaikille, jotka ovat olleet edistämässä tätä työtä tai työpaikan ilmapiiriä. Kiitos myös kaikille muille, etenkin kotiväelle, jotka ovat kannustaneet minua tämän projektin aikana.

Tampereella, 3.12.2018

Teemu Jokela

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	1
1.1	Tutkimuksen tausta.....	1
1.2	Tutkimuksen sisältö ja tavoitteet	1
1.3	Tutkimusmenetelmät.....	2
1.4	Tutkimuksen rajaukset	2
2	LÄMMÖN, KOSTEUDEN JA ILMAN SIIRTYMINEN	3
2.1	Lämmön siirtyminen.....	4
2.1.1	Johtuminen.....	4
2.1.2	Lämmön konvektio	6
2.1.3	Säteily.....	8
2.2	Kosteuden siirtyminen	11
2.2.1	Diffuusio	11
2.2.2	Kapillaarinen siirtyminen	13
2.2.3	Kosteuden konvektio.....	15
2.2.4	Kosteus huokoisessa materiaalissa.....	16
2.3	Ilman siirtyminen.....	17
3	RAKENTEIDEN KOSTEUSTEKNISEN TOIMINNAN ANALYSOINTIMENETELMÄ	18
3.1	Rakenteiden kosteusteknisen toiminnan arviointi	18
3.2	Tarkasteluperiaatteet	18
3.3	Home rakenteissa ja Suomalainen homemalli.....	20
3.4	Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuus	23
3.4.1	Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuuden määrittäminen.....	23
3.4.2	Ilmanvaihtuvuus puuverhouksen takana	28
3.4.3	Ilmanvaihtuvuus tiiliverhouksen takana.....	34
3.5	Ilmakehän pitkäaaltoinen säteily	39
3.5.1	Yleistä ilmakehän pitkäaaltoisesta säteilystä.....	39
3.5.2	Ilmakehästä alaspäin suuntautuvan pitkäaaltoisen säteilyn määrittäminen 41	
3.5.3	Pilvisyyden vaikutus	42
3.5.4	Ilmakehästä alaspäin suuntautuvan pitkäaaltoisen säteilyn määrä	45
3.6	Ilmavuototapausten tulosten esittäminen	46
4	PUURUNKOISTEN ULKOSEINÄRAKENTEIDEN KOSTEUSTEKNINEN TOIMINTA, TARKASTELTAVAT RAKENNETYYPIT JA LASKENTAMALLIT	48
4.1	Kosteus seinärakenteessa	48
4.2	Rakennekerrosten vaikutus seinärakenteen lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan.....	48
4.3	Tarkasteltavat rakennetyypit	51
4.4	Laskentamalli	54

5	TULOKSET	57
5.1	Puuverhotut rakennetyypit	57
5.1.1	Rakennetyypin U-arvo	57
5.1.2	Ulkoverhouslaudan paksuus ja sävy	63
5.1.3	Tuuletusväli ja ilmanvaihtuvuus	65
5.1.4	Ilmakehästä tuleva pitkäaaltoinen säteily.....	70
5.1.5	Höyrynsulkukerrokset	71
5.1.6	Tuulensuojakipsilevyn ulkopuolinen lisäeristys.....	73
5.1.7	Ilmavuodot.....	74
5.1.8	Kuivuminen	82
5.2	Tiiliverhotut rakennetyypit.....	93
6	JOHTOPÄÄTÖKSET	101
6.1	Laskentamenetelmien kehittäminen	101
6.2	Puuverhotut rakennetyypit	102
6.3	Tiiliverhotut rakennetyypit.....	104
7	YHTEENVETO	106
	LÄHTEET	108

LIITE 1: ULKOILMAN OLOSUHTEET

LIITE 2: KÄYTETYT MATERIAALIOMINAISUUDET

LIITE 3: TUULETUSVÄLIN LÄMPÖTILA

LIITE 4: TARKASTELLUT RAKENNETYYPIT

MERKINNÄT

Latinalaiset kirjaimet:

<i>a</i>	terminen diffusiviteetti	m^2/s
<i>c</i>	ominaislämpökapasiteetti	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
<i>c</i>	valonnopeus	m/s
<i>c</i>	pilvisyysskerroin	-
<i>d</i>	paksuus	m
<i>d_h</i>	hydraulinen läpimitta	m
<i>g</i>	putoamiskiihtyvyys	$9,81 \text{ m}/\text{s}^2$
<i>g</i>	kosteusvirran tiheys	$\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$
<i>h</i>	lämmönsiirtokerroin	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
<i>h</i>	korkeus	m
<i>h</i>	Planckin vakio	$6,626\cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$
<i>k</i>	permeabiliteetti	m^2
<i>k</i>	Boltzmannin vakio	$1,381\cdot 10^{-29} \text{ J}/\text{K}$
<i>k_a</i>	ilmanläpäisevyys	$\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$
<i>k_w</i>	kosteudenjohtavuus	$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$
<i>n</i>	päivän järjestysnumero	-
<i>n</i>	virtauksesta johtuva eksponentti	-
<i>p</i>	paine	Pa
<i>p_v</i>	vesihöyryn osapaine ilmassa	Pa, hPa
<i>q</i>	lämpövirran tiheys	W/m^2
<i>q</i>	ilmanvuotoluku	$\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$
<i>r</i>	säde	m
<i>r</i>	eksentrisyyden huomioon ottava kerroin	-
<i>r_a</i>	ilmavirran tiheys	$\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{s})$
<i>s</i>	huokosalipaine	Pa
<i>s_d</i>	suhteellinen diffuusiovastus	m
<i>t</i>	aika	s, h
<i>u</i>	kosteuspitoisuus	kg/kg
<i>u_m</i>	ilmavirran nopeus	m/s
<i>w</i>	leveys	m
<i>w</i>	kosteuspitoisuus	kg/m^3
<i>A</i>	pinta-ala	m^2
<i>C_L</i>	ilmanvuotokerroin	$\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{Pa}^n)$
<i>C_p</i>	tuulenpainekerroin	-
<i>D_w</i>	kosteusdiffusiviteetti	m^2/s
<i>F</i>	pintojen välinen näkyvyyskerroin	-
<i>I</i>	säteilyn intensiteetti	W/m^2
<i>I_{sc}</i>	aurinkovakio	$1367 \text{ W}/\text{m}^2$
<i>J</i>	pinnasta lähtevä kokonaissäteilyn tiheys	W/m^2
<i>K_c</i>	suppeumakerroin	-
<i>K_t</i>	selkeysindeksi (engl. clearness index)	-
<i>LW_↓</i>	pitkäaaltoisen säteilyn intensiteetti	W/m^2
<i>M</i>	homeindeksi	-
<i>M_{max}</i>	homeindeksin maksimiarvo	-
<i>M_w</i>	veden moolimassa	$18,02\cdot 10^{-3} \text{ kg}/\text{mol}$

R	yleinen kaasuvakio	8,31446 J/(mol·K)
R	tilavuusvirta	m ³ /s
Ra_m	muunnettu Rayleigh'n luku	-
Re	Reynoldsin luku	-
T	lämpötila	K, °C
U_m	tuulen nopeus	m/s
Z_v	vesihöyrynvastus	s/m

Kreikkalaiset kirjaimet:

α	säteilyn absorptiokerroin	-
β	ilman lämpölaajenemiskerroin	1/K
β_v	pinnan kosteudensiirtokerroin	m/s
δ	vesihöyrynläpäisevyys	m ² /s, kg/(m·s·Pa)
δ	dekliinaatiokulma	°
ε	emissiviteetti	-
ε	pinnan karheus	m
η_a	ilman dynaaminen viskositeetti	1,74·10 ⁻⁵ Pa·s
λ	lämmönjohtavuus	W/(m·K)
λ	kitkakerroin	-
μ	diffuusiovastuskerroin	-
ν	vesihöyrypitoisuus	kg/m ³
ν	ilman kinemaattinen viskositeetti	m ² /s
ξ	häviökerroin	-
ρ	tiheys	kg/m ³
ρ	säteilyn heijastuskerroin	-
σ	pintajännitys	N/m
σ	Stefan-Boltzmannin vakio	5,67·10 ⁻⁸ W/(m ² ·K ⁴)
τ	säteilyn läpäisykerroin	-
ϕ	kontaktikulma	-
φ	suhteellinen kosteus	-
ω	tuntikulma	°
Γ	päiväkulma	rad
Φ	lämpövirta	W

MÄÄRITELMÄT

Homehtumisherkyys	Suomalaisen homemallin mukainen materiaalin homehtumisominaisuus, joka kuvaa homeen kasvun liikkeellelähdon nopeutta ja homehtumisen maksimitasoa.
Homeindeksin maksimiarvo	Suomalaisen homemallin mukaan lasketun homeindeksin maksimiarvo, joka voi vaihdella välillä 0-6.
Höyrynsulku	Höyrynsulku on ainekerros, jonka pääasiallisena tehtävänä on estää vesihöyryn haitallinen diffuusio rakenteeseen tai rakenteessa.
Ilmakehän pitkäaaltoinen säteily	Ilmakehän molekyylien värähtelystä syntynyttä säteilyä.
Ilmansulku	Ilmansulku on ainekerros, jonka pääasiallisena tehtävänä on estää haitallinen ilmavirtaus rakenteen läpi.
Ilmanvaihtuvuus	Ilmanvaihtuvuudella tarkoitetaan, kuinka monta kertaa tarkasteltavan tilavuuden ilma vaihtuu kokonaan aikayksikössä.
Ilmanvuotoluku, q_{50} -luku	Ilmanvuotoluvulla q_{50} kuvataan rakennusvaipan keskimääräistä vuotoilmavirtaa tunnissa 50 Pa paine-erolla rakennusvaipan pinta-alaa kohden.
Lämmönläpäisykerroin	Lämmönläpäisykerroin (U) ilmoittaa lämpömäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pinta-alayksikön suuruisen rakennusosan, kun rakennusosan eri puolilla olevien tilojen lämpötilaero on yksikön suuruinen. Rakennusosan U-arvo on kokonaislämmönvastuksen käänteisarvo, jossa ovat mukana myös rakennusosan sisä- ja ulkopinnan pintavastukset.
Sisäinen konvektio	Konvektiovirtaus ilmaa läpäisevien materiaalien sisällä. Sisäinen konvektio on yleensä lämpötilaeroista johtuvaa luonnollista konvektiota, mutta se voi sisältää myös tuulen aiheuttamaa pakotettua konvektiota.
Suomalainen homemalli (engl. Finnish mould growth model)	Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n ja Tampereen teknillisen yliopiston yhdessä kehittämä laskentamalli, jolla voidaan arvioida homeen kasvua eri rakennusmateriaalien pinnoilla muuttuvissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa ajan funktiona.

1 JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Rakennusten muuttuneet energiatehokkuusvaatimukset ja ennustettu ilmastonmuutos vaikuttavat vaipparakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan. Jotta rakentamisessa käytettävät ratkaisut olisivat turvallisia ja kustannustehokkaita energiatehokkuusvaatimusten mukaisilla rakenteilla myös tulevaisuuden ilmastossa, on tarpeellista selvittää niiden toimivuutta uusissa tilanteissa.

Erilaisia kipsilevyjä käytetään laajalti rakentamisessa ja yksi yleinen käyttökohde niille on puurunkoisten ulkoseinien tuulensuojalevynä ja jäykisteenä. Tuulensuojalevy suojaa puurunkoisissa ulkoseinärakenteissa sisempiä rakennekerroksia rakennusfysikaalisilta rasituksilta, joten sillä on vaikutusta koko rakennetyypin lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan.

Aiemmin FRAME-tutkimusprojektin yhteydessä on tutkittu ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutusta vaipparakenteiden kosteustekniseen toimintaan. Tutkimuksen tulosten mukaan tuulensuojakerroksen lämmönvastusta lisäämällä voidaan parantaa merkittävästi rakenteen kosteusteknistä toimivuutta. (Vinha et al. 2013)

1.2 Tutkimuksen sisältö ja tavoitteet

Useat kosteuteen liittyvät vaurioitumismekanismit ovat kytköksissä suuriin suhteellisen kosteuden arvoihin. Suhteellisen kosteuden nousu haitalliselle tasolle voi johtua alhaisista lämpötiloista tai liiallisista kosteuskuormista. Kosteuskuormia voidaan pienentää vähentämällä vesihöyryn diffuusiota, ilmavuoja sisäilmasta rakenteeseen ja sadeveden tunkeutumista rakenteeseen. Lisäksi rakenteen riittävä tuulettuminen ja kuivumiskyky ovat tärkeitä liiallisen kosteuden poistamisessa.

Tuuletusvälissä olevan ilmavirtauksen voimistuminen muuttaa tuulensuojalevyn ulkopinnan olosuhteita lähemmäs ulkoilman olosuhteita, jolloin lautaverhouksen lämmönvastuksen ja auringonsäteilyn lämmittävä vaikutus pienenee. Tuuletus auttaa kuitenkin rakenteesta poistuvan kosteuden siirtämisessä ulkoilmaan. Lisäksi ilmakehän ja vaipparakenteen ulkopinnan välisen pitkäaaltoisen nettosäteilyn huomioon ottaminen viilentää varsinkin kirkkaana yönä rakenteen ulkopinnan lämpötiloja.

Tutkimuksen päätavoitteena oli tuottaa tietoa tuulensuojakipsilevyllä toteutettujen puurunkoisten ulkoseinärakenteiden rakennusfysikaalisesta toimivuudesta sekä tuulensuo-

jakipsilevyn kyvystä suojata kantavia rakenteita ja niihin liittyviä rakennusmateriaaleja homehtumiselta. Tutkimuksessa tarkasteltiin erityisesti ulkoseinien rakenteellisten ratkaisujen, pitkäaaltoisen säteilyn ja vuotoilman mukana rakenteeseen siirtyvän vesihöyryn vaikutuksia. Ulkoseinän rakenteellisista ratkaisuista tutkittiin ulkoverhouslaudan paksuutta ja sävyä, tuuletusvälin paksuutta ja tuuletusvälissä olevan koolauspuun leveyttä sekä tuulensuojakipsilevyn lämmönvastuksen riittävyttä sisäpuolisten rakenteiden suojana.

1.3 Tutkimusmenetelmät

Rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan arviointi suoritettiin simulointitarkastelujen avulla Delphin 5.8.3 -ohjelmalla 2D-laskentana. Laskentatarkasteluissa käytettiin Tampereen teknillisessä yliopistossa kehitettyä rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmää. Rakenteiden toiminnan indikaattorina käytettiin valituissa tarkastelupisteissä Suomalaisen homemallin avulla laskettuja homeindeksien arvoja.

Laskentatarkasteluja varten selvitettiin tieteelliseen kirjallisuuteen perustuen, parhaiten tutkimukseen soveltuvat, laskentamallit tuuletusvälin ilmavirtauksista sekä ilmakehästä alaspäin suuntautuvasta pitkäaaltoisesta säteilystä. Lisäksi kirjallisuudesta selvitettiin aiempien tutkimusten tuloksia puurunkoisten ulkoseinärakenteiden kosteusteknisestä toiminnasta.

1.4 Tutkimuksen rajaukset

Tutkimuksen tulokset eivät sovellu rakenteille, joita rasittavat tässä tutkimuksessa käytettyjä referenssivuosia kriittisemmät ilmasto-olosuhteet. Rakennekerrosten oletettiin liittyvän ideaalitiivistä toisiin rakenneosiin, jolloin esimerkiksi lämmöneristekerroksen ja runkotolpan välinen kontakti mallinnettiin ideaalitiivistä sekä ilmavuodottomissa että ilmavuodollisissa laskentatarkasteluissa. Ilmavuototarkasteluissa ei otettu huomioon lämmöneristekerroksen sisäisen konvektion vaikutusta.

Höyrynsulkukerroksen sisäpuolisia rakenteita ei tarkastelu. Esimerkiksi sisäpuolisen vaakakoolauksen ja lämmöneristekerroksen vaikutusta höyrynsulkukerroksen sisäpuolisten rakenteiden toimintaan ei huomioitu, sillä 3D-laskentaohjelma olisi tähän tarkoitukseen soveltuvampi. Tutkimuksen tulokset koskevat ainoastaan lämmitettyjen rakennusten rakennetyyppien toimivuutta.

2 LÄMMÖN, KOSTEUDEN JA ILMAN SIIRTYMINEN

Termodynamiikassa lämpö määritellään energian siirtymisenä lämpötilaeron tai -gradientin seurauksena. (Mills 1999) Lämmön siirtymisen muotoja on kolme: johtuminen, säteily ja konvektio. Skalaarikentän gradientti, ∇f , määritellään karteesisessä koordinaatistossa kaavan 2.1 mukaisesti.

$$\nabla f = \frac{\partial f}{\partial x} \mathbf{e}_x + \frac{\partial f}{\partial y} \mathbf{e}_y + \frac{\partial f}{\partial z} \mathbf{e}_z \quad (2.1)$$

missä

f on mikä tahansa tarkasteltava skalaarikenttä
 ∇ on del-operaattori, jota kuvaa nabla-symboli
 \mathbf{e}_x , \mathbf{e}_y ja \mathbf{e}_z ovat karteesisen koordinaatiston yksikkökantavektoreita akseleiden x, y ja z suuntaan.

Skalaarikentän gradientti on vektorikenttä, jonka jokainen piste kuvaa vastaavan skalaarikentän pisteen suurimman kasvun suuruutta ja suuntaa.

Rakennusfysikaalisissa sovellutuksissa ilman ja kosteuden siirtyminen on aineen siirtymistä. Lämmön ja aineen siirtyminen ovat kytköksissä toisiinsa, koska esimerkiksi liikkuva ilma tai vesi siirtää sekä lämpöä että kosteutta. Ilmavirtauksia aiheuttavat muun muassa lämpötilaerosta johtuva noste sekä paine-erot tuulesta ja ilmanvaihtolaitteistosta. Kosteus voi liikkua sekä vesihöyrynä että nesteinä. Kosteuden siirtymistä aiheuttavat diffuusio, konvektio, kapillaarinen imu ja painovoima. (Hagentoft 2001)

Fysikaalisia olosuhteita rakenteissa määrittelee kaksi fysiikan lakia: energian ja aineen säilymislait. Näiden lakien mukaan energiaa tai ainetta ei häviä. Yhdessä näiden lakien ja lämmön ja aineen virtausten lausekkeiden kanssa voidaan laatia lämpötilan, kosteuden ja ilmanpaineen yhtälöt, joiden avulla haetaan ratkaisua rakennusfysikaalisiin ongelmiin. (Hagentoft 2001)

2.1 Lämmön siirtyminen

2.1.1 Johtuminen

Mikroskooppisella tasolla johtumisen mekanismi on monimutkainen prosessi, joka käsittää ilmiöitä kuten molekyylien törmäilyn kaasussa, hilavärähtelyn kiderakenteessa ja vapaiden elektronien liikkeen metalleissa. Makroskooppisella tasolla fenomenologisen lain on esittänyt J. B. Fourier vuonna 1822 (kaava 2.2). (Mills 1999)

$$\mathbf{q} = -\lambda \nabla T \quad (2.2)$$

missä

$$\begin{aligned} \mathbf{q} & \text{ on lämpövirran tiheys [W/m}^2\text{]} \\ \lambda & \text{ on lämmönjohtavuus [W/(m}\cdot\text{K)]} \\ T & \text{ on lämpötila [K].} \end{aligned}$$

Kaava 2.2 osoittaa lämpövirran tiheysvektorin suunnaksi vastakkaisen suunnan lämpötilagradienttiin nähden eli suurimman lämpötilan alenemisen suuntaan.

Yksidimensioisessa tapauksessa tarkastellaan vain yhtä suuntaa, jolloin lämpövirran tiheys on kaavan 2.3 mukainen.

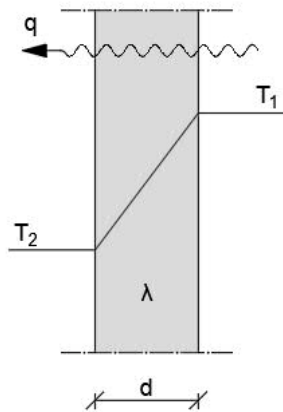
$$q_x = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (2.3)$$

Stationääritilan olosuhteissa, kuten kuvassa 2.1, missä lämpötilajakauma materiaalissa on lineaarinen, lämpövirran tiheys voidaan kirjoittaa kaavan 2.4 mukaisesti.

$$q = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{a} = \lambda \frac{T_1 - T_2}{a} \quad (2.4)$$

missä

$$\begin{aligned} d & \text{ on materiaalikerroksen paksuus [m]} \\ T_1 \text{ ja } T_2 & \text{ ovat lämpötilat materiaalin pinnoilla [K].} \end{aligned}$$



Kuva 2.1. Yksidimensioinen tapaus, jossa lämpö siirtyy johtumalla.

Lämpövirta materiaalin läpi voidaan laskea kaavalla 2.5.

$$\Phi = \lambda A \frac{T_1 - T_2}{d} \quad (2.5)$$

missä

- Φ on materiaalin läpi siirtyvä lämpövirta [W]
- A on tarkasteltavan alueen pinta-ala [m^2].

Energian säilymislaista seuraa, että lämmön nettosisäänvirtaus tarkasteltavaan pisteeseen määrittelee materiaaliin varastoituneen lämmön. Tämä voidaan esittää lämpövirran tiheyden divergenssinä negatiivisella etumerkillä. (Hagentoft 2001) Lämpövirran tiheyden vektorikentän negatiivinen divergenssi määritellään kaavan 2.6 mukaisesti.

$$-\text{div}(\mathbf{q}) = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) \equiv -\nabla \cdot \mathbf{q} \quad (2.6)$$

missä

- q_x, q_y ja q_z ovat vektorikentän x-, y- ja z-suuntaiset komponentit
- $-\nabla \cdot \mathbf{q}$ on del-operaattorin ja vektorikentän välinen skalaaritulo.

Vektorikentän divergenssi on skalaarikenttä, joka kuvaa vektorikentän lähteisyyttä. Positiivinen divergenssi kuvaa pisteen olevan vektorikentän lähde ja vastaavasti negatiivinen divergenssi kuvaa pisteen olevan vektorikentän nielu.

Jotta epästationäärisen tilan lämpötilajakauma ja lämpövirta rakenteessa voidaan määrittää, täytyy energian tasapainoyhtälössä ottaa huomioon energian säilymislaki. Tästä saadaan kaavan 2.7 mukainen yhtälö, joka kuvaa yksiuolotteista tilannetta lämmön johtumiselle ja varastoitumiselle.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (2.7)$$

missä

- ρ on materiaan tiheys [kg/m³]
 c on materiaalin ominaislämpökapasiteetti [J/(kg·K)]
 t on aika [s].

Kun materiaalin lämmönjohtavuus jaetaan termillä ρc , saadaan materiaalin terminen diffusiviteetti, a [m²/s], kaavan 2.8 mukaisesti.

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (2.8)$$

Terminen diffusiviteetti kertoo, kuinka nopeasti materiaalin lämpötila muuttuu. Mitä suurempi arvo, sitä nopeammin materiaalikerros saavuttaa stationääritilan ympäristön lämpötilan muuttuessa.

Materiaalin lämmönjohtavuuden arvo sisältää kaikki lämmönsiirtymisen muodot, koska lämpö siirtyy materiaalissa ja sen huokosissa johtumalla, säteilemällä ja konvektiolla. Lämmönjohtavuus riippuu materiaalin lämpötilasta ja kosteuspitoisuudesta, sillä esimerkiksi vedellä täyttyneissä huokosissa lämmön siirtyminen lisääntyy.

2.1.2 Lämmön konvektio

Lämmön konvektiolla tarkoitetaan lämmön siirtymistä väliaineen mukana. Tämän mahdollistaa väliaineen lämpökapasiteetti. Rakennusfysiikan tarkasteluissa ilma ja vesi toimivat tavallisesti lämpöä kuljettavina väliaineina. Kun lämpö kuljettuu ilman välityksellä, konvektion muotoja ovat luonnollinen konvektio ja pakotettu konvektio. Luonnollinen konvektio tapahtuu nosteen vaikutuksesta, joka johtuu lämpötilaerojen aiheuttamista ilman tiheyseroista. Pakotetussa konvektiossa ilman liike johtuu ulkoisista tekijöistä, kuten tuulesta tai ilmanvaihdosta. Veden mukana lämpöä kuljettuu muun muassa kapillaarisen kosteusvirran mukana.

Konvektiota tapahtuu muun muassa ilmaa vasten olevien rakenteiden pinnoilla ja tuuletusväleissä. Sekä luonnollinen että pakotettu konvektio voivat olla laminaarista tai turbulenttia. Laminaarinen virtaus tarkoittaa virtausta, jossa ilma virtaa yhdensuuntaisina kerroksina. Laminaarinen virtaus on vallitsevaa olosuhteissa, joissa virtausnopeus ja -kanava ovat pieniä sekä virtaava aine on suhteellisen viskoosista. Turbulenttinen virtaus on vastakohtaisesti laminaariseen virtaukseen verrattuna pyörteistä, jossa virtauksen nopeus ja suunta vaihtelevat voimakkaasti.

Konvektiivisen lämpövirran tiheys pinnan ja ympäröivän ilman välillä saadaan Newtonin lain avulla kaavalla 2.9.

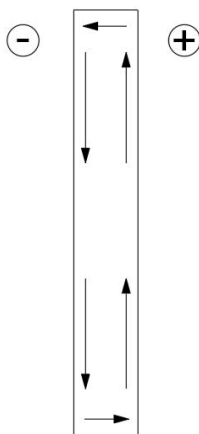
$$q_c = h_c \Delta T \quad (2.9)$$

missä

- q_c on konvektiivisen lämpövirran tiheys pinnan ja ympäröivän ilman välillä [W/m²]
 h_c on pinnan konvektiivinen lämmönsiirtokerroin [W/(m²·K)]
 ΔT on lämpötilaero pinnan ja ympäröivän ilman välillä [K].

Konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen arvo riippuu muun muassa pinnan geometriasta, virtaavan väliaineen nopeudesta ja termodynaamisista ominaisuuksista. Sen määrittelymiseksi on neljä yleistä menetelmää: dimensioanalyysi, tarkka matemaattinen ratkaisu rajakerrosteorian differentiaaliyhtälöistä, likimääräinen ratkaisu rajakerrosteorian integraaliyhtälöistä ja analogia lämmön-, aineen- ja liikemäärän siirtymisen välillä. Jokaisella menetelmällä on omat soveltuvuutensa ja rajoituksensa. (Iivonen & Viljanen 1984) Empiirisiä kaavoja konvektiiviselle lämmönsiirtokertoimelle on esitetty muun muassa lähteissä Defraeye et al. (2011) ja Mirsadeghi et al. (2013).

Huokoisissa, hyvin ilmaa läpäisevissä eristemateriaaleissa, joiden yli vaikuttaa lämpötilaero, voi esiintyä materiaalikerroksen sisäisiä ilmavirtauksia paine-erojen seurauksena. Tätä kutsutaan sisäiseksi konvektioksi. Tällä on eristemateriaalin lämmönvastusta heikentävä vaikutus. (Hagentoft 2001) Sisäisen konvektion suuruuteen vaikuttavat oleellisesti materiaalin ilmanläpäisevyys, materiaalikerroksen paksuus, lämpötilaero rakenteen yli sekä rakenteen geometria. (Vinha et al. 2013) Suljetun tilan lämmitetyllä puolella ilma on kevyempää, jolloin se liikkuu nosteen vaikutuksesta ylöspäin. Jäähtyessään yläosassa, se painuu takaisin alas, jolloin syntyy kuvan 2.2 mukainen ilman virtauksen kiertokulku.



Kuva 2.2. Sisäisen konvektion aiheuttama ilman virtaus pystyrakenteessa.

Sisäisen konvektion arviointiin lämmöneristekerroksessa käytetään kahta dimensiota lukua, muunnettua Rayleigh'n lukua (Ra_m) ja Nusseltin lukua (Nu). Standardin SFS-

EN ISO 10456 (2008) mukainen kaava muunnetulle Rayleigh'n luvulle on kaavan 2.10 mukainen.

$$Ra_m = \frac{g\beta\rho_a c_{pa} d k \Delta T}{\nu_a \lambda} \quad (2.10)$$

missä

- g on putoamiskiihtyvyys [m/s^2]
- β on ilman lämpölaajenemiskerroin [$1/K$]
- ρ_a on ilman tiheys [kg/m^3]
- c_{pa} on ilman ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa [$J/(kg \cdot K)$]
- d on lämmöneristeen paksuus [m]
- k on eristemateriaalin permeabiliteetti [m^2]
- ΔT on lämmöneristeen pintojen välinen lämpötilaero [K]
- ν_a on ilman kinemaattinen viskositeetti [m^2/s]
- λ on lämmöneristeen lämmönjohtavuus ilman konvektiota [$W/(m \cdot K)$].

Muunnettu Rayleigh'n luku kuvaa potentiaalia sisäisen konvektion muodostumiselle. Nusseltin luku puolestaan kuvaa konvektiivisen lämmönsiirron määrää tilanteeseen nähden, jossa lämpö siirtyy ainoastaan johtamalla. Nusseltin luku lasketaan kaavalla 2.11.

$$Nu = \frac{q_{cd} + q_{conv}}{q_{cd}} \quad (2.11)$$

missä

- q_{cd} on johtamalla siirtyvä lämpö rakenteen läpi [W/m^2]
- q_{conv} on konvektiolla siirtyvä lämpö rakenteen läpi [W/m^2].

Nusseltin lukua voidaan arvioida muunnetun Rayleigh'n luvun avulla, kun sisäinen konvektio tapahtuu ainoastaan lämpötilaerojen vaikutuksesta. Tähän on olemassa empiirisiä kaavoja kuten lähteissä Hagentoft (2001) ja Mills (1999) on esitetty.

2.1.3 Säteily

Lämmön siirtymisen muodoista säteily eroaa muista siirtymisen muodoista siten, että lämmön siirtymiseen ei tarvita väliainetta. Säteily voidaan jakaa ionisoivaan tai ionisoimattomaan säteilyyn mutta myös sähkömagneettiseen tai hiukkassäteilyyn. Ionisoiva säteily voi olla joko sähkömagneettista tai hiukkassäteilyä, jolla on riittävästi energiaa ionisoimaan atomeja. Muun muassa radioaktiiviset aineet säteilevät ionisoivasti. Ionisoimaton säteily on sähkömagneettista aaltoliikettä, jota auringonsäteilykin on.

Sähkömagneettinen säteily syntyy, kun sähkökenttä kiihdyttää atomin partikkelia, kuten elektronia. Liike synnyttää värähtelevät sähkö- ja magneettikentät, jotka etenevät kohtisuorassa toisiaan vasten. Sähkömagneettinen säteily etenee tyhjiössä valon nopeudella (299 792 458 m/s). Nopeus on väliaineessa, kuten ilmassa, pienempi, mutta rakennusfyysiikan kannalta ero on merkityksettömän pieni. Yhteen pisteeseen tuleva säteily on usein summa useista suunnista tulevista eri aallonpituuksista. Esimerkiksi rakennuksen seinään voi tulla suoraa säteilyä auringosta sekä samalla heijastuneena maan pinnasta. Sähkömagneettisilla aalloilla on ominaisuuksina aallonpituus, taajuus ja energia. Sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus vaihtelee äärimmäisen lyhyestä mielivaltaisen pitkään. Lämpösäteily käsittää spektrin aallonpituusalueen 0,1-100 μm (Hagentoft 2001).

Kiinteät aineet ja nesteet säteilevät kaikilla aallonpituuksilla, joten niiden lähettämä säteilyn spektri on jatkuva. Jatkuva spektri syntyy, kun aineen rakenneosat värähtelevät lukuisilla eri vapausasteilla. Kaasut sen sijaan emittoivat säteilyä vain tietyillä aallonpituuksilla, jolloin emissiospektri on viivaspektri. Viivaspektrit syntyvät elektronin siirtyessä elektronikuorelta toiselle.

Kaikki pinnat, joiden lämpötila on absoluuttista nollapistettä korkeampi, emittoivat sähkömagneettista säteilyä. Mustaa kappaletta käytetään kuvaamaan tilannetta, jossa pinta absorboi kaiken siihen kohdistuvan säteilyn. Kun musta kappale on termodynaamisessa tasapainossa ympäristönsä kanssa, se emittoi kaiken siihen kohdistuvan säteilyn. Mustan kappaleen lähettämä spektrinen säteilyn intensiteetti aallonpituutta kohti voidaan laskea Planckin lain avulla kaavalla 2.12.

$$I_{b,\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k T_s}} - 1} \quad (2.12)$$

missä

$I_{b,\lambda}$ on mustan kappaleen lähettämä spektrinen säteilyn intensiteetti [W/(m²·m)]

h on Planckin vakio (6,626·10⁻³⁴ J·s)

c on valonnopeus tyhjiössä (299 792 458 m/s)

λ on säteilyn aallonpituus [m]

k on Boltzmannin vakio (1,381·10⁻²⁹ J/K)

T_s on kappaleen pintalämpötila [K].

Kokonaissäteilyteho voidaan johtaa Planckin laista integroimalla kaikkien aallonpituuksien yli. Tästä saadaan kaava 2.13.

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

missä

- I_b on mustan kappaleen lähettämä säteilyn intensiteetti [W/m^2]
 σ on Stefan-Boltzmannin vakio ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$).

Todelliset pinnat eivät emittoi yhtä paljon säteilyä kuin musta kappale. Todellisen pinnan ja mustan kappaleen emittoiman säteilyn suhdetta kuvaa pinnan emissiviteetti, ε . Emissiviteetti on dimensioton luku ja se saa arvoja välillä 0-1. Arvo riippuu materiaalin pinnan ominaisuuksista. Todellisen pinnan lähettämä säteilyn intensiteetti voidaan laskea kaavalla 2.14.

$$I = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2.14)$$

Todelliset kappaleet eivät myöskään absorboi kaikkea siihen kohdistuvaa säteilyä, vaan säteily voi absorboitua, heijastua tai läpäistä materiaalin. Näiden kolmen säteilyn mekanismin pinnalle tulevien suhteellisten osuuksien summa on yksi, joka voidaan esittää kaavana 2.15.

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.15)$$

missä

- α on pintaan absorboituneen säteilyn osuus [-]
 ρ on pinnasta heijastuneen säteilyn osuus [-]
 τ on materiaalin läpäisevä säteilyn osuus [-].

Tavallisissa rakennusfysiikan tarkasteluissa lasia ja läpinäkyvää muovia lukuun ottamatta materiaalin läpäisevää osuutta ei ole lainkaan, jolloin $\tau = 0$.

Pinnan emissiviteetti riippuu säteilyn aallonpituudesta ja säteilyn lähtökulmasta pintaan nähden. Koska emissiviteetti riippuu aallonpituudesta, riippuu se myös pinnan lämpötilasta. Kapealla lämpötila-alueella emissiviteetin arvoja voidaan pitää kuitenkin rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa vakiona. Lisäksi pintoja pidetään ns. harmaina pintoina, joiden oletetaan emittoivan diffuusioita säteilyä samalla intensiteetillä kaikkiin suuntiin.

Kun tarkastellaan harmaiden pintojen välistä säteilyä, voidaan pinnan absorptiokertoimen ja emissiviteetin välille käyttää Kirchoffin lakina tunnettua yhtälöä (kaava 2.16), jonka mukaan pinnan emissiviteetti on yhtä suuri kuin pinnan absorptiokerroin. Lyhytaaltoisen säteilyn pinnan absorptiokerroin voi taas erota merkittävästi pitkäaaltoisen säteilyn absorptiokertoimesta.

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

Kun pinnan absorptiokerrointa ja emissiviteettiä pidetään yhtä suurina, voidaan harmaiden pintojen väliselle nettolämpövirran tiheydelle muodostaa kaava 2.17, kun tarkasteltava pinta on kokonaan ympäröivien pintojen sisällä ja tarkasteltavan pinnan emissiviteetti on ε .

$$q_{rad} = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (2.17)$$

missä

q_{rad} on pinnan ja ympäristön välinen nettosäteilylämpövirran tiheys [W/m^2]
 T_{sur} on ympäröivien pintojen lämpötila [K].

Kun ympäröivien pintojen lämpötila laskee, nettosäteilylämpövirta tarkasteltavasta kappaleesta kasvaa. Jos tarkasteltavaan kappaleeseen ei kohdistu muita lämpövirtoja, kappaleen pintalämpötila laskee. Tällainen ilmiö voi tapahtua esimerkiksi rakennusten ulkopinnoilla.

Kun tarkastellaan kahden minkä tahansa pinnan välistä säteilylämmönsiirtoa, tarvitaan geometrista käsitettä, näkyvyyskerroin. Näkyvyyskerroin määritellään kaavan 2.18 mukaisesti.

$$F_{ij} = \frac{q_{i \rightarrow j}}{A_i J_i} \quad (2.18)$$

missä

F_{ij} on pintojen i ja j välinen näkyvyyskerroin [-]
 $q_{i \rightarrow j}$ on pinnasta i lähtevä säteilylämpövirta pintaan j [W]
 A_i on pinnan i pinta-ala [m^2]
 J_i on pinnasta i lähtevä kokonaissäteilyn tiheys [W/m^2].

Kun pieni pinta vastaanottaa kaiken paljon suuremman pinnan lähettämän säteilyn (vrt. vaakasuora rakennuksen katto ja taivas), on pintojen välisen näkyvyyskerroimen arvo yksi. Muille tilanteille kaavoja löytyy kirjallisuudesta, kuten lähteistä Incropera et al. (2006) ja Mills (1999).

Rakennusfysiikan kannalta olennaiset lämpösäteilyn tyypit ovat lyhytaaltainen auringon suora ja diffuusi säteily sekä pitkäaaltainen lämpösäteily. Auringon diffuusi säteily on ilmakehässä olevista hiukkasista ja molekyyleistä tasaisesti eri suuntiin heijastunutta säteilyä. Myös maanpinnasta ja rakennuksista heijastunut auringonsäteily on diffuusia säteilyä. Ilmakehän, maanpinnan ja muiden pintojen emittoima säteily on pitkäaaltoista lämpösäteilyä.

2.2 Kosteuden siirtyminen

2.2.1 Diffuusio

Diffuusio voidaan määritellä partikkelien satunnaisen liikkeen aiheuttamaksi tarkasteltavan potentiaalin tasaantumisprosessiksi väliaineessa. Diffuusion suunta määräytyy todennäköisyyden mukaan siten, että todennäköisimmin partikkeli siirtyy paikaltaan sel-

laiseen paikkaan, missä ei ole toista partikkelia. Tämä johtuu termodynamiikan toisesta pääsäännöstä, jonka mukaan spontaanin prosessin entropia kasvaa. Vesihöyryn diffuusiolla siirtyvä kosteusvirran tiheys homogeenisessä ainekerroksessa saadaan Fickin lain mukaan kaavalla 2.19.

$$\mathbf{g} = -\delta_v \nabla v \quad (2.19)$$

missä

- \mathbf{g} on diffuusiovirran tiheys [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]
- δ_v on väliaineen vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuseron avulla ilmaistuna [m^2/s]
- v on vesihöyrypitoisuus [kg/m^3].

Edellä oleva kaava voidaan esittää myös vesihöyryn osapaineen avulla kaavalla 2.20.

$$\mathbf{g} = -\delta_p \nabla p_v \quad (2.20)$$

missä

- δ_p on väliaineen vesihöyrynläpäisevyys vesihöyryn osapaine-eron avulla ilmaistuna [$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$]
- p_v on vesihöyryn osapaine [Pa].

Materiaalin diffuusiovastus voidaan kuvata diffuusiovastuskertoimen (kaava 2.21) tai suhteellisen diffuusiovastuksen (kaava 2.22) avulla.

$$\mu = \frac{\delta_{v,a}}{\delta_{v,mat}} \quad (2.21)$$

missä

- μ on materiaalin diffuusiovastuskerroin [-]
- $\delta_{v,a}$ on paikallaan olevan ilman vesihöyrynläpäisevyys [m^2/s]
- $\delta_{v,mat}$ on materiaalin vesihöyrynläpäisevyys [m^2/s].

Diffuusiovastuskerroin voidaan ilmoittaa myös vesihöyryn osapaine-erojen avulla ilmaistujen vesihöyrynläpäisevyyksien suhteella. Ilman vesihöyrynläpäisevyys riippuu lämpötilasta ja ilmanpaineesta.

Materiaalin suhteellinen diffuusiovastus kuvaa, kuinka paksulla paikallaan olevalla ilmakerroksella on vastaava diffuusiovastus kuin tarkasteltavalla materiaalikerroksella. Suhteellinen diffuusiovastus määritetään seuraavasti:

$$s_d = \mu d \quad (2.22)$$

missä

s_d on suhteellinen diffuusiiovastus [m]
 d on materiaalikerroksen paksuus [m].

Materiaalin ominaisuutta vastustaa vesihöyryn virtausta materiaalin läpi kuvaa materiaalin vesihöyrynvastus ja se määritellään kaavan 2.23 mukaisesti.

$$Z_v = \frac{d}{\delta_v} \quad (2.23)$$

missä

Z_v on materiaalin vesihöyrynvastus [s/m].

Vesihöyrynvastus voidaan ilmoittaa myös vesihöyryn osapaine-eron avulla lausutun vesihöyrynläpäisevyyden avulla.

Materiaalin vesihöyrynläpäisevyys voidaan määrittää niin sanotun kuppikokeen avulla. Kuppikokeessa määritetty vesihöyrynläpäisevyys on todellisuudessa monen kosteuden siirtymismuodon summa. Kuppikokeen perusteella määritetty vesihöyrynläpäisevyys voi muuttua merkittävästi materiaalin kosteuspitoisuuden kasvaessa. Tämä johtuu todellisuudessa lähinnä pintadiffuusiosta ja kapillaarivirtauksesta. Hygrooskooppisella alueella vesihöyrynläpäisevyys on melko vakio. Kapillaarisella alueella diffuusiolla siirtyvän vesihöyryn määrä pienenee huokosten täyttyessä vedellä ja näin hidastaen huokosissa tapahtuvaa diffuusiota.

Kuppikokeessa kaikki kosteuden siirtymisen muodot vaikuttavat samaan suuntaan, koska kokeessa ei käytetä lämpötilaeroa. Todellisuudessa materiaalikerroksen yli voi vaikuttaa lämpötilaero, jolloin pintadiffuusio ja kapillaarinen siirtyminen voivat tapahtua vastakkaiseen suuntaan diffuusion nähden.

Pinnasta ilmaan siirtyvä kosteusvirran tiheys saadaan kaavasta 2.24.

$$g = \beta_v \Delta v \quad (2.24)$$

missä

β_v on pinnan kosteudensiirtokerroin [m/s]
 Δv on vesihöyrypitoisuusero pinnan ja ympäröivän ilman välillä [kg/m³].

2.2.2 Kapillaarinen siirtyminen

Kapillaarisessa kosteuden siirtymisessä vesi pyrkii siirtymään ohuen putken, kuten huokosputken, reunoja pitkin sisäisen koheesion ja kapillaariputken seinämän välisen adheesion vaikutuksesta. Tämän seurauksena veden pinta kaareutuu huokosputken sisällä muodostaen niin sanotun meniskuksen. Kaarevan veden pintaan syntyy pintajännitys,

jonka seurauksena veden pinnan ja sen yläpuolella olevan ilman välille syntyy paineero. Tätä eroa kutsutaan huokosalipaineeksi ja se voidaan määrittää kaavalla 2.25.

$$s = \frac{2\sigma}{r} \cos(\phi) \quad (2.25)$$

missä

- s on huokosalipaine [Pa]
- σ on pintajännitys [N/m]
- r on putken säde [m]
- ϕ on kontaktikulma veden meniskuksen ja putken seinämän välillä [-].

Tavanomaisille rakennusmateriaalille kontaktikulman arvona voidaan käyttää nollaa. (Vinha 2007)

Huokosilman suhteellisen kosteuden ja kapillaari-imun yhdistää Kelvinin laki kaavan 2.26 mukaisesti.

$$\ln(\varphi) = -\frac{sM_w}{\rho_w RT} \quad (2.26)$$

missä

- φ on huokosilman suhteellinen kosteus [-]
- M_w on veden moolimassa [kg/mol]
- R on yleinen kaasuvakio (8,31446 J/(mol·K)).

Kapillaarisen kosteusvirran tiheys materiaalikerroksen läpi saadaan kaavasta 2.27.

$$\mathbf{g} = -D_w \nabla w \quad (2.27)$$

missä

- \mathbf{g} on kapillaarisen kosteusvirran tiheys [kg/(m²·s)]
- D_w on materiaalin kapillaarinen kosteusdiffusiviteetti [m²/s]
- w on materiaalin kosteuspitoisuus [kg/m³].

Kapillaarinen kosteusdiffusiviteetti kuvaa, kuinka nopeasti materiaalin kosteuspitoisuus muuttuu uuteen tasapainotilaan kapillaarisen kosteudensiirron seurauksena. Kosteusdiffusiviteetin arvossa voivat olla mukana kaikki kosteuden siirtymisen muodot, jolloin se voidaan määrittää myös hygroskooppiselle alueelle.

Kapillaarisen kosteusvirran tiheys voidaan ilmoittaa myös huokosalipainegradientin avulla kaavalla 2.28.

$$\mathbf{g} = -k_w \nabla s \quad (2.28)$$

missä

k_w on materiaalin kosteudenjohtavuus [$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$].

Kosteudenjohtavuudessa ovat mukana kaikki kosteuden siirtymisen muodot vesihöyryn diffuusiota lukuun ottamatta. Myös hygroskooppisella alueella voi tapahtua kapillaarista kosteuden siirtymistä, mutta se on yleensä pientä diffuusion verrattuna.

Materiaalin kosteuspitoisuuden kasvaessa materiaalihuokosten seinämiin alkaa kertyä yhä enemmän vesimolekyylikerroksia. Tämän jatkuessa uloimpana olevien vesimolekyylien sidosvoima huokosen pintaan pienenee niin paljon, että ne voivat palata taikaisin huokosilmaan. Molekyylit voivat kuitenkin absorboitua uuteen kohtaan huokosen pinnassa välittömästi ilmaan palattuun. Tätä vesimolekyylien liikkeestä aiheutuvaa kosteuden siirtymistä kutsutaan pintadiffuusioksi. Vesimolekyylit siirtyvät tyypillisesti heikomman sidosvoiman vaikutusalueelta voimakkaamman sidosvoiman alueelle. Tämä tarkoittaa siirtymistä korkeammasta kosteuspitoisuudesta matalampaan kosteuspitoisuuteen. Pintadiffuusio tapahtuu siis samaan suuntaan kuin kapillaarivirtaus ja kummallekin voidaan käyttää kosteudensiirtopotentiaalina materiaalin kosteuspitoisuutta tai huokosilman suhteellista kosteutta. Tästä johtuen nämä siirtymismuodot voidaan yhdistää kosteudensiirron laskentatarkasteluissa. (Vinha 2007)

2.2.3 Kosteuden konvektio

Kosteus siirtyy vesihöyrynä virtaavan ilman mukana samaan tapaan kuin lämpöenergiaakin. Kosteuden laskennalliset konvektiotarkastelut ovat analogisia lämmönsiirron konvektiotarkastelujen kanssa. Kosteutta voi kulkeutua lämmön tavoin luonnollisen konvektion vaikutuksesta rakenteen sisällä tai pakotettuna konvektiona rakojen tai reikien läpi paine-erojen vaikutuksesta. Kosteusvirran tiheys raon tai reiän läpi voidaan laskea kaavalla 2.29.

$$\mathbf{g} = \mathbf{r}_a \Delta v \quad (2.29)$$

missä

\mathbf{r}_a on ilmavirran tiheys [$\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{s})$].

Kirjallisuudessa on esitetty eri yhtälöitä, joiden avulla saadaan laskettua ilmavirran tiheys raon tai reiän läpi riippuen raon geometriasta ja ilmavirran tyypistä (laminaarinen tai turbulenttinen).

2.2.4 Kosteus huokoisessa materiaalissa

Materiaalin kykyä sitoa (absorptio) ja luovuttaa (desorptio) kosteutta kutsutaan hygroskooppisuudeksi. Materiaalin huokosilman vesihöyryn osapaine pyrkii asettumaan samaan arvoon ympäröivän ilman vesihöyryn osapaineen kanssa sitomalla ja luovuttamalla kosteutta. Tätä kosteuspitoisuutta kutsutaan tasapainokosteudeksi. Hygroskooppisella alueella kosteuden sitoutumistasot voidaan jakaa kolmeen sitoutumistasoon, jotka ovat: monomolekulaarinen adsorptio, polymolekulaarinen adsorptio ja kapillaarikondenssi.

Monomolekulaarisissa adsorptiossa vesimolekyylit kiinnittyvät yksimolekyylisenä kerroksena materiaalin huokosseinämiin sähköisten sidosten avulla. Polymolekulaarisissa adsorptiossa huokosseinämään kiinnittynyt vesimolekyylikerros kasvaa usean molekyylin vahvuiseksi. Kapillaarikondenssissa materiaalin pienimmät huokokset täyttyvät kokonaan siten, että kosteus alkaa siirtyä niissä kapillaarisesti huokosalipaineen vaikutuksesta. Kapillaariverkosto ei ole tässä tilanteessa vielä yhtenäinen. Kapillaarikondenssi näkyy tasapainokosteuskäyrän kulmakertoimen alkaessa kasvaa.

Hygroskooppisen alueen suhteellisen kosteuden yläraja on noin 98 % RH, joka vastaa kosteuskammiossa saavutettavaa kosteuspitoisuutta (Hagentoft 2001). Tarkkaa rajaa on vaikea määrittää, koska mittaaminen korkeissa suhteellisen kosteuden olosuhteissa on vaikeaa. Hygroskooppinen tasapainokosteuskäyrä kuvaa materiaalin kosteuspitoisuutta ilman suhteellisen kosteuden funktiona. Materiaalin tasapainokosteus on erilainen riippuen lähestyykö materiaalin suhteellinen kosteus tasapainokosteuden arvoa kuivemasta vai kosteammasta suunnasta. Tätä eroa tasapainokosteuksissa kutsutaan hystereesiksi.

Kapillaarisella alueella tarkoitetaan materiaalin suhteellisen kosteuden aluetta välillä noin 98-100 % RH. Kapillaarisen alueen kosteuspitoisuutta kuvataan kapillaarisella tasapainokosteuskäyrän avulla, jossa kosteuspitoisuus esitetään esimerkiksi keskimääräisen huokosalipaineen funktiona.

Materiaaleilla voi olla eri suunnissa erilaiset ominaisuudet, jolloin materiaali on anisotrooppinen. Esimerkiksi puu on anisotrooppinen materiaali, jonka kosteudensiirto-ominaisuudet (myös lämmönsiirto-ominaisuudet) riippuvat tarkasteltavasta suunnasta.

Kun tarkastellaan epästationäärisiä tilanteita, kosteuden tasapainoyhtälö, joka ottaa huomioon aineen säilymislain, on kaavan 2.30 mukainen.

$$\rho_w \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(-\delta_p \frac{\partial p_v}{\partial x} - k_w \frac{\partial s}{\partial x} \right) \quad (2.30)$$

missä

- ρ_w on veden tiheys [kg/m³]
- u on materiaalin kosteuspitoisuus [kg/kg]

w on materiaalin kosteuspitoisuus [kg/m^3].

Mikäli kosteutta kulkeutuu materiaalin läpi liikkuvan ilman mukana, se täytyy erikseen ottaa huomioon tasapainoyhtälössä.

2.3 Ilman siirtyminen

Ilmavirran tiheys huokoisen materiaalin läpi voidaan laskea Darcyn laista kaavasta 2.31.

$$\mathbf{r}_a = -k_a \nabla p \quad (2.31)$$

missä

k_a on materiaalin ilmanläpäisevyys [$\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$]

p on ilmanpaine [Pa].

Materiaalin ilmanläpäisevyyteen vaikuttavat materiaalin huokoskoko ja -jakauma, sekä kuitujen tai huokosten suuntaus. Esimerkiksi mineraalivillan ilmanläpäisevyys on eri kohtisuoraan levyä vasten kuin pitkittäin kuitujen suuntaisesti.

Tuulikuormat aiheuttavat rakenteiden pintoihin painetta. Pintoihin kohdistuvan paineen suuruuteen vaikuttaa ilmastotekijöiden lisäksi tuulen nopeusprofiili. Nopeusprofiili puolestaan määritetään maaston rosoisuuden ja pinnanmuodostuksen perusteella. Maaston rosoisuuden arvioinnissa käytetään maastoluokkia (maastoluokat 0, I, II, III ja IV), jotka kuvaavat tarkasteltavan alueen suojaisuutta/avoimuutta ympäristön kasvillisuuden ja muiden rakennusten suhteen. Pienin maastoluokka (maastoluokka 0) kuvaa avomerta tai avointa rannikkoa. Suurin maastoluokka (maastoluokka IV) kuvaa puolestaan aluetta, joka on muiden rakennusten suojassa. (SFS-EN 1991-1-4 2011) Maastoluokkia on käytetty tässä tutkimuksessa viistosateen ja tuulen nopeuden muuntamiseen suojaisuuden perusteella erilaisten alueiden välillä.

3 RAKENTEIDEN KOSTEUSTEKNISEN TOIMINNAN ANALYSOINTIMENETELMÄ

3.1 Rakenteiden kosteusteknisen toiminnan arviointi

Rakenteiden rakennusfysikaalinen mitoitus edellyttää lämpö- ja kosteusfysiikan teorian, rakenteiden toimintakriteerien, vaurioitumismekanismien, rakennusmateriaalien rakennusfysikaalisten ominaisuuksien sekä rakenteille syntyvien rasitusten ja niiden yhteisvaikutuksen tuntemista, jotta rakenteiden toimintaa voidaan arvioida luotettavasti. Rakennusfysikaaliset mitoitustarkastelut ovatkin lujuustarkasteluihin nähden yleensä huomattavasti monimutkaisempia. Tämä johtuu muun muassa monista lämmön- ja kosteusensiirtymisen muodoista ja niiden yhteisvaikutuksesta, monista toimintakriteereistä sekä rakennusmateriaalien useista rakennusfysikaalisista ominaisuuksista, joita kaikkia ei ole välttämättä edes määritetty materiaaleille. (Vinha et al. 2013) Laskentatulosten tarkkuudesta ja laskentaohjelmien verifioinnista kerrotaan tarkemmin lähteessä Vinha et al. (2013) luvussa 5.

FRAME-tutkimusprojektin ja useiden sitä edeltävien tutkimusten yhteydessä Tampereen teknillisessä yliopistossa on kehitetty rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmä, jolla voidaan aiempaa luotettavammin tarkastella rakenteissa ilmeviä kosteusriskejä sekä nykyisessä että tulevaisuuden ilmastossa. Analysointimenetelmässä rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä käyttäytymistä tarkastellaan laskennallisesti mitoitavissa ulko- ja sisäilman olosuhteissa. (Vinha et al. 2013) Tässä tutkimuksessa on myös käytetty kyseisen analysointimenetelmän periaatteita. Menetelmän kuvaus on esitetty lähteessä Vinha et al. (2013).

3.2 Tarkasteluperiaatteet

Tässä tutkimuksessa arvioitiin rakenteiden homeutumisherkkyttä, jolloin vertailusuurteenä käytettiin Suomalaisen homemallin (ks. luku 3.3) mukaisia homeindeksien maksimiarvoja M_{max} [-]. Kantavissa rakenteissa sekä lämmöneristekerroksessa ei sallittu homeen kasvua, jolloin homeindeksin maksimiarvon tuli olla alle homeen kasvun alkamisen raja-arvon 1. Valittuun raja-arvoon on useita perusteita, joita on esitetty lähteessä Vinha et al. (2013, s. 62-63).

Ulkoilman olosuhteina käytettiin FRAME-projektin yhteydessä määritettyjä rakennusfysikaalisia testivuotia nykyilmastossa sekä niistä muokattuja ilmastonmuutoksen A2-skenaariota mukaisia tulevaisuuden ilmastoja. Puuverhotuille seinärakenteille on käytet-

ty Jokioisen vuoden 2004 ilmastoja ja siitä muokattuja tulevaisuuden ilmastoja. Vastavasti tiiliverhotuille rakenteille on käytetty Vantaan vuoden 2007 ilmastoja ja siitä muokattuja tulevaisuuden ilmastoja. Ilmatieteen laitos on tuottanut alkuperäiset tunnitaiset sääaineistot, joista FRAME-projektissa valittiin käytettävät testivuodet (Vinha et al. 2013).

Jokioisen testivuotia käytettäessä seinärakenteiden tarkasteltavana ilmansuuntana on käytetty pohjoista, jolloin auringonsäteilyn lämmittävä ja kuivattava vaikutus on vähäisin. Vantaan testivuotia käytettäessä seinärakenteiden tarkasteltavana ilmansuuntana on puolestaan etelä, jolloin viistosade on voimakkainta ja auringonsäteilyn lämmittävästä vaikutuksesta voimistuva vesihöyryn diffuusio siirtää kosteutta rakenteen sisäosiin. (Vinha et al. 2013)

Sisäilman lämpötila oli vakio 21 °C. Sisäilman kosteuslisänä käytettiin RIL 107-2012 mukaisia kosteuslisän mitoitusarvoja kosteusluokassa 2. Tässä luokassa kosteuslisä on 5 g/m³, kun ulkoilman lämpötila on alle 5 °C ja 2 g/m³, kun ulkoilman lämpötila on yli 15 °C. Näiden ulkolämpötilojen välillä kosteuslisä interpoloidaan lineaarisesti.

Sääaineisto ei sisältänyt ilmakehästä tulevan pitkäaaltoisen säteilyn määrää, joten sitä arvioitiin luvussa 3.5 valitulla parametrisoinnilla. Pitkäaaltoista säteilyä seinän ja maan sekä ympäröivien rakennusten ja kasvillisuuden välillä ei otettu huomioon. Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuutena käytettiin luvun 3.4 mukaisen menetelmän avulla laskettuja ilmanvaihtuvuuksia. Seinälle tuleva viistosaderasitus laskettiin standardin SFS-EN ISO 15927-3 (2009) mukaan käytettävissä olleesta sääaineistosta maastoluokassa 1. Ilmauotojen simuloinneissa käytettävät paine-erot olivat lähteessä Moisio (2018) sääaineiston mukaan määritettyjä tunnitaisia arvoja, jotka vastasivat seinärakenteen yläosassa vallitsevia paine-eroja. Tässä tutkimuksessa määritettyjä ilmakehästä tulevaa pitkäaaltoisen säteilyn määrää sekä tuuletusvälin ilmanvaihtuvuuksia on käytetty myös diplomityössä Moisio (2018).

Viistosade otettiin laskennassa huomioon tunneittaisina arvoina, joiden väliarvoja ei interpoloitu. Muiden säätiedostojen tunnitaiten arvojen väliarvot interpoloitiin lineaarisesti. Tutkimuksessa käytetty sääaineisto on esitetty liitteessä 1.

Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuus, viistosaderasitus sekä paine-erot riippuvat tarkasteltavan seinän korkeudesta. Tässä tutkimuksessa käytettäväksi seinän korkeudeksi valittiin 6 metriä, jolla voidaan kuvata kaksikerroksisen rakennuksen seinärakennetta. Ilmanvaihtuvuuden varioimiseksi myös 3 m korkeaa seinää käytettiin ilmanvaihtuvuuksien laskennassa.

Laskentaohjelmana oli Delphin 5.8.3. Delphin on numeerinen laskentaohjelma, jolla voidaan laskea yhdistettyä lämmön, kosteuden ja aineen siirtymistä huokoisissa rakennusmateriaaleissa. Rakennusmateriaalien rakennusfysikaalisina ominaisuuksina lasken-

taohjelmassa käytettiin FRAME-hankkeen yhteydessä Delphin-ohjelmassa käytettyjä materiaaliominaisuuksia, joita tarvittaessa täydennettiin laskentaohjelman omasta materiaalikirjastosta tai kirjallisuudessa käytetyistä arvoista. Tässä tutkimuksessa käytetyt materiaaliominaisuudet on esitetty liitteessä 2.

Rakenteita tarkasteltiin sekä ideaalisessa tilanteessa, jossa rakenteisiin ei ole ilmavuotoja että virhetilanteissa, joissa rakenteisiin on ilmavuotoja. Ilmavuoto mallinnettiin rakenteeseen pystysuuntaisena rakona, josta ilmavirta pääsi liikkumaan rakenteeseen paine-eroista johtuvan konvektion seurauksena (ks. luku 4.4).

Käyttötilanteen tarkasteluissa alkuolosuhteet (lämpötila ja suhteellinen kosteus) määritettiin lämmöneristekerroksen keskikohdan ulko- ja sisäpuolelle erikseen. Ensin laskettiin lämpötilalle ja suhteelliselle kosteudelle ulko- ja sisäilman olosuhteiden ensimmäisten arvojen keskiarvo. Ulkopuoliselle osuudelle käytettiin saadun keskiarvon ja ulkoilman arvon välistä keskiarvoa. Vastaavasti sisäpuoliselle osuudelle käytettiin keskiarvon ja sisäilman arvon välistä keskiarvoa. Näin rakenteen alkuolosuhteet pyrittiin asettamaan lähelle ulko- ja sisäilman olosuhteita laskennan alussa. Kuivumistarkasteluissa lämmöneristekerroksen suhteellisen kosteuden alkuarvoja varioitiin. Muiden rakennekerrosten suhteellisen kosteuden alkuarvona käytettiin arvoa 80 % RH.

Laskenta-ajaksi käyttötilanteen tarkasteluille valittiin kahden simulointivuoden jakso, joista ensimmäisen simulointivuoden aikana rakenteen lämpötila- ja kosteusolosuhteet tasaantuivat. Toisen vuoden laskentatuloksia käytettiin tulosten tarkasteluun. Ilmavuoto-tarkasteluissa jouduttiin osaan tuloksista käyttämään ensimmäisen simulointivuoden tuloksia, koska laskenta-ajat olivat hyvin pitkiä. Kuivumistarkasteluissa laskenta suoritettiin kuuden simulointivuoden jaksolle. Ulko- ja sisäilman olosuhteet pidettiin käyttötilanteeseen verrattuna samoina.

Tarkastelupisteiksi valittiin runkotolpan ulko- ja sisänurkat sekä tuulensuojakipsilevyn sisäpinta ja lämmöneristeen sisäpinta runkotolppien välistä. Tarkastelupisteiden sijainnit on esitetty luvussa 4.4.

3.3 Home rakenteissa ja Suomalainen homemalli

Mikrobeja ja itiöitä on lähes kaikkialla. Homevauriolla tarkoitetaan pinnan tai materiaalin poikkeavasti kohonnutta mikrobipitoisuutta, jossa esiintyy ei-toivottua mikrobikasvustoa tai -solukkoa. Kun rakenteet ovat riittävän kauan liian kosteat, homevauriokohtiin alkaa muodostua homesienten ja niitä muistuttavien bakteerien kasvustoja, jotka levittävät aineenvaihduntatuotteita ja itiöitä ympäristöönsä. Aineenvaihduntatuotteiden ja itiöiden kulkeutuessa sisäilmaan, ne voivat aiheuttaa terveyshaittoja. (Palomäki)

Homeen kasvulle otollisten olosuhteiden määrä riippuu merkittävästi vallitsevista lämpötila- ja kosteusolosuhteista sekä niiden vaikutusajasta. Home tarvitsee kasvaakseen li-

säksi ravinteita, joita on riittävästi ilmassa ja materiaalien pinnoilla. (Sisäilmayhdistys ry 2018)

Homeen kasvua voidaan tarkastella laskennallisesti Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n ja Tampereen teknillisen yliopiston yhdessä kehittämän Suomalaisen homemallin avulla (engl. Finnish mould growth model). Homemalli pohjautuu aiemmin VTT:n puumateriaaleille kehittämään homemalliin. Uuden mallin avulla homeen kasvua voidaan arvioida eri rakennusmateriaalien pinnoilla muuttuvissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa ajan funktiona. (Vinha et al. 2013)

Suomalaisessa homemallissa käytetään materiaalin homehtumista kuvaavana vertailusuurena homeindeksiä, M [-], joka vaihtelee välillä 0-6. Luku kuvaa homeen määrän lisääntymistä materiaalin pinnalla. Homeindeksin arvo lasketaan tunnitaisesta mittausaineistosta lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvojen perusteella. Taulukossa 3.1 on esitetty homeen kasvun luokitusperusteet eri homeindekseille.

Taulukko 3.1. Homeen kasvun luokitusperusteet. (Vinha et al. 2013)

Home-indeksi M	Havaittu homeenkasvu	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 (silmällä) Yli 50 % peitto alasta (mikroskoopilla)
5	Runsas silmin havaittava kasvu	Yli 50 % peitto alasta (silmillä)
6	Erittäin runsas kasvu	Lähes 100 % peitto, tiivis kasvusto

Homeindeksien arvot voidaan laskea kaikille materiaaleille, joiden homehtumisherkkyysluokat tunnetaan. Homehtumisherkkyysluokka kuvaa eri materiaalien eroja homehtumisherkkyydelle homeen kasvunopeuden ja maksimitason mukaan. Homehtumisherkkyysluokkia (HHL) on neljä, joihin materiaalit jaetaan tehtyjen homehtumiskokeiden perusteella. Homeen taantumaluokkia (HTL) on myös neljä, jotka ottavat huomioon homeen kasvulle epäsuotuisten olosuhteiden vaikutuksen homeen taantumiselle. (Vinha et al. 2013) Taulukoissa 3.2 ja 3.3 on esitetty eri rakennusmateriaalien jako eri homehtumisherkkyysluokkiin ja niitä vastaaviin homeen taantumaluokkiin.

Taulukko 3.2. Rakennusmateriaalien jako homehtumisherkkyyssuokkiin. (Vinha et al. 2013)

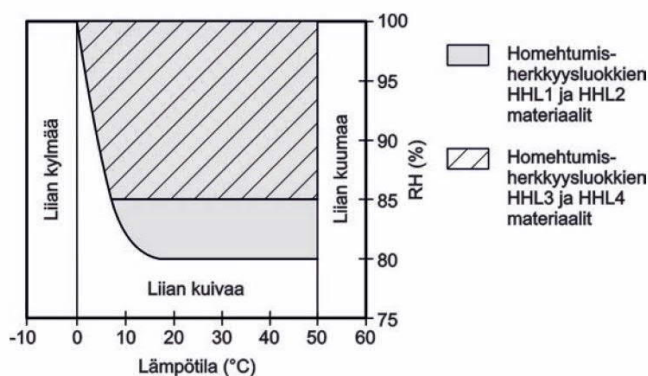
Homehtumisherkkyyssuokka		Rakennusmateriaalit
HHL1	Hyvin herkkä	Karkeasahattu ja mitalistettu puutavara (mänty ja kuusi), höylätty mänty, käsittelemätön huokoinen puukuitulevy
HHL2	Herkkä	Höylätty kuusi, paperipohjaiset tuotteet ja kalvot, kipsilevy, vaneri, lastulevy, bitumoidut/käsitellyt huokoiset kuitulevyt
HHL3	Kohtalaisen herkkä	Mineraalivillat, muovipohjaiset materiaalit, kevytbetoni*, kevytsorabetoni, karbonatisoitunut vanha betoni, sementtipohjaiset tuotteet, tiili
HHL4	Kestävä	Alkalinen uusi betoni, lasi ja metallit, tehokkaita homesuoja-aineita sisältävät materiaalit

* Kevytbetoni kuuluu homehtumisominaisuksiltaan kahteen eri homehtumisherkkyyssuokkaan. Homeen kasvunopeus vastaa homehtumisherkkyyssuokkaa HHL2, mutta homeindeksin maksimiarvo jää homehtumisherkkyyssuokan HHL3 tasolle.

Taulukko 3.3. Homehtumisherkkyyssuokkia vastaavat homeen taantumaluokat. (Vinha et al. 2013)

Homehtumisherkkyyssuokka	Homeen taantumaluokka
HHL1	HTL2 Merkittävä taantuma
HHL2	HTL3 Kohtalainen taantuma
HHL3	HTL4 Vähäinen taantuma
HHL4	HTL4 Vähäinen taantuma

Homeen kasvu on mahdollista, kun lämpötila- ja kosteusolosuhteet ovat homeen kasvulle otolliset. Kuva 3.1 kuvaa eri homehtumisherkkyyssuokkien homeen kasvulle otollisia olosuhteita lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mukaan. Tarkemmin homeindeksin laskenta on esitetty julkaisuissa Hukka & Viitanen (1999) ja Ojanen et al. (2010).



Kuva 3.1. Homeen kasvun kannalta suotuisat lämpötila- ja kosteusolosuhteet eri homehtumisherkkyyssuokissa. (RIL 255-1-2014)

Homeindeksin avulla ei tarkastella eri homelajien esiintymistä tarkasteltavassa materiaalissa, vaan se arvioi ainoastaan homeen kasvua kyseisen materiaalin pinnalla. Tästä

johtuen homemallilla ei voida arvioida, kuinka terveydelle haitallisia materiaalissa kasvavat homeet ovat. (Vinha et al. 2013)

3.4 Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuus

3.4.1 Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuuden määrittäminen

Tuuletusvälin toiminta perustuu liikkuvaan ilmaan, joka virratessaan tuuletusvälistä pois kuljettaa samalla rakenteista tuuletusväliin siirtyneen kosteuden ulkoilmaan. Tämä on kuitenkin mahdollista vain, jos tuuletusvälin vesihöyrypitoisuus on pienempi kuin rakenteen haihduttavalla pinnalla oleva vesihöyrypitoisuus. Tuuletusväliin tulevan ilman vesihöyrypitoisuus vastaa ulkoilman vesihöyrypitoisuutta ja lämpötila ulkoilman lämpötilaa.

Tuuletusvälissä olevan ilman vesihöyrypitoisuus voi olla ulkoilmaa kuivempaa, mikäli vesihöyrypitoisuus ulkona kasvaa. Tämä johtuu siitä, että tuuletusvälin vesihöyrypitoisuus ei ole vielä ehtinyt nousta tuuletusväliin tulevan ilmavirran seurauksena. Toisaalta se voi olla myös kosteampaa, jos rakenteesta tulee kosteusvirta tuuletusväliin, joka nostaa tuuletusvälin vesihöyrypitoisuutta.

Myös tuuletusvälin lämpötila voi olla eri ulkoilmaan nähden. Auringonsäteily lämmittää ulkoverhouksen pintaa, ja lämpövirta tuuletusväliin lämmittää siinä olevaa ilmaa. Kun auringonsäteily ei lämmitä ulkoverhousa, voi siitä lähtevä pitkäaaltoinen nettosäteily viilentää tuuletusvälin lämpötilaa, jolloin suhteellinen kosteus nousee. Suhteellisen kosteuden noustessa vesihöyryn tiivistymisen riski tuuletusvälin pinnoille kasvaa. Lisäksi koko rakenteen ulko-osien olosuhteet muuttuvat aikaisempaa kriittisemmiksi.

Delphin 5.8.3 -laskentaohjelmassa tuuletusvälissä virtaava ilma voidaan ottaa huomioon ilmanvaihtolähteellä. Ilman virtaus ei sisällä laskentaohjelmassa fyysisiä tulo- ja poistoreittejä, vaan sitä käsitellään lähde- ja nielutermeillä. Tätä varten määritetään tuuletusvälissä tapahtuva ilman tilavuusvirta, R (m^3/s), josta saadaan tuuletusvälissä tapahtuva ilmanvaihtuvuus ACH (air change rate per hour [$1/h$]). Ilmanvaihtuvuus kuvaa, kuinka monta kertaa tuuletusvälissä oleva ilma vaihtuu kokonaan aikayksikössä.

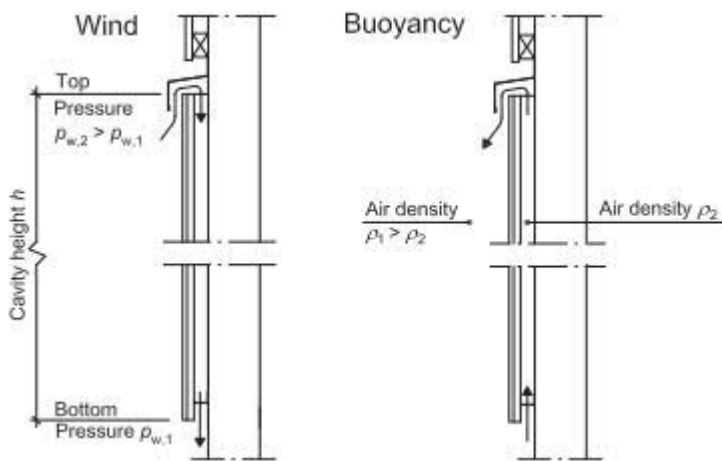
Ilmanvaihtuvuuden tai ilmavirran nopeuden arvioimiseen tuuletusvälissä ei ole yksiselitteistä keinoa, vaikka tutkimustuloksia niistä on olemassa. (Falk et al. 2014; Falk & Sandin 2013a; Falk & Sandin 2013b; Langmans et al. 2016; Langmans & Roels 2015a; Nore 2009; Straube et al. 2004; Van Straaten 2003) Ilmavirta tuuletusvälissä on epä säännöllistä ja sen nopeus ja suunta vaihtelevat usein (Falk & Sandin 2013b). Puuverhottujen seinärakenteiden tuuletusväleissä ilmanvaihtuvuudet vaihtelevat tutkimusten mukaan suurusluokassa 100-1000 $1/h$. Tiiliverhotuissa rakenteissa, joissa ilman tulo- ja

poistoaukkoina ovat avonaiset tiilisaumat seinän ala- ja yläosissa, ilmanvaihtuvuus on suurusluokkaa 1-10 1/h.

Langmans et al. (2016) ovat mitanneet puu- ja tiiliverhottujen julkisivujen ilmanvaihtuvuuksia Belgiassa. Tulosten mukaan helmi-toukokuun välisenä aikana koillisseinällä puuverhotun julkisivun ilmanvaihtuvuuksista 70 % oli välillä 100,0-562,7 1/h ja lounaisseinällä 140,0-758,7 1/h. Vastaavasti maaliskesäkuun välisenä aikana lounaisseinällä ilmanvaihtuvuudet olivat välillä 150,99-592,3 1/h. Vastaavat arvot tiiliverhotuille seinärakenteille, joissa tuuletusvälin tulo- ja poistoaukkoina ovat avoimet tiilisaumat (OHJ, open head joint) seinän ala- ja yläosissa (2 OHJ/m), ovat 1,8-5,6 1/h, 2,7-7,7 1/h ja 3,3-11,6 1/h. Tuuletusvälin paksuus oli 40 mm molempien julkisivuverhousten takana ja seinän korkeus oli 2,3 m. Tutkimuksen mukaan suojan puoleisen seinän ilmanvaihtuvuudet olivat 25-40 % pienempiä kuin tuulen vastaisen seinän.

Falk & Sandin (2013b) ovat tehneet kenttämittauksia 25 mm paksulle tuuletusvälille Lundissa, Ruotsissa, puuverhotulle seinärakenteelle. Eteläseinällä loka-helmikuun välillä tehdyissä mittauksissa ilmanvaihtuvuuksien keskiarvo oli 327 1/h. Seinän korkeus oli 2,15 m. Lähteessä Falk & Sandin (2013a) on määritetty 25 mm paksulle tuuletusvälille ilmanvaihtuvuudeksi 190-270 1/h ja 40 mm paksulle 240-320 1/h. Seinän rakenne ja olosuhteet olivat vastaavat lähteeseen Falk & Sandin (2013b) verrattuna.

Ilmavirta tuuletusvälissä aiheutuu seinän ylä- ja alaosan välisestä tuulenpaine-erosta ja lämpötilaerojen ympäröivän ilman ja tuuletusvälin ilman välillä aiheuttamasta nosteesta. Kuvassa 3.2 on havainnollistettu näiden kahden potentiaalín aiheuttamat ilmavirrat.



Kuva 3.2. Tuuletusvälin ilmavirran synnyttävät potentiaalit. (Falk 2014)

Falk & Sandin (2013b) ovat esittäneet, miten tuuletusvälin ilmanvaihtuvuutta voidaan arvioida laskennallisesti. Seuraavaksi on esitetty tätä tutkimusta varten määritetyn laskennallisen ilmanvaihtuvuuden määrittämiseksi käytetyt kaavat lähteen Falk & Sandin (2013b) mukaisesti.

Tuulen aiheuttama paine-ero, Δp_w [Pa], tuuletusvälin ylä- ja alaosan välillä saadaan kaavasta 3.1.

$$\Delta p_w = \Delta C_p \frac{\rho_a U_{m,5}^2}{2} \quad (3.1)$$

missä

ΔC_p on ulkoisen tuulenpaineen erotuksen kerroin rakenteen ylä- ja alaosan välillä, jolle käytetään arvoa 0,0375 (Falk et al. 2014)

ρ_a on ulkoilman tiheys [kg/m³]

$U_{m,5}$ on tuulen nopeus viiden metrin korkeudella mitattuna [m/s].

Tässä tutkimuksessa ilmanvaihtuvuuden määrittämiseksi tuulen nopeuden arvoina on käytetty sääaineiston tuulen nopeutta muunnettuna standardin SFS-EN 1991-1-4 (2011) mukaan tarkastelukorkeuden ja maastoluokan perusteella.

Nosteen aiheuttama paine-ero, Δp_b [Pa], saadaan kaavasta 3.2.

$$\Delta p_b = 3462 \left[\frac{1}{T_{out}} - \frac{1}{T_{cm}} \right] h \quad (3.2)$$

missä

T_{out} on ulkoilman lämpötila [K]

T_{cm} on tuuletusvälin lämpötila [K]

h on seinän korkeus [m].

Ilmavirtauksen oletetaan tapahtuvan tuuletusvälissä ainoastaan pystysuunnassa. Tuulen ja nosteen aiheuttamien paine-erojen yhteisvaikutus saadaan summaamalla osatekijät yhteen. Tällöin tuuletusvälin ilmavirran aiheuttava potentiaali, Δp_{driv} [Pa], on jokaisella ajanhetkellä kaavan 3.3 mukainen.

$$\Delta p_{driv} = \Delta p_b + \Delta p_w \quad (3.3)$$

Tuuletusvälin lämpötilan ollessa ulkoilmaa lämpimämpää noste aiheuttaa ylöspäin virtaavan ilmavirran, kun taas seinää vastaan kohtisuora tuuli aiheuttaa alaspäin virtaavan ilmavirran. Rakennuksen suojan puoleiseen seinään aiheutuva tuulenpaine on imua, jolloin tuulen aiheuttama ilmavirta on ylöspäin. Tässä tutkimuksessa seinän normaalin suunnasta enintään 45 astetta poikkeava tuulen suunta otetaan huomioon tarkastelemalla seinää tuulenpuoleisena seinänä (tuuli aiheuttaa ilmavirran alaspäin). Muutoin tuulen imu aiheuttaa tuuletusvälissä ylöspäin virtaavan ilmavirran. Ilmavirran tulokulmalla ei Falk & Sandin (2013b) mukaan ole suurta vaikutusta tuulenpaine kertoimien erotukselle, ΔC_p , joten tässä tutkimuksessa sille käytettiin vakioarvoa tuulen suunnasta riippumatta.

Muun muassa Kronwall (1980) on osoittanut, että aineiden virtausmekaniikan avulla voidaan mallintaa ilman liikkeitä tuuletusväleissä. Tuuletusvälissä tapahtuu virtauspinnoista aiheutuvaa kitkahäviötä, joka saadaan Darcy-Weisbachin yhtälöstä. Lisäksi tuuletusvälin tulo- ja poistoaukoissa voi olla ilmavirtausta hidastavia mutkia, kuten tippapeltejä tai hyönteisverkkoja, joiden aiheuttamat häviöt otetaan huomioon paikallisilla häviökertoimilla. Yhtälö, joka kuvaa ilmavirtausta aiheuttavien potentiaalien ja häviöiden välistä riippuvuutta, on kaavan 3.4 mukainen.

$$\Delta p_{driv} = \lambda \frac{h}{d_H} \frac{\rho_a u_m^2}{2} + \sum_{i=1}^k \xi_i \frac{\rho_a u_{m,i}^2}{2} \quad (3.4)$$

missä

- λ on kitkakerroin [-]
- d_H on hydraulinen läpimitta [m]
- u_m on ilmavirran nopeus tuuletusvälissä [m/s]
- ξ_i on häviökerroin [-].

Kitkakertoimen arvo saadaan laskettua kaavojen 3.5-3.7 avulla.

$$\lambda = \frac{64}{\left[\frac{2}{3} + \frac{11}{24} \frac{d}{w} \left(2 - \frac{d}{w} \right) \right] Re}, \text{ kun } Re \leq 2300 \quad (3.5)$$

$$\lambda = \frac{(3500 - Re)\lambda^{Re=2300} + (Re - 2300)\lambda^{Re=3500}}{1200}, \text{ kun } 2300 < Re < 3500 \quad (3.6)$$

$$\lambda = \left[2 \log \left(\frac{-4,793}{Re} \log \left(\frac{10}{Re} + 0,2 \frac{\varepsilon}{d_H} \right) + 0,2698 \frac{\varepsilon}{d_H} \right) \right]^{-2}, \text{ kun } Re \geq 3500 \quad (3.7)$$

missä

- d on tuuletusvälin paksuus [m]
- w on tuuletusvälin leveys [m]
- Re on Reynoldsin luku [-]
- ε on pinnan karheus (0.001 m).

Reynoldsin luku voidaan laskea kaavalla 3.8.

$$Re = \frac{u_m d_H \rho_c}{\eta_a} \quad (3.8)$$

missä

- ρ_c on tuuletusvälissä olevan ilman tiheys [kg/m³]
- η_a on ilman dynaaminen viskositeetti ($1.74 \cdot 10^{-5}$ Pa·s).

Hydraulinen läpimitta lasketaan kaavalla 3.9.

$$d_H = \frac{2dw}{d+w} \quad (3.9)$$

Sisääntulo- ja poistoaukkojen häviökertoimina on käytetty puuverhotuilla tuuletusväleillä kaavojen 3.10 ja 3.11 mukaisia arvoja.

$$\xi_{en} = 1 + K_c \quad (3.10)$$

$$\xi_{ex} = 0 \quad (3.11)$$

missä suppeumakerroin, K_c [-], määritetään kaavojen 3.12-3.14 avulla.

$$K_c = 0,98 \cdot Re^{-0,03}, \text{ kun } Re < 1000 \quad (3.12)$$

$$K_c = 10,59 \cdot Re^{-0,374}, \text{ kun } 1000 \leq Re \leq 3000 \quad (3.13)$$

$$K_c = 0,57 \cdot Re^{-0,01}, \text{ kun } Re > 1000 \quad (3.14)$$

Tuuletusvälin yläpään sadepellit ja muut virtausta hidastavat mutkat voidaan ottaa huomioon häviökertoimella ξ_{be} . Tässä tutkimuksessa sille on käytetty arvoa nolla, mikäli muuta ei ole mainittu, joka tarkoittaa avointa tuuletusvälin yläpäättä.

Yhtälö 3.4 voidaan muotoilla uudelleen, jolloin voidaan ratkaista ilman tilavuusvirta kaavasta 3.15.

$$\Delta p_{driv} = \left(\lambda \frac{h}{d_H} \left(\frac{1}{A_c} \right)^2 + \sum_{i=1}^k \xi_i \left(\frac{1}{A_i} \right)^2 \right) \frac{\rho_a R^2}{2} \quad (3.15)$$

missä

A_c on tuuletusvälin poikkipinta-ala [m^2]

A_i on tuuletusvälin osan poikkipinta-ala, joka vastaa häviökerrointa ξ_i [m^2].

Nyt voidaan ratkaista ilmanvaihtuvuus kaavasta 3.16.

$$ACH = \frac{R}{dwh} \cdot 3600 \quad (3.16)$$

Ilmanvaihtuvuuden vähimmäisarvona on käytetty puuverhotun seinän tapauksessa arvoa 10 1/h, samoin kuin lähteessä Nore (2009).

Erilaisille ilmavirtausta hidastaville mutkille häviökertoimia saadaan muun muassa lähteen Falk & Sandin (2013b) kuvasta 5. Tiilimuurin alareunan ilmavirran kulkuaukkona toimivan avoimen tiilisauman (OHJ) kitkahäviönä on käytetty lähteen Langmans & Roels (2015a) kuvan 4 mukaan häviökerrointa 5,4.

Tuuletusvälin lämpötila riippuu muun muassa seinään kohdistuvasta auringonsäteilyn määrästä ja ilmavirran nopeudesta tuuletusvälissä. Tuuletusvälin lämpötila nousee, kun auringonsäteilyä kohdistuu seinään. Kun lämpötila tuuletusvälissä nousee, voimistuu myös nosteen aiheuttama ilmavirran liike tuuletusvälissä, jolloin ulkoilmaa tulee yhä enemmän tuuletusväliin tasoittamaan lämpötilaeroja. Delphin-ohjelmassa voidaan ottaa huomioon ilmavirtausten vaikutus rakenteen lämpö- ja kosteustekniseen toimintaa, mutta edellä kuvattuun iteratiiviseen menetelmään ei ole mahdollisuutta. Tämän takia tästä aiheutuvaa virhettä ei ole käsitelty tässä tutkimuksessa, vaan tuuletusvälin laskennassa käytetyt tuuletusvälin lämpötilat on sidottu ainoastaan ulkoilman lämpötilaan.

Yksiselitteistä menetelmää tuuletusvälin lämpötilan arviointiin ei ole. Vinhan (2007) tutkimuksen tulokset olivat kuitenkin tämän tutkimuksen käyttöön soveltuvimpia. Tutkimuksessa mitattiin yli vuoden ajan tuuletusvälin lämpötiloja, joista tuloksena oli saatu tuuletusvälin lämpötila ulkoilman lämpötilan funktiona eri ilmansuuntaan olevissa puu- ja tiiliverhotuissa ulkoseinissä. Puuverhotun seinän tuuletusvälin paksuus oli 22 mm ja tiiliverhotun tuuletusvälin paksuus oli 20 mm. Tässä tutkimuksessa tuuletusvälin lämpötilana on käytetty lähteessä Vinha (2007) tehtyjen tuuletusvälin lämpötilan mittausten mukaisia arvoja, jotka sovitettiin tätä tutkimusta varten toisen asteen polynomeilla ulkoilman lämpötilan funktioiksi (ks. Liite 3).

Tuuletusvälissä esiintyvien lämpötilojen mittauksia on esitetty muun muassa lähteissä Falk & Sandin (2013a), Falk & Sandin (2013b), Finch (2007), Langmans et al. (2016), Langmans & Roels (2015a), Straube et al. (2004) ja Vinha (2007). Lähteiden mukaan tuuletusvälin lämpötila voi olla välillä kylmempää ja välillä lämpimämpää kuin ulkoilman lämpötila. Varsinkin yöaikaan tuuletusvälin lämpötilat olivat hyvin lähellä ulkoilman lämpötilaa tai tätä kylmempää. Päiväaikaan pohjoisen julkisivun tuuletusväleissä lämpötilat ovat kohonneet pääsääntöisesti muutamia asteita ulkoilmaa lämpimämmäksi. Etelän puoleisilla seinillä tuuletusvälin lämpötilat ovat olleet päiväaikaan jopa yli kymmenen astetta ulkoilmaa lämpimämpiä, kun taas yöaikaan lämpötilat ovat laskeneet pohjoisseinän tuuletusvälin tavoin lähelle ulkoilman lämpötilaa.

Tiiliverhoilluilla rakenteilla on kirjallisuuden tutkimuksissa käytetty sekä ala- että yläosissa avoimia tiilisaumoja (OHJ), joista ilmavirta pääsee kulkemaan. Tässä tutkimuksessa tehdyissä tarkasteluissa tuuletusvälin yläosa on tiiliverhotuilla rakenteilla kokonaan avoin, joka mahdollistaa suuremman ilmanvaihtuvuuden kuin kirjallisuuden tutkimuksissa on havaittu, koska avoimet tiilisaumat aiheuttavat suurempia häviöitä ilmavirrassa kuin kokonaan avoin kulkureitti.

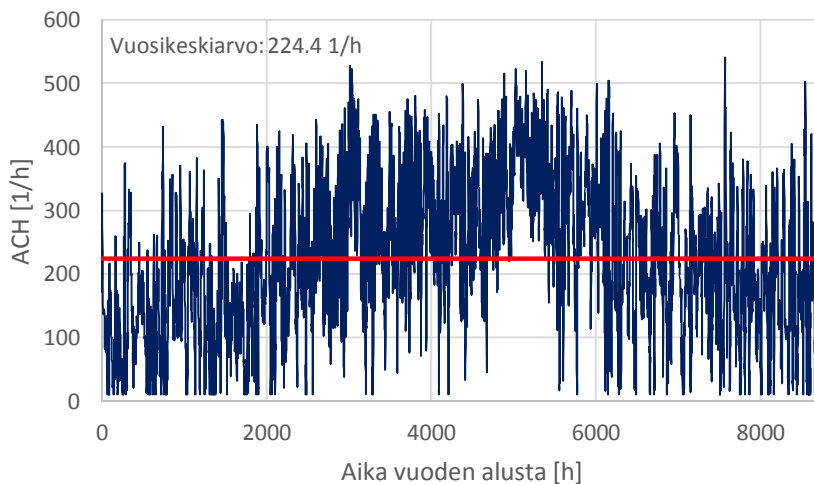
3.4.2 Ilmanvaihtuvuus puuverhouksen takana

Puuverhotun julkisivun takana olevassa tuuletusvälissä ilman lämpötila vaihtelee pohjoisseinällä suhteellisen vähän suuren ilmanvaihtuvuuden seurauksena sekä vähäisen suoran auringonsäteilyn osuessa seinälle. Tällöin tuuletusvälin lämpötilan vaihtelusta ei

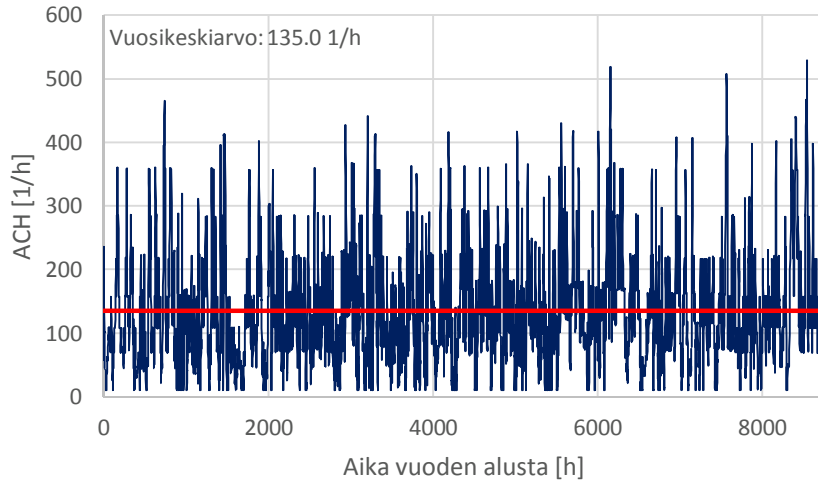
aiheudu virhettä niin paljon verrattuna tilanteeseen, jossa lämpötilat vaihtelevat huomattavasti muun muassa auringonsäteilyn määrän vaihdellessa.

Kuvat 3.3-3.12 esittävät Jokioisen vuoden 2004 sääaineistolla, edellä esitetyn laskentatavan mukaan, määritetyt tunnitaiset ilmanvaihtuvuudet. Tuuletusvälit ovat 25 mm ja 48 mm paksut ja seinän korkeudet ovat 3,0 m ja 6,0 m. Tuuletusvälit ovat ylä- ja alapäistään avoimia ellei muuta ole mainittu. Tuuletusvälin yläpään pelti on lähteen Falk & Sandin (2013b) mukainen tuuletusvälin yläpään metallipelti (Type 2), joka hidastaa ilmavirtausta. Siinä ilmavirta pääsee tuuletusväliin 12 mm leveästä raosta ja tekee 90 asteen suunnanmuutoksen. Tuulen aiheuttaman ilmavirran laskemiseksi sääaineiston tuulen nopeuden arvot on muunnettu standardin SFS-EN 1991-1-4 (2011) mukaan maastoluokkaan 1.

Eteläseinällä kesäaikana huomataan selvä ilmanvaihtuvuuden lisääntyminen (kuva 3.3). Tämä on seurausta tuuletusvälin ilman lämpenemisestä auringonsäteilyn vaikutuksesta, jolloin nosteen aiheuttama ilmavirta tuuletusvälissä kasvaa. Pohjoisseinällä ilmanvaihtuvuudet ovat vuoden mittaan tasaisempia, sillä tuuletusvälin lämpötila on eteläseinään verrattuna paljon lähempänä ulkoilman lämpötilaa, jolloin nosteen aiheuttama ilmavirran liike pysyy tasaisempuna vuositasolla (kuva 3.4).

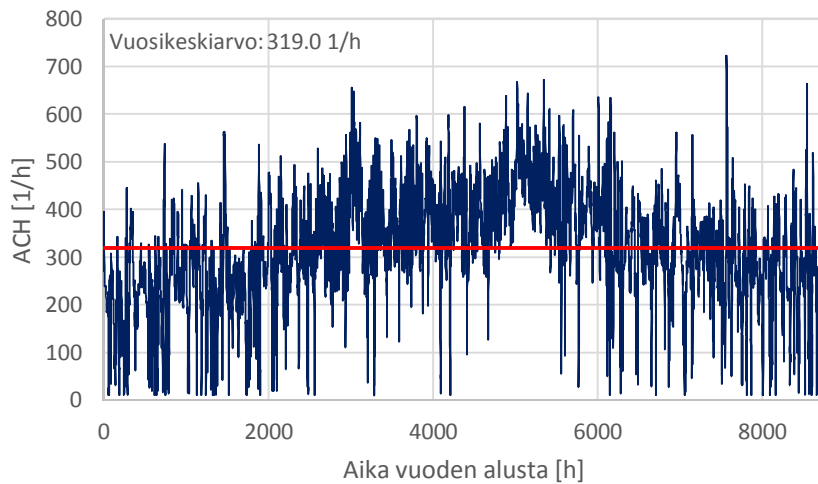


Kuva 3.3. Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuus 25 mm paksussa puuverhotussa tuuletusvälissä. Seinä on eteläpuoleinen ja 6,0 m korkea. Tuuletusvälin yläpää on kokonaan avoin.



Kuva 3.4. Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuus 25 mm paksussa puuverhotussa tuuletusvälissä. Seinä on pohjoisenpuoleinen ja 6,0 m korkea. Tuuletusvälin yläpää on kokonaan avoin.

Kun tuuletusvälin paksuus on 48 mm, kasvavat ilmavaihtuvuudet 25 mm paksuun tuuletusväliin verrattuna (kuvat 3.5 ja 3.6). Myös aiemmissa tutkimuksissa tuuletusvälin kasvattaminen lisäsi ilmanvaihtuvuutta (Falk & Sandin 2013a) Tässä ilmavaihtuvuuden lisääntyminen on ollut suhteessa suurempaa, koska edellä mainitussa tutkimuksessa tuuletusvälin yläosassa oli ilmavirtausta hidastava pelti, joka tasoitti eroja.

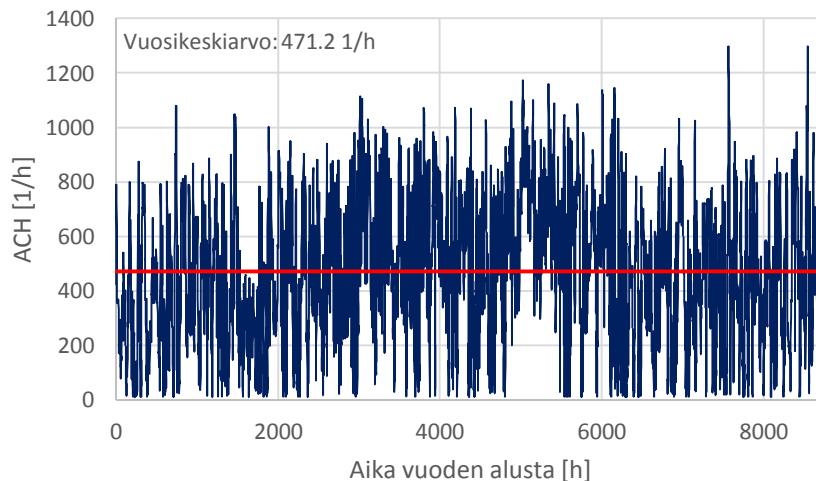


Kuva 3.5. Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuus 48 mm paksussa puuverhotussa tuuletusvälissä. Seinä on eteläpuoleinen ja 6,0 m korkea. Tuuletusvälin yläpää on kokonaan avoin.

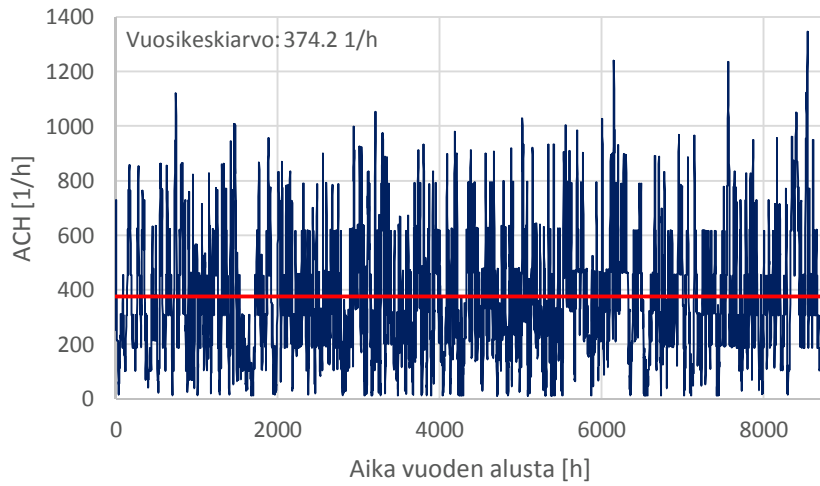


Kuva 3.6. Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuus 48 mm paksussa puuverhotussa tuuletusvälissä. Seinä on pohjoispuoleinen ja 6,0 m korkea. Tuuletusvälin yläpää on kokonaan avoin.

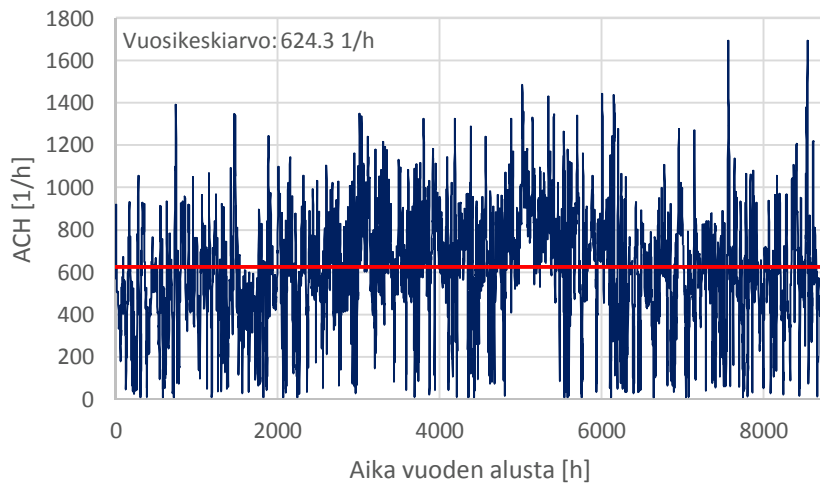
Tuuletusvälin korkeuden ollessa 3,0 m, ilmanvaihtuvuuden arvot kasvavat selvästi 6,0 m korkuiseen tuuletusväliin verrattuna (kuvat 3.7-3.10). Tämä johtuu siitä, että matalammassa tuuletusvälissä ilma vaihtuu nopeammin samalla ilmavirran nopeudella. Lisäksi tuuletusvälin kitkahäviöt vähenevät ilmavirran kulkeman matkan lyhentyessä. Ilmanvaihtuvuuden arvot pysyvät kuitenkin enimmäkseen alueella 100-1000, joihin aiempien tutkimusten mukaan puuverhotun julkisivun ilmanvaihtuvuudet sijoittuivat.



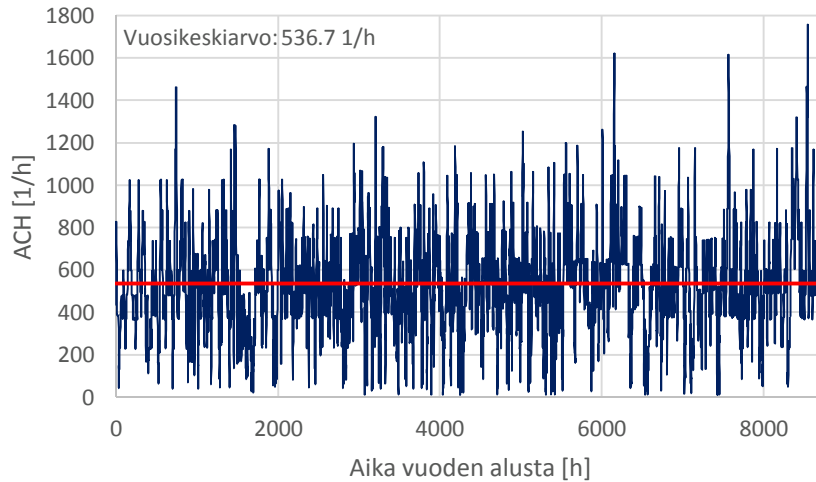
Kuva 3.7. Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuus 25 mm paksussa puuverhotussa tuuletusvälissä. Seinä on eteläpuoleinen ja 3,0 m korkea. Tuuletusvälin yläpää on kokonaan avoin.



Kuva 3.8. Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuus 25 mm paksussa puuverhotussa tuuletusvälissä. Seinä on pohjoisensuoleinen ja 3,0 m korkea. Tuuletusvälin yläpää on kokonaan avoin.

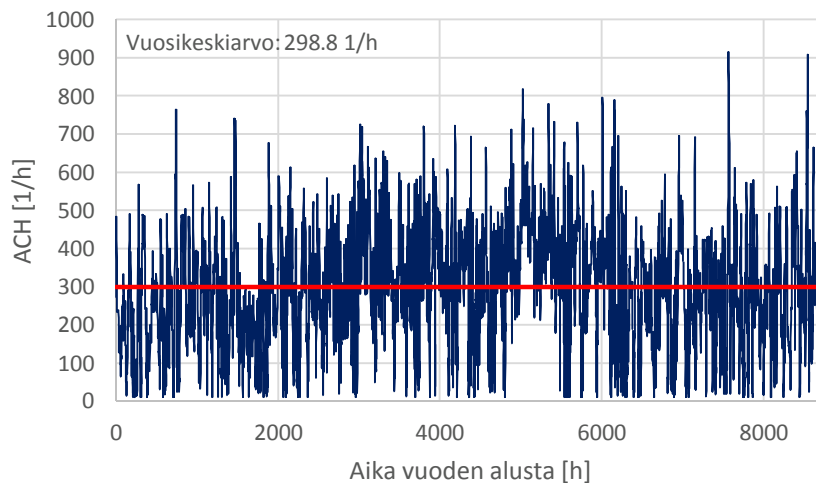


Kuva 3.9. Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuus 48 mm paksussa puuverhotussa tuuletusvälissä. Seinä on etelänsuoleinen ja 3,0 m korkea. Tuuletusvälin yläpää on kokonaan avoin.

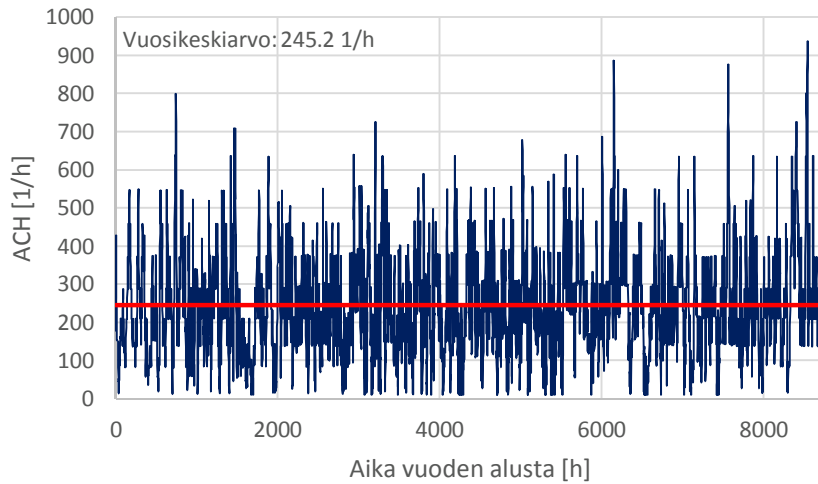


Kuva 3.10. Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuus 48 mm paksussa puuverhotussa tuuletusvä-
lissä. Seinä on pohjoisenpuoleinen ja 3,0 m korkea. Tuuletusvälin yläpää on kokonaan
avoin.

Kun tuuletusvälin yläpäähän lisätään ilmavirtausta hidastava pelti, eteläisen ja pohjoisen seinien ilmanvaihtuvuuksien erot tasoittuvat (kuvat 3.11 ja 3.12). Eteläisen seinän arvot vastaavat melko hyvin lähteissä Falk & Sandin (2013a) ja Falk & Sandin (2013b) mitat-
tuja arvoja. Mittaukset edellä mainituissa kirjallisuuslähteissä on tehty loka-helmikuun
välillä. Kuvissa 3.11 ja 3.12 esitetyt arvot ovat koko vuoden ajalta, jolloin muun muassa
kesän lämpimät jaksot kasvattavat varsinkin eteläseinän ilmanvaihtuvuuksia syys- ja
talviajan mittauksiin nähden.



Kuva 3.11. Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuus 25 mm paksussa puuverhotussa tuuletusvä-
lissä. Seinä on etelänpuoleinen ja 3,0 m korkea. Tuuletusvälin yläpäässä on ilmavirtaa
hidastava pelti.



Kuva 3.12. Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuus 25 mm paksussa puuverhotussa tuuletusvä-
lissä. Seinä on pohjoisenpuoleinen ja 3,0 m korkea. Tuuletusvälin yläpäässä on ilmavir-
taa hidastava pelti.

Taulukkoon 3.4 on koottu puuverhouksen takana olevien ilmanvaihtuvuuksien vuosi-
keskiarvot etelä- ja pohjoisseinillä eri seinän korkeuksilla ja tuuletusvälin paksuuksilla.

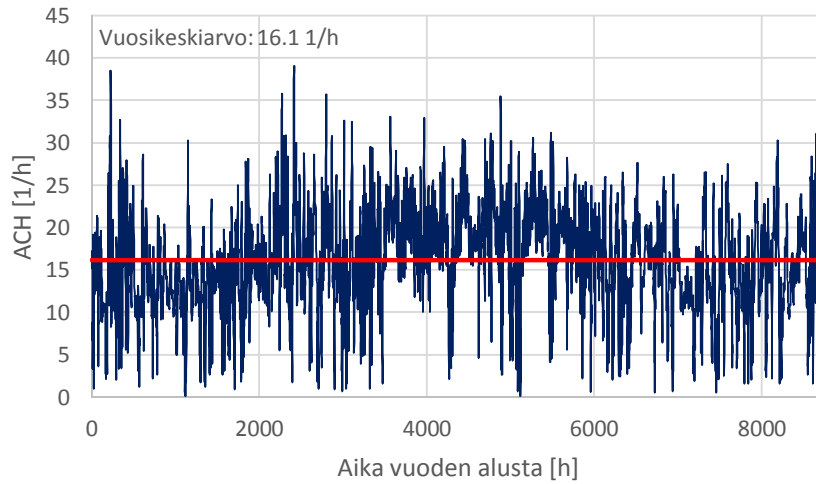
Taulukko 3.4. Kooste ilmanvaihtuvuuksien vuosikeskiarvoista puuverhouksen takana
olevissa tuuletusväleissä.

Puuverhaus	Eteläseinä		Pohjoisseinä	
	3 m	6 m	3 m	6 m
Seinän korkeus	3 m	6 m	3 m	6 m
Tuuletusvälin paksuus				
25 mm, avoin yläpää	471,2 1/h	224,4 1/h	374,2 1/h	135,0 1/h
48 mm, avoin yläpää	624,3 1/h	319,0 1/h	536,7 1/h	237,0 1/h
25 mm, pelti yläpäässä	298,8 1/h		245,2 1/h	

3.4.3 Ilmanvaihtuvuus tiiliverhouksen takana

Tiiliverhotun julkisivun takana olevassa tuuletusvälissä alapään ilmavirtauksen kulku-
aukkoina ovat avoimet tiilisaumat. Tiilisaumoista joka kolmas sauma on avoin. Tuule-
tusvälin yläpää on kokonaan avoin.

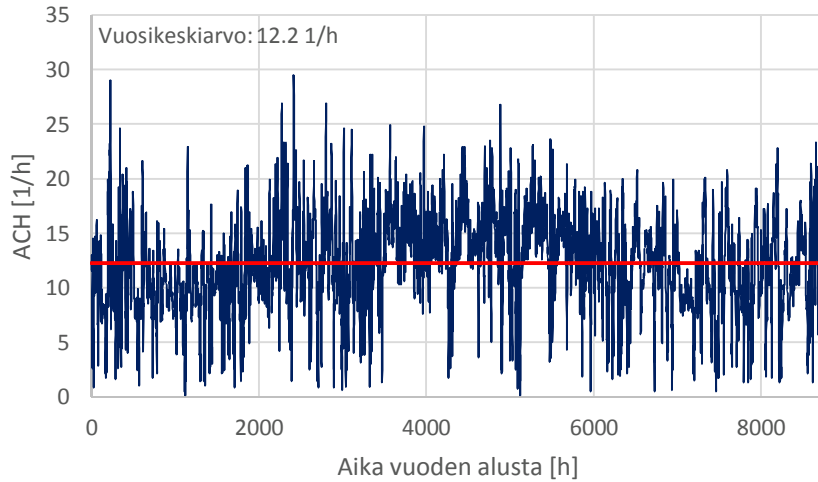
Kuvissa 3.13-3.20 on esitetty Vantaan vuoden 2007 sääaineistolla, edellä esitetyn las-
kentavan mukaan, määritetyt ilmanvaihtuvuudet tunneittain. Tuuletusvälit ovat 30 mm
ja 40 mm paksut ja seinän korkeudet ovat 3,0 m ja 6,0 m. Tuulen aiheuttaman ilmavir-
ran laskemiseksi sääaineiston tuulen nopeuden arvot on muunnettu standardin SFS-EN
1991-1-4 (2011) mukaan maastoluokkaan 1.



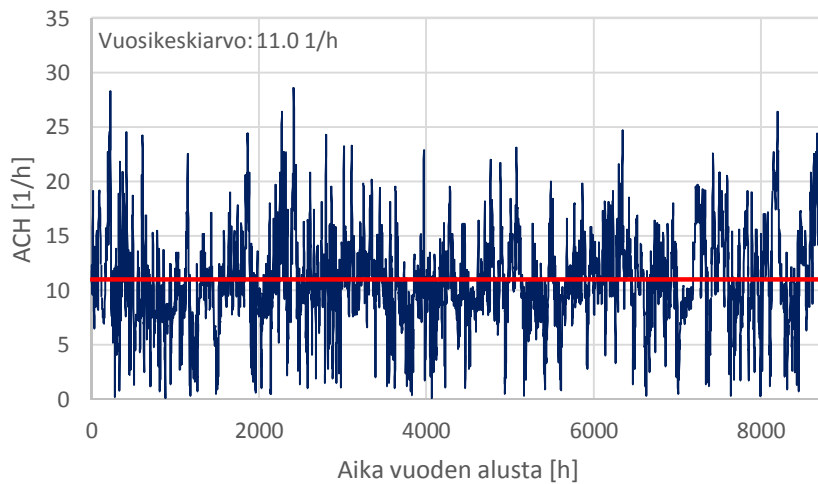
Kuva 3.13. Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuus 30 mm paksussa tiiliverhotussa tuuletusvä-
lissä. Seinä on eteläpuoleinen ja 6,0 m korkea. Tuuletusvälin yläpää on kokonaan
avoin.



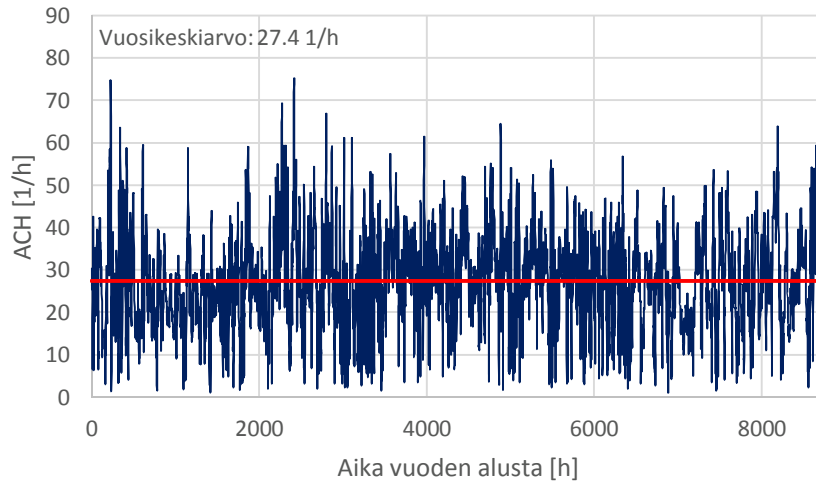
Kuva 3.14. Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuus 30 mm paksussa tiiliverhotussa tuuletusvä-
lissä. Seinä on pohjoispuoleinen ja 6,0 m korkea. Tuuletusvälin yläpää on kokonaan
avoin.



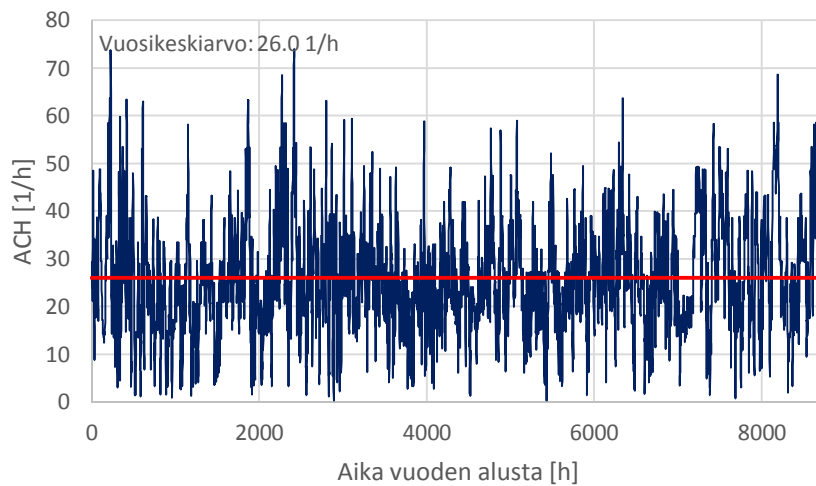
Kuva 3.15. Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuus 40 mm paksussa tiiliverhotussa tuuletusvä-
lissä. Seinä on eteläpuoleinen ja 6,0 m korkea. Tuuletusvälin yläpää on kokonaan
avoin.



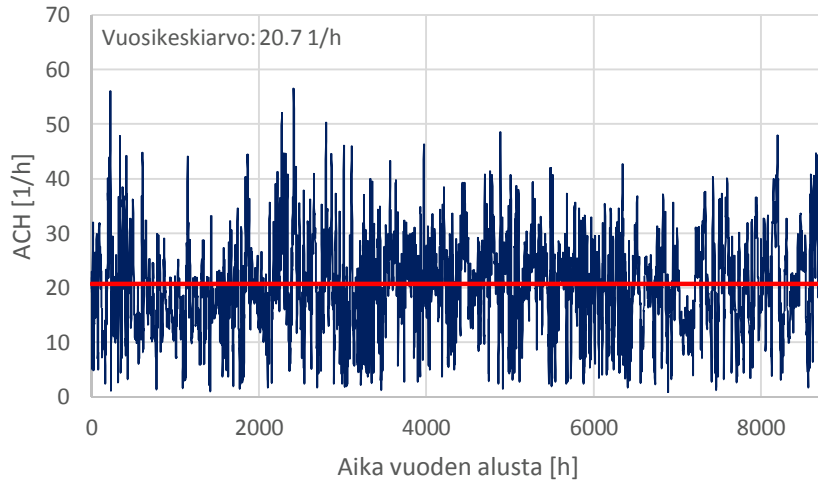
Kuva 3.16. Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuus 40 mm paksussa tiiliverhotussa tuuletusvä-
lissä. Seinä on pohjoispuoleinen ja 6,0 m korkea. Tuuletusvälin yläpää on kokonaan
avoin.



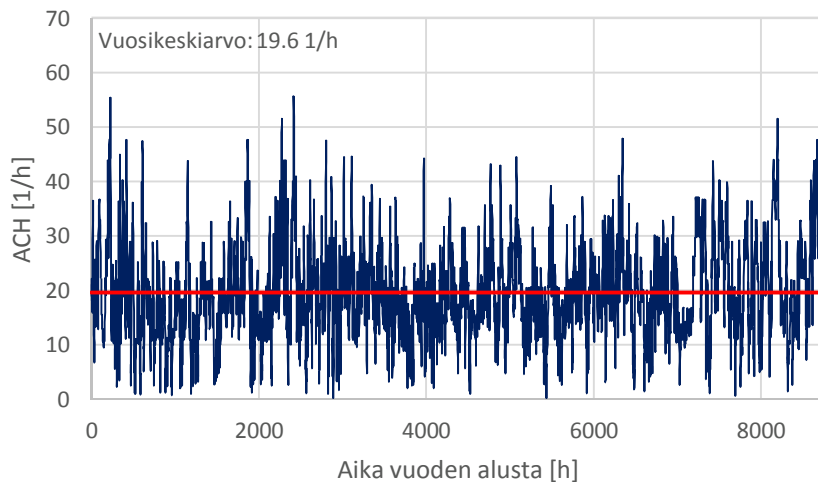
Kuva 3.17. Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuus 30 mm paksussa tiiliverhotussa tuuletusvä-
lissä. Seinä on eteläpuoleinen ja 3,0 m korkea. Tuuletusvälin yläpää on kokonaan
avoin.



Kuva 3.18. Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuus 30 mm paksussa tiiliverhotussa tuuletusvä-
lissä. Seinä on pohjoispuoleinen ja 3,0 m korkea. Tuuletusvälin yläpää on kokonaan
avoin.



Kuva 3.19. Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuus 40 mm paksussa tiilverhotussa tuuletusvälissä. Seinä on eteläpuoleinen ja 3,0 m korkea. Tuuletusvälin yläpää on kokonaan avoin.



Kuva 3.20. Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuus 40 mm paksussa tiilverhotussa tuuletusvälissä. Seinä on pohjoispuoleinen ja 3,0 m korkea. Tuuletusvälin yläpää on kokonaan avoin.

Tuuletusvälin korkeus vaikuttaa tiilverhotussa tuuletusvälissä vastaavasti kuin puuverhotussa tuuletusvälissä, jossa matalammalla seinällä ilmanvaihtuvuudet ovat korkeampaan seinään verrattuna suurempia. Tuuletusvälin paksuuden lisääminen sen sijaan pienentää ilmanvaihtuvuutta toisin kuin puuverhotussa tuuletusvälissä. Tämä johtuu siitä, että 30 mm ja 40 mm paksuissa tuuletusväleissä ilman tilavuusvirrat pysyvät lähes samoina, koska tuuletusvälin alapään virtausaukot ovat tuuletusvälin paksuudesta riippumatta samat. Tällöin paksuimmassa tuuletusvälissä ilmavirran nopeus on pienempi kuin ohuemmassa tuuletusvälissä. Ilmansuunnan vaikutus oli puuverhottujen seinien tapaukseen verrattuna vähäisempi ilmanvaihtuvuuksien ollessa vuosikeskiarvon tasolla lähellä toisiaan etelä- ja pohjoisseinillä.

Kirjallisuuteen verrattuna ilmanvaihtuvuudet ovat tässä tutkimuksessa suurempia, koska yläpään ilmavirtausaukko on kokonaan avoin. Kirjallisuustutkimuksissa on käytetty enimmäkseen sekä tuuletusvälin ala- että yläpäässä ilmavirtauksen aukkoina avoimia tiilisaumoja, jotka hidastavat ilmavirtaa kokonaan avoimeen aukkoon verrattuna.

Taulukkoon 3.5 on koottu tiiliverhouksen takana olevien ilmanvaihtuvuuksien vuosikeskiarvot etelä- ja pohjoisseinillä eri seinän korkeuksilla ja tuuletusvälin paksuuksilla.

Taulukko 3.5. Kooste ilmanvaihtuvuuksien vuosikeskiarvoista tiiliverhouksen takana olevissa tuuletusväleissä.

Tiiliverhous	Eteläseinä		Pohjoisseinä	
	3 m	6 m	3 m	6 m
Seinän korkeus				
Tuuletusvälin paksuus				
30 mm	27.4 1/h	16.1 1/h	26.0 1/h	14.5 1/h
40 mm	20.7 1/h	12.2 1/h	19.6 1/h	11.0 1/h

3.5 Ilmakehän pitkäaaltoinen säteily

3.5.1 Yleistä ilmakehän pitkäaaltoisesta säteilystä

Suurin osa maapallolla tapahtuvasta energiansiirrosta ilmaston ja koko universumin kanssa tapahtuu säteilyllä. Täten säteilyn eri komponenttien ymmärtäminen on tärkeää. Säteilyn komponentit ilmakehässä voidaan jakaa aallonpituuden mukaan lyhytaaltoiseen (auringosta peräisin oleva säteily) ja pitkäaaltoiseen säteilyyn (maanpinnan lämpöolosuhteista peräisin oleva säteily). Ilmakehää käsitellään säteilyä absorboivana ja emittoivana väliaineena. Kun säteilyä kulkee ilmakehän läpi, osa siitä absorboituu väliaineeseen ja näin säteily heikkenee. Samaan aikaan tämä säteily aiheuttaa ilmakehän molekyyliissä värähtelyä, jonka seurauksena emittoituu pitkäaaltoista säteilyä. Myös maanpinta toimii säteilyä absorboivana ja emittoivana väliaineena. (Viúdez-Mora 2011)

Pintojen energiatasapaino käsittää kolme pinnasta ilmakehään siirtyvää lämpövirtaa: vapaa lämpö (johtuminen ja konvektio), latentti lämpö (aiheutuu aineen, kuten veden, olomuodon muutoksen yhteydessä aineen lämpötilan pysyessä vakiona) ja lämpösäteily. Ilmakehä absorboi kaikista suunnista siihen kohdistuvaa lyhytaaltoista ja pitkäaaltoista säteilyä. Ilmakehä saavuttaa energiatasapainon emittoimalla pitkäaaltoista säteilyä sekä ilmakehän ulkopuolelle että maapallon pinnalle. (Viúdez-Mora 2011)

Ilmakehästä alaspäin suuntautuvalla pitkäaaltoisella säteilyllä on suhteellisen vähäinen vuosittainen vaihtelu, mutta se riippuu voimakkaasti pitkäaaltoista säteilyä emittoivista kaasusta ja pilvisyydestä ilmakehässä. Ilmakehä koostuu kahdenlaisesta kaasuryhmästä. Ensimmäinen ryhmä on muuttumattomat kaasut, joilla on lähes muuttumaton ja ho-

mogeeninen konsentraatio suurimmassa osassa ilmakehää. Tällaisia kaasuja ovat pääasiassa typpi, happi ja argon, joita on enemmän kuin 99,6 % ilmakehän tilavuudesta. Toisena ryhmänä ovat kaasut, joiden konsentraatiot muuttuvat ajan tai paikan mukaan. Tällaisia kaasuja ovat muun muassa vesihöyry ja otsoni, joiden pitoisuudet ilmakehässä voivat muuttua päivittäin tai vuodenaikojen mukaan. Myös metaanin ja hiilidioksidin pitoisuudet vaihtelevat, mutta vaihteluvälin skaala on vuosia tai vuosikymmeniä. Useimmat jälkimmäisen ryhmän kaasuista vaikuttavat ilmaston säteilytasapainoon, koska ne absorboivat ja emittoivat säteilyä aktiivisesti. Tämän lisäksi ilmakehässä olevat aerosolit ja pilvet ovat voimakkaasti ajasta ja paikasta riippuvia tekijöitä, jotka vaikuttavat säteilytasapainoon. (Viúdez-Mora 2011) Tarkastelupaikan korkeusasema vaikuttaa myös pitkäaaltoisen säteilyn määrään, sillä ilmakehän paksuus pienenee korkeammalle siirryttäessä (Flerchinger et al. 2009).

Ilmakehästä alaspäin suuntautuvaa pitkäaaltoista säteilyä, joka kohdistuu maanpinnalla vaakapinnalle, voidaan mitata muun muassa pyrgeometrillä. Pyrgeometrejä käytetään laajalti meteorologisissa ilmastotutkimuksissa. Kun mittausdataa pitkäaaltoisesta säteilystä ei ole saatavilla, voidaan sen määrää arvioida siihen kehitetyillä laskennallisilla menetelmillä. Useimmat laskennalliset mallit pitkäaaltoisen säteilyn määrälle käyttävät parametreina maan pinnalla mitattua ulkoilman lämpötilaa ja vesihöyryn osapainetta ulkoilmassa. Ilmakehää voidaan pitää ns. harmaana kappaleena, joten alaspäin tulevan pitkäaaltoisen säteilyn voimakkuus voidaan määrittellä kaavalla 3.17 (Viúdez-Mora 2011).

$$LW_{\downarrow} = \varepsilon_{sky} \sigma T_{sky}^4 \quad (3.17)$$

missä

LW_{\downarrow} on ilmakehästä alaspäin tulevan pitkäaaltoisen säteilyn intensiteetti [W/m^2]

ε_{sky} on ilmakehän emissiviteetti [-]

σ on Stefan-Boltzmann'n vakio ($5,67 \cdot 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$)

T_{sky} on ilmakehän tehollinen lämpötila [K].

Ilmakehän emissiviteettiä ja tehollista lämpötilaa on vaikea määrittää samanaikaisesti ilmakehän pystysuuntaisesta kerroksellisesta rakenteesta johtuen. Tämän takia parametrisointi tehdään usein maan pinnan korkeudelta mitatun lämpötilan ja vesihöyryn osapaineen avulla. (Viúdez-Mora 2011) Kaava 3.17 voidaan esittää seuraavasti (kaava 3.18):

$$LW_{\downarrow} = \varepsilon_{sky}(T_a, p_v, c) \sigma T_a^4 \quad (3.18)$$

missä

T_a on lämpötila mitattuna maan pinnan tasolla [K]

p_v on vesihöyryn osapaine ilmassa [Pa, hPa]
 c on pilvisyyskerroin [-].

Vesihöyryn osapaine ilmassa veden yli on laskettu tässä tutkimuksessa kaavalla 3.19 (Hyland & Wexler 1983). Pilvisyyskerroin määritellään luvussa 3.5.3.

$$\ln e = -0,58002206 \cdot 10^4 T^{-1} + 0,13914993 \cdot 10 - 0,48640239 \cdot 10^{-1} T + 0,41764768 \cdot 10^{-4} T^2 - 0,14452093 \cdot 10^{-7} T^3 + 0,65459673 \cdot 10 \ln T \quad (3.19)$$

3.5.2 Ilmakehästä alaspäin suuntautuvan pitkäaaltoisen säteilyn määrittäminen

Erilaisilla mittausmenetelmillä saadaan erilaisia lausekkeita pitkäaaltoisen säteilyn arvioimiseksi lämpötilan ja vesihöyryn osapaineen perusteella (Viúdez-Mora 2011). Pyrgeometrilla mittauksen tarkkuus on noin ± 10 % (Iziomon et al. 2003, Niemelä et al. 2001, Venäläinen et al. 1998, Wallentén 2010). Sekä ilmakehän vaihtelevista ominaisuuksista että rajallisesta mittaustarkkuudesta johtuen täysin yksiselitteisiä pitkäaaltoisen säteilyn määriä ei voida määrittää. Arviot ovat kuitenkin tyydyttäviä mitattuihin tuloksiin nähden vähintään siellä, missä lauseke on kehitetty. Tulokset ovat myös melko hyviä eri maantieteellisissä sijainneissa (Iziomon et al. 2003).

Kirjallisuudesta löytyy paljon eri parametrisointeja kirkkaan (pilvettömän) taivaan emissiviteeteille: Flerchinger et al. 2009; Gliash et al. 2011; Iziomon et al. 2003; Li et al. 2017; Mendoza et al. 2017; Mundt-Petersen & Wallentén 2014; Niemelä et al. 2001; Wallentén 2010. Seuraavaksi arvioidaan kirkkaan taivaan emissiviteettien, $\varepsilon_{sky,clr}$, lausekkeita.

Koska pitkäaaltoisen säteilyn määrään vaikuttaa maantieteellinen sijainti ja ilmasto, tarkastellaan lausekkeita, jotka on määritetty maantieteellisesti lähellä Suomea sekä Suomen ilmastoa vastaavissa olosuhteissa. Ilmassa olevan vesihöyryn osapaineen, p_v , yksikkö lausekkeissa on hPa ja lämpötilan, T_a , yksikkö on K.

Venäläinen et al. (1999) ovat käyttäneet Suomessa tehdyssä tutkimuksessa Brutsaertin kehittämää kaavaa kaavan 3.28 mukaisilla parametreilla.

$$\varepsilon_{sky,clr} = 1,28 \left(\frac{p_v}{T_a} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (3.28)$$

Niemelä et al. (2001) ovat tehneet mittauksia Sodankylässä ja ehdottaneet kaavan 3.29 mukaista parametrisointia.

$$\varepsilon_{sky,clr} = \begin{cases} 0,72 + 0,009(p_v - 2), & \text{kun } p_v \geq 2 \\ 0,72 - 0,079(p_v - 2), & \text{kun } p_v < 2 \end{cases} \quad (3.29)$$

Lähteessä Wallentén (2010) viitatus ja Ruotsissa tehdyssä tutkimuksessa käytetty Ångströmin lauseke on kaavan 3.30 mukainen.

$$\varepsilon_{sky,clr} = 0,83 - 0,18 \cdot 10^{-0,067p_v} \quad (3.30)$$

Lisäksi edellä mainitussa lähteessä viitattu Dilley & O'Brienin kaavaa taivaalta tulevalle pitkäaaltoiselle säteilylle kirkkaalle taivaalle on kaavan 3.31 mukainen.

$$LW_{\downarrow,clear} = 59,38 + 113,7 \left(\frac{T_a}{273,16} \right)^6 + 96,96 \sqrt{\frac{w}{25}} \quad (3.31)$$

missä

$$w = 465 \frac{p_v}{T_a} \quad (3.32)$$

Mundt-Petersen & Wallentén (2014) ovat käyttäneet taivaan emissiviteetille kaavaa 3.33 perustuen Ruotsissa tehtyihin tutkimuksiin, joita on esitetty lähteessä Wallentén (2010). Tämän tutkimuksen mukaan kaava 3.33 antaa Ruotsissa tarkimmat tulokset vertailuista parametrisoinneista. Kaava 3.33 ottaa huomioon myös pilvisyyden vaikutuksen.

$$\varepsilon_{sky} = 1,5357 + 0,5981 \left(\frac{T_d}{100} \right) - 0,5687 \left(\frac{T_a}{273,15} \right) - 0,2799K_t \quad (3.33)$$

missä

T_d on kastepistelämpötila [°C]

K_t on selkeysindeksi (engl. clearness index) (ks. luku 3.5.3) [-].

3.5.3 Pilvisyyden vaikutus

Pilvisyyden vaikutuksesta ilmakehästä alaspäin tulevaan pitkäaaltoisen säteilyn määrään löytyy tutkimuksia kirjallisuudesta. Pilvisyys voidaan ottaa huomioon pilvisyyskertoimen, c [-], avulla, joka saa arvoja väliltä 0-1. Arvo 1 vastaa täysin pilvistä ja arvo 0 täysin kirkasta taivasta (Flerchinger et al. 2009).

Pilvisyyskertoimen määrittystä varten määritetään K_t (engl. clearness index) [-], joka on auringon kokonaissäteilyn (globaalin säteilyn) suhde ilmakehän ulkopuolelle tulevaan auringonsäteilyyn. Se voidaan laskea lähteen Lam & Li (1996) mukaan kaavalla 3.20.

$$K_t = \frac{I_{glob}}{I_0} \quad (3.20)$$

missä

I_{glob} on vaakapinnalle tuleva auringon globaali säteily [W/m^2]

I_0 on vaakapinnalle tuleva auringonsäteily, jossa ei ole mukana ilmakehän vaikutusta [W/m^2].

Vaakapinnalle tuleva auringon globaali säteily saadaan tässä tutkimuksessa käytettävissä olevasta sääaineistosta. Tunnittainen I_0 :n arvo voidaan laskea lähteen Lam & Li (1996) mukaan kaavalla 3.21.

$$I_0 = rI_{sc}(\cos L \cos \delta \cos \omega + \sin L \sin \delta) \quad (3.21)$$

missä

r on eksentrisyyden huomioon ottava kerroin [-]

I_{sc} on aurinkovakio ($1367 \text{ Wh}/m^2$)

L on leveyspiiri [$^\circ$]

δ on auringon deklinaatiokulma [$^\circ$]

ω on auringon tuntikulma [$^\circ$].

Eksentrisyyden huomioon ottava kerroin voidaan määrittää kaavalla 3.22 (Almorox & Hontoria 2004).

$$r = 1,00011 + 0,034221 \cos \Gamma + 0,00128 \sin \Gamma + 0,000719 \cos 2\Gamma + 0,000077 \sin 2\Gamma \quad (3.22)$$

missä

Γ on päiväkulma [rad].

Päiväkulma voidaan määrittää kaavalla 3.23.

$$\Gamma = \frac{2\pi(n-1)}{365} \quad (3.23)$$

missä

n on päivän järjestysnumero (1. tammikuuta $n = 1$).

Auringon deklinaatiokulma lasketaan kaavalla 3.24 (PVEducation 2018, kaavaa muokattu vastaamaan tunnin aika-askeleita).

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{8760} \cdot (t - 1944)\right) \quad (3.24)$$

missä

t on aika-askel tunteina [h].

Auringon tuntikulma lasketaan kaavalla 3.25 (Solar Resource Assessment and Economics 2018).

$$\omega = 15(LST - 12) \quad (3.25)$$

missä

LST on aurinkoaika (eng. local solar time) [h].

Aurinkoaika voidaan määrittää kaavalla 3.26 (Kharseh 2018).

$$LST = CL + \frac{4(L_{std} - L_{loc}) + E}{60} \quad (3.26)$$

missä

CL on kellonaika [h]

L_{std} on aikavyöhykkeen keskikohdan pituuspiiri (eng. standard meridian) [°]

L_{loc} on pituuspiiri [°]

E on ajan lauseke (engl. equation of time) [min].

E lasketaan kaavalla 3.27.

$$E = 229,2(0,000075 + 0,001868 \cos \Gamma - 0,032077 \sin \Gamma + \\ -0,014615 \cos 2\Gamma - 0,04089 \sin 2\Gamma) \quad (3.27)$$

Tässä tutkimuksessa käytettävästä sääaineistosta ei tiedetty globaalin auringonsäteilyn mittausajankohtaa tarkasti, joten aurinkoajasta on vähennetty puoli tuntia, jotta globaalin auringonsäteilyn ja ilmakehän ulkopuolisen säteilyn kuvaajat olivat symmetrisesti toisiinsa nähden. Koska auringonsäteilyä tulee vain päivällä, täytyi yön pilvisyyttä arvioida päivällä mitattujen arvojen perusteella. Tässä tutkimuksessa on käytetty aamupäivän ja iltapäivän keskiarvoja ja lineaarisesti interpoloitu koko vuorokauden arvot näiden arvojen perusteella (laskennan suoritti Anssi Laukkarinen). Keskiarvojen määrittämisessä käytettiin globaalin säteilyn arvoja, jotka ylittivät arvon 20 W/m².

Flerchinger et al. (2009) mukaan pilvisyysskerrointa voidaan arvioida K_t :n avulla. Pilvisyysskerroin $c = 0$, kun $K_t \geq k_{clr}$ ja $c = 1$, kun $K_t \leq k_{cld}$. Pilvisyysskerroimen arvot ylä- ja alarajan välillä voidaan interpoloida lineaarisesti. Optimaalisia arvoja k_{clr} :lle ja k_{cld} :lle ei tiedetä tarkasti ja ne voivat riippua esimerkiksi maantieteellisestä sijainnista. Tyypillisesti k_{clr} on saanut arvoja väliltä 0,20-0,40 ja vastaavasti k_{cld} väliltä 0,60-1,00. Flerchinger et al. (2009) mukaan arvot $k_{clr} = 0,8$ ja $k_{cld} = 0,25$ ovat vastanneet hyvin mittaustuloksia. Wallentén (2010) on käyttänyt samoja arvoja pitkäaaltosen säteilyn arvioimisessa. Myös tässä tutkimuksessa käytettiin edellä mainittuja arvoja.

Pilvisyyserroin otetaan huomioon ilmakehän emissiviteetin laskennassa parametrina. Lähteessä Flerchinger et al. (2009) on esitetty ilmakehän emissiviteettien eri parametrisointeja, jotka voidaan esittää kaavan 3.34 muodossa.

$$\varepsilon_{sky} = \varepsilon_{sky}(\varepsilon_{sky,clear}, c) \quad (3.34)$$

Tässä tutkimuksessa tarkasteltaviksi parametrisoinneiksi on valittu lähteessä Flerchinger et al. (2009) esitettyä Brutsaertin pilvisyyden korjausalgoritmia sekä Niemelä et al. (2001) Suomessa kehittämää pilvisyyden korjausalgoritmia. Brutsaertin pilvisyydenkorjaus on esitetty kaavassa 3.35 ja lähteestä Niemelä et al. (2001) muokattu pilvisyydenkorjaus kaavassa 3.36. Lähteen Niemelä et al. (2001) kaava on muokattu vastaamaan ilmakehän emissiviteettiä ilmakehästä alaspäin tulevan pitkäaaltoisen säteilyn intensiteetin sijaan. Lisäksi alkuperäisessä kaavassa olevan pintalämpötilan sijaan on käytetty ulkoilman lämpötilaa.

$$\varepsilon_{sky} = (1 + 0,22c^2)\varepsilon_{sky,clear} \quad (3.35)$$

$$\varepsilon_{sky} = \left[1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_{sky,clear}} - 1 \right) 0,87c^{3,49} \right] \varepsilon_{sky,clear} \quad (3.36)$$

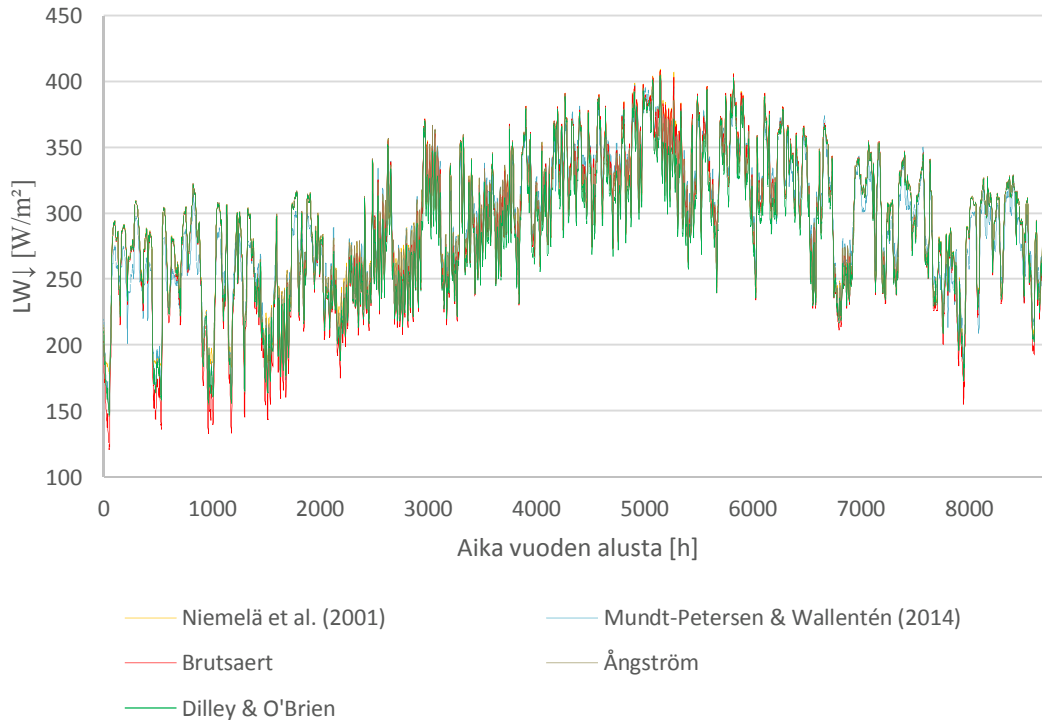
Niemelä et al. (2001) arvioivat myös muita lähteessä Flerchinger et al. (2009) esitettyjä kaavoja todeten niiden aliarvioivan pitkäaaltoista säteilyä lämpimämmissä ilmastoissa. Mallit oli määritetty ilmastossa, jossa lämpötilat olivat melko kylmiä (-29...+4 °C).

Edellä esitetyistä kaavoista (3.35 ja 3.36) kaava 3.36 tuottaa hieman alhaisempia pitkäaaltoisen säteilyn määriä, joten sitä on käytetty tässä tutkimuksessa pilvisyyden vaikutuksen arvioimisessa. Alhaisemmat pitkäaaltoisen säteilyn määrät ilmakehästä rakennukseen ovat kriittisempiä rakenteiden rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa, koska tällöin suurempi rakenteesta lähtevä nettosäteily lisää olosuhteiden kriittisyyttä rakenteissa.

3.5.4 Ilmakehästä alaspäin suuntautuvan pitkäaaltoisen säteilyn määrä

Kuvassa 3.21 on esitetty ilmakehästä alaspäin suuntautuvat eri parametrisointien tuottamat pitkäaaltoisen säteilyn määrät Jokioisen vuoden 2004 sääaineistolla. Kuvasta nähdään, että kaikki viisi tarkasteltavaa mallia tuottavat hyvin samanlaisia tuloksia, jolloin kuvassa olevat käyrät ovat suurimmaksi osaksi päällekkäin. Koska kaikki mallit on määritetty Suomen ilmastoa vastaavissa olosuhteissa ja maantieteellisesti lähellä Suomea, voidaan mallien tuottamia pitkäaaltoisen säteilyn määriä käyttää tämän tutkimuksen tarkoituksessa. Kirjallisuuden tutkimusten perusteella pitkäaaltoisen säteilyn määrät ovat luokkaa 200–400 W/m² (Iziomon et al. (2003); Li et al. (2017); Wallentén (2010)). Saadut tulokset pitkäaaltoisen säteilyn parametrisoinneista osuvat pääosin tuolle välille.

Tässä tutkimuksessa oletusmalliksi pitkäaaltoiselle säteilylle kirkkaalle taivaalle on käytetty Brutsaertin mallia (kaava 3.28) ja pilvisuyskorjaukselle kaavan 3.36 mukaista lauseketta.



Kuva 3.21. Ilmakehästä alaspäin suuntautuvan pitkäaaltoisen säteilyn määrä eri parametrisoinneilla Jokioisen vuoden 2004 sääaineistolla.

3.6 Ilmavuototapausten tulosten esittäminen

Ilmavuototapausten tulosten havainnollistamiseksi tulokset esitettiin vuoden keskimääräisen ilmanvuotoluvun, $\overline{q_{50}}$ -luvun [$\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$], avulla. Sillä kuvataan rakennusvaipan vuotoilmavirran määrää keskimäärin 50 Pa paine-erolla rakennusvaipan pinta-alaa ja tuntia kohden. Tuloksia pyrittiin tällä tavoin vertailemaan ilmanvuotolukuun q_{50} , vaikka se ei täysin vastaa sitä. Ympäristöministeriön asetuksen 1010/2017 mukaan rakennuksen vaipan ilmanvuotoluku (q_{50}) voi olla enintään $4,0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$.

Rakennuksen ilmanvuotolukua voidaan arvioida ilmanvuotokäyrän avulla kaavan 3.37 mukaisesti.

$$q_{\Delta pr} = C_L(\Delta p_r)^n \quad (3.37)$$

missä

$q_{\Delta pr}$ on ilmanvuotoluku tietyllä paine-erolla [$\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$]

C_L on ilmanvuotokerroin [$\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Pa}^n)$]

Δp_r on paine-ero rakennuksen sisä- ja ulkoilman välillä [Pa]

n on virtauksesta johtuva eksponentti, joka vaihtelee 0,5:n ja 1,0:n välissä (tässä on käytetty arvoa 0,65 lähteen Kauppinen (2011) mukaan).

Ennen kuin $\overline{q_{50}}$ -luku voidaan määrittää täytyy ensin määrittää tässä tutkimuksessa käytetyillä paine-eroilla raosta rakenteeseen siirtyvän ilmamäärän vuosikeskiarvo. Tätä kuvaa $\overline{q_p}$ -luku [$\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$]. Delphin 5.8.3-ohjelman tulosdatana saatiin konvektiolla raosta kulkeva vesihöyryn määrä aikayksikköä kohden, josta laskettiin seinän pinta-alaa ja tuntia kohden siirtyvä vesihöyryn määrä, g_{cv} [$\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$]. Vesihöyryn määrä massan yksikössä muutettiin vastaamaan ilmamäärän tilavuuden yksikköä kaavalla 3.38, jossa oletettiin, että raon kautta siirtyvän ilman vesihöyrypitoisuus vastaa sisäilman vesihöyrypitoisuutta.

$$q_p = \frac{g_{cv}}{v_i} \quad (3.38)$$

missä

q_p on raon kautta rakenteeseen kulkeva tunnitainen ilmavuotomäärä tässä tutkimuksessa käytetyillä ilmanpaine-eroilla (ks. liite 1) [$\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$]

v_i on sisäilman vesihöyrypitoisuus [g/m^3].

Ilmavuotomäärän positiivinen vuosikeskiarvo, $\overline{q_p}$, kuvaa sisäilmasta rakenteeseen siirtyvän ilmamäärän vuosikeskiarvoa.

Nyt $\overline{q_{50}}$ voidaan ratkaista yhtälöparista kaavasta 3.39.

$$\begin{cases} \overline{q_{50}} = C_L(\Delta p_{50})^n \\ \overline{q_p} = C_L(\Delta p_p)^n \end{cases} \quad (3.39)$$

missä

Δp_{50} on 50 Pa

Δp_p on tässä tutkimuksessa käytettyjen paine-erojen vuosikeskiarvo (liite 1).

4 PUURUNKOISTEN ULKOSEINÄRAKENTEIDEN KOSTEUSTEKNINEN TOIMINTA, TARKASTELTAVAT RAKENNETYYPIIT JA LASKENTAMALLIT

4.1 Kosteus seinärakenteessa

Seinärakenteen kosteus voi olla peräisin useista lähteistä kuten ulko- ja sisäilman sisältämästä vesihöyrystä, sadevedestä tai maaperän kosteudesta. Kun tarkastellaan ulkoseinän rakennetyypin toimivuutta lämpö- ja kosteusteknisesti, riittää yleensä, että kosteuslähteistä otetaan huomioon ulko- ja sisäilman sisältämä kosteus sekä viistosateen aiheuttama kosteusrasitus julkisivuun.

Kosteusvaurio seinärakenteessa voi johtua muun muassa valuvan veden pääsystä rakenteeseen, jolloin rakenteen suojaaminen voidaan tehdä kahdella tavalla: suojataan rakenteelta kosteudelta rakenteellisesti kosteuden kulkeutumista estävällä kerroksella tai poistetaan kosteuslähde, joka aiheuttaa rasitusta rakenteelle. (Vinha & Käkelä 1999) Kosteusvaurio voi syntyä myös rakenteeseen pelkästään ulko- ja sisäilman olosuhteiden lisäessä kosteusrasitusta, jolloin rakennekerrosten pinnoille on mahdollista tiivistyä kosteutta, jos vesihöyryn kyllästyspitoisuus ylittyy.

Rakennuksen sisäilman sisältämä vesihöyrypitoisuus riippuu ulkoilman vesihöyrypitoisuudesta. Sen lisäksi normaali rakennuksen käyttö ja asuminen aiheuttavat kosteuslisän sisäilmaan ulkoilman olosuhteisiin verrattuna. Kosteusvirta rakennuksen sisäilman ja ulkoilman välillä voi lisätä rakenteeseen kohdistuvaa kosteusrasitusta. Ilmastonmuutoksen myötä ulkoilman lämmitessä ja vesihöyrypitoisuuden kasvaessa tarvitaan yhä enemmän tutkimustietoa rakennetyyppien yksilöllisistä eroista kosteusteknisen toimivuuden varmistamiseksi.

4.2 Rakennekerrosten vaikutus seinärakenteen lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan

Puurunkoisissa vaipparakenteissa rakenteen sisäpintaan tulee laittaa tiivis ilmansulkukerros sekä riittävä höyrynsulkukerros (Vinha & Käkelä 1999). Ilmansulkukerros vähentää sisäilmasta konvektiolla rakenteeseen siirtyvää kosteutta. Höyrynsulkukerros puolestaan vähentää diffuusiolla siirtyvän kosteuden kulkeutumista rakenteeseen. Ulko-

seinärakenteen ulko-osassa oleva tuulensuojakerros vähentää tuulen aiheuttaman lämmöneristekerroksen lämmönvastusta heikentävää konvektiota rakenteessa.

Ilman- ja höyrinsulkukerrostojen luotettavan toiminnan varmistamiseksi niissä ei saa olla reikiä tai rakoja. Tästä syystä rakenteiden liittymäkohdat ja saumakohdat ovat kriittisiä rakenteen toiminnan kannalta. Rakennuksen sisäilman ylipainetilanne aiheuttaa rakojen tai reikien kautta vesihöyryn siirtymistä rakenteeseen konvektiolla, jolla vesihöyryä voi siirtyä paljon enemmän kuin pelkästään diffuusiolla. (Vinha & Käkälä 1999) Ylipainetilanteita rakennusten yläosiin aiheutuu jo pelkästään lämpötilaeroista ulko- ja sisäilman välillä, vaikka rakennuksen ilmanvaihto olisi asetettu tasapainoiseksi tai hieman alipainoiseksi.

Rakennuksen ilmatiiviuden varmistaminen rakenteen sisäpinnan höyrinsulkukerroksella edellyttää huolellista asennustyötä. Sisäpuolisen ilmatiiviin kerroksen asennuksessa on paljon saumattavia liittymäkohtia, kuten välipohjien liittymät ja sähköasennusten vaatimat lävistykset. (Langmans et al. 2012) Sisäpuolinen lisäkoolaus tuo höyrinsulkukerroksen sisäpuolelle asennustilan sähköasennuksia varten, jolloin niitä varten tehtyjen höyrinsulkua lävistävien liitosten määrä vähenee.

Suomalaisessa ilmastossa rakenteen ilma- ja vesihöyrytiivis kerros sijoitetaan lämmöneristekerroksen sisäpuolelle. Rakenteen ulko-osassa oleva tuulensuojakerros ei puolestaan täytä yleensä ilmatiiviin rakennekerroksen kriteerejä, jos saumakohtia ei tiivistetä. Ilmatiiviin rakennekerroksen sijoittaminen lähelle rakenteen ulkopintaa vähentää kriittisten liitoskohtien määrää rakenteen sisäpuoliseen asennukseen verrattuna. Tällaisen rakenteen lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa ovat tutkineet muun muassa Langmans et al (2012) Belgian ja Watt et al. (2015) Etelä-Ruotsin ilmastoissa. Aiemmissä tutkimuksissa on havaittu, että ulkopuolisella ilmansulkukerroksella voidaan päästä riittävään ilmanpitävyyteen, kuten sisäpuolisellakin ilmansulkukerroksella. Tätä on tutkittu muun muassa lähteessä Langmans et al. (2010).

Langmans et al. (2012) mukaan ilmatiiviin kerroksen siirtäminen lähelle rakenteen ulkopintaa aiheuttaa kosteusvaurion riskin, jos sisäpuolinen ilmatiiviys ei ole riittävä. Koikeellisissa laboratorio-olosuhteissa tehdyssä tutkimuksessa sisäpuolisen vesihöyryn diffuusiota hidastavan kerroksen (15 mm OSB-levy) ylä- ja alaosiin jätettiin raot, jotta rakennekerros ei olisi ilmatiivis. Tuulensuojakerroksena käytettiin ilmanläpäisevyydeltään erilaisia kuitulevyjä ja ilmanpitävää kalvoa. Tutkimuksessa sisäisen konvektion aiheuttama ilmavirran liike kerrytti rakojen kautta konvektiolla siirtyvää kosteutta rakenteen ulko-osiin talven olosuhteissa. Käytännön rakennuskohteissa myös esimerkiksi mineraalivillan löyhä asennus kasvattaa sisäisen konvektion määrää (Langmans & Roels 2015b). Ilmaa läpäisevämpi kuitulevy aiheutti myös pakotetun konvektion aiheuttamaa kosteuden kertymistä rakenteeseen enemmän kuin ilmaa pitävimmillä tuulensuojakerroksilla. Myös Langmans et al. (2010) ovat havainneet, että tuulensuojakerroksen ilma-

tiiviyttä parantamalla pakotetun konvektion aiheuttama kosteuden tunkeutuminen sisäilmasta rakenteeseen vähenee.

Watt et al. (2015) ovat tutkineet puurunkoisen ulkoseinärakenteen toimivuutta homeen kasvun kannalta laskennallisesti ja havainneet myös rakojen aiheuttavan kosteuden kertymistä rakenteen ulkopinnan läheisyyteen talviaikana, jolloin kosteuslisä ja lämpötilaero ulkoilmaan nähden ovat suurimmillaan. Tutkittu rakenne vastasi Langmans et al. (2012) tekemän tutkimuksen seinärakennetta, jossa seinän ylä- ja alaosissa oli ilmavuo- tokohdat rakenteeseen. Talvella lämpötilat olivat kuitenkin tutkimuksen mukaan homeen kasvulle liian alhaisia. Edellisissä tutkimuksissa ilmasto-olosuhteet eivät kuitenkaan vastanneet Suomessa vallitsevia olosuhteita, jossa suhteellinen kosteus on talviaikana erittäin korkea, jolloin sisäilmasta tuleva kosteusrasitus on vielä haitallisempaa rakenteen ulko-osien lämpö- ja kosteusteknisen toimivuuden kannalta.

Kuten edellä mainituissa tutkimuksissa on havaittu, on sisäisellä konvektiolla vaikutusta kosteuden jakautumiseen ulkoseinärakenteissa. Sisäinen konvektio lisää kosteusrasitusta seinärakenteen yläosassa. Tästä johtuen myös Langmans et al. (2013) mukaan nosteen aiheuttama ilman liike on syytä ottaa huomioon arvioitaessa rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa. Lisäksi heidän mukaansa laskennallisissa tarkasteluissa on tärkeää tuntea materiaaliominaisuudet etenkin korkeiden suhteellisten kosteuksien alueella, jotta kosteuden jakautumista rakenteessa voitaisiin arvioida tarkemmin.

Mundt-Petersen (2015) on puolestaan havainnut, että viistosade voi aiheuttaa vuotojen takia veden tunkeutumista seinärakenteeseen. Myöhemmissä tutkimuksissa on selvitetävää, miten nämä vuodot otetaan huomioon laskentatarkasteluissa. Kriittisiä kohtia, joissa on havaittu kosteusvaurioita, ovat erityisesti rakennusten nurkat ja muut liittymäkohdat.

Puurunkoisissa ulkoseinärakenteissa käytetään pääsääntöisesti kolmeen eri ryhmään kuuluvia lämmöneristeitä: mineraalipohjaiset eristeet (lasivilla, kivivilla), hygroskoopiset luonnonkuitueristeet (puukuitueriste) ja polymeerieristeet (polyuretaani, polystyreeni). Käytettäessä riittävää ilman- ja höyrynsulkua rakenteen sisäpinnassa sekä riittävän diffuusioavointa tuulensuojakerrosta, kaikilla eristetyypeillä voidaan saavuttaa kosteusteknisesti toimivat rakenteet (Vinha & Käkälä 1999). Rakennusmateriaalien rakennusfysikaalisia ominaisuuksia on esitetty tarkemmin muun muassa lähteissä Laine (2010) ja RIL 255-1-2014.

Pihelo et al. (2016) ovat tutkineet laskennallisesti paksultti eristettyjen puurunkoisten seinärakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa. He ovat havainneet tuulensuojan lämmönvastuksen ja vesihöyrynläpäisevyyden vaikuttavan merkittävästi rakenteiden homekasvun riskiin lämmöneristekerroksen ja tuulensuojakerroksen välisessä rajapinnassa. Laskentavuotena käytettiin Viron referenssivuotta ja homeen kasvun indikaattorina Suomalaista homemallia. Tutkimuksessa vertailtiin mineraalivillan ja puukuitueris-

teen toimintaa rakenteissa. Puukuitueriste osoittautui tutkimuksessa käytetyissä olosuhteissa vähentävän homeen kasvun riskiä mineraalivillaan verrattuna. Tämä johtui pääasiassa puukuitueristeen suuremmasta kosteuskapasiteetista, joka hidasti suhteellisen kosteuden kasvua eristekerroksessa.

Pihelo & Kalamees (2016) mukaan puukuitueristeen suuri kosteudensitomiskyky ei ole pelkästään hyvä asia. Jos kosteutta kertyy rakenteeseen paljon, rakenne pysyy kosteampana pidempään kuivumisaikojen ollessa pitkiä. Kuivumisajat kasvavat myös, mikäli seinärakenteen eristepaksuutta kasvatetaan. He ovat havainneet Viron ilmastossa, että tuulensuojalevynä käytettävän kipsilevyn lämmönvastus ei ole välttämättä riittävä ehkäisemään homeen kasvua ulkoseinärakenteessa, jolloin tuulensuojakipsilevyn ulkopintaan tarvitaan lisälämmöneristekerros.

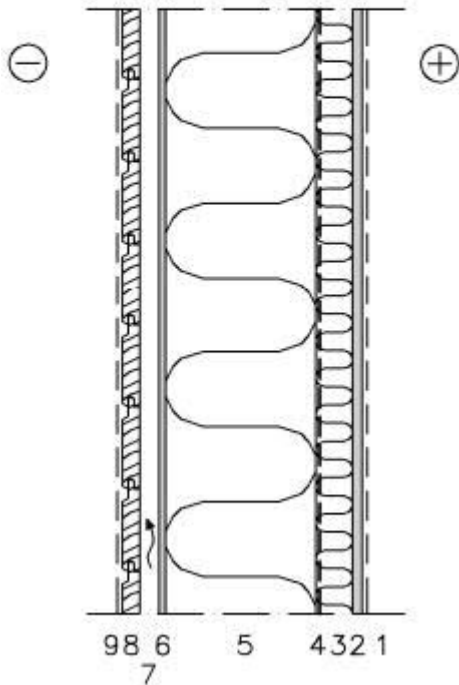
Rakenteen turvallisen toiminnan kannalta on tärkeää riittävän kuivumisen mahdollistaminen. Julkisivun takana olevan tuuletusvälin tarkoituksena on poistaa rakenteesta poistuvaa kosteutta. Tuulensuojalevyn on myös oltava riittävän diffuusioavoin, jotta rakenteessa oleva kosteus pääsee tuuletusväliin. (Vinha & Käkelä 1999) Myös rakentamisen aikaisen kosteuden poistumisen on oltava mahdollista. Varsinkin paksultti eristettyjen rakenteiden osalta lisääntynyt kosteusmäärä rakenteissa lisää homehtumisriskiä (Pihelo et al. 2016).

4.3 Tarkasteltavat rakennetyypit

Tämän tutkimuksen tarkasteltavat rakennetyypit voidaan jakaa kahteen pääluokkaan: puuverhoiltuihin ja tiiliverhoiltuihin rakennetyyppeihin. Molemmista seinärakennetyypeistä on tehty ns. perustapaukset, joista tehtiin erilaisia variaatioita muuttamalla vähintään yhtä rakennekerrosta. Näin saatiin tarkasteltua eri rakennekerrosten muutosten vaikutusta homeindeksien maksimiarvoihin. Rakennetyypin U-arvoa on varioitu eristekerroksen paksuudella. Perusrakennetyypit on esitetty kuvissa 4.1 ja 4.2. Ulkoverhouslaidan paksuus on 23 mm ja tuuletusvälin paksuus 25 mm, mikäli muuta ei ole mainittu.

USP1

1:10



	1 PINTAKÄSITTELY
13 mm	2 SISÄVERHOUSLEVY, KIPSILEVY (C1)
48 mm	3 LÄMMÖNERISTE, MINERAALIVILLA (D1), $\lambda = 0.035$, PYSTYKOO LAUS (C13), 48x48 mm, k600
0.2 mm	4 HÖYRYNSULKUMUOVI (C11)
198 mm	5 LÄMMÖNERISTE, MINERAALIVILLA (D1), $\lambda = 0.035$, KANTAVA RUNKO (C13), 48x198 mm, k600
9 mm	6 TUULENSUOJALEVY, KIPSILEVY (A1)
25 mm	7 TUULETUSVÄLI, PYSTYKOO LAUS (C13), 25x100 mm, k600
23 mm	8 JULKISIVUPANEELI (C13)
	9 PINTAKÄSITTELY

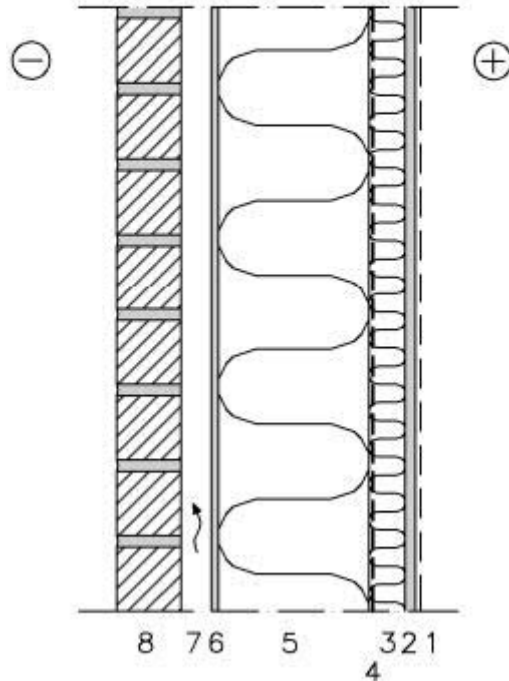
U-arvo

0.16 W/(m²K)

Kuva 4.1. Puuverhoiltujen rakennetyyppien perustapaus. Suluissa oleva tunnus viittaa materiaaliominaisuuksiin liitteessä 2.

UST1

1:10



	1 PINTAKÄSITTELY
13 mm	2 SISÄVERHOUSLEVY, KIPSILEVY (C1)
48 mm	3 LÄMMÖNERISTE, MINERAALIVILLA (D1), $\lambda = 0.035$, PYSTYKOOLAUS (C13), 48x48 mm, k600
0.2 mm	4 HÖYRYNSULKUMUOVI (C11)
198 mm	5 LÄMMÖNERISTE, MINERAALIVILLA (D1), $\lambda = 0.035$, KANTAVA RUNKO (C13), 48x198 mm, k600
9 mm	6 TUULENSUOJALEVY, KIPSILEVY (A1)
40 mm	7 TUULETUSVÄLI
85 mm	8 TIILIVERHOUS (Normal Brick)

U-arvo 0.16 W/(m²K)

Kuva 4.2. Tiiliverhoiltujen rakennetyyppien perustapaus. Suluisissa oleva tunnus viittaa materiaaliominaisuuksiin liitteessä 2.

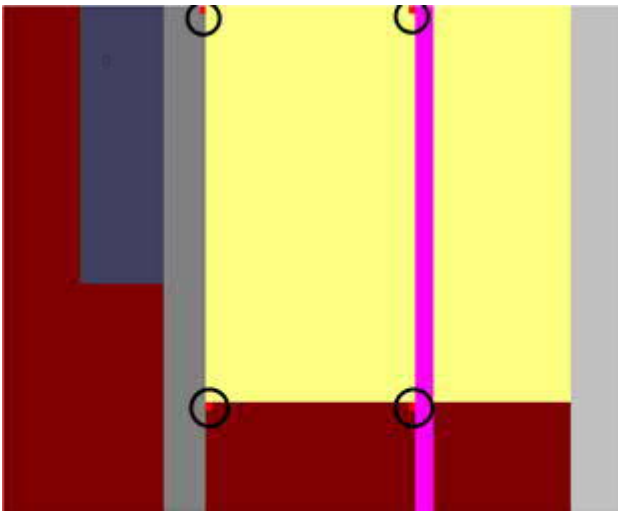
Rakennetyyppien perustapausten lämmönläpäisykertoimet on valittu niin, että ne täyttävät ympäristöministeriön asetuksen (1010/2017) uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. Rakennuksen lämpimän tilan seinän lämmönläpäisykertoimen vertailulämpöhäviö on asetuksen mukaan 0,17 W/(m²·K). Lämmöneristekerroksen paksuuden vertailuissa käytettiin myös rakenteita, joiden lämmönläpäisykertoimen arvo täytti vaatimuksen rakenteellisesta energiatehokkuudesta, jolloin lämmönläpäisykerroin on ympäristöministeriön asetuksen (1010/2017) mukaan 0,12 W/(m²·K) tai vähemmän. Tämän tutkimuksen rakennetyyppien lämmönläpäisykertoimien arvot on laskettu standardin SFS-EN ISO 6946 (2017) mukaan.

Seinärakenteissa on sisäpuolinen lisäkoolaus ja -eristys, jotta höyrinsulkukerroksen sisäpuolelle saadaan asennustila muun muassa sähköasennuksia varten. Runkotolppien koot valittiin mitallistetun sahatavaran yleisimpien poikkileikkausmittojen mukaan sekä liimapuun varastopalkkien mittojen mukaan. Tässä tutkimuksessa käytetyt rakennetyypit on esitetty liitteessä 4.

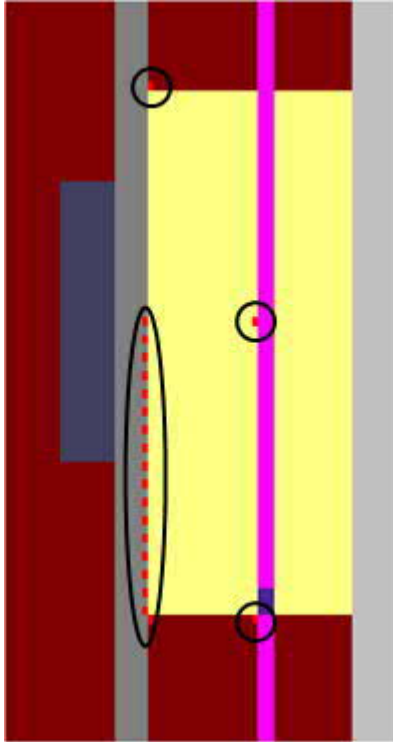
4.4 Laskentamalli

Kuvissa 4.3 ja 4.4 on esitetty rakennetyyppien ideaalitapausten ja ilmvuototapausten laskentamallien periaate. Laskentamalleissa on hyödynnetty symmetriaa, jolloin seinärakenteesta on mallinnettu runkotolpan keskilinjan ja runkotolppien keskivälin välinen alue. Ilmvuotorakenteissa mallinnettu alue on kahden vierekkäisen runkotolpan keskilinjojen välinen alue. Molemmat laskentamallit ovat vaakaleikkauksia seinärakenteesta.

Kuvassa 4.4 ilmvuotomalliin on alemman runkotolpan viereen mallinnettu pystysuuntainen rako, jonka läpi ilmavirta pääsee liikkumaan. Ilmvuotomallit kuvaavat tilannetta, jossa rako on joka toisen runkotolpan molemmin puolin. Raolle soveltuvaa leveyttä ei ollut tiedossa etukäteen, joten tutkimuksessa verrattiin eri rakojen leveyksien vaikutusta homeindeksien maksimiarvoihin. Punaiset pisteet kuvissa 4.3 ja 4.4 ovat valitut tarkastelupisteet homeindeksien laskemista varten. Kuvassa 4.4 olevista tuulensuojakipsilevyn sisäpinnan tarkastelupisteistä tuloksuvaajissa on esitetty kriittisimmän tarkastelupisteen tulokset.



Kuva 4.3. Rakennetyypin laskentamalli (ei mittakaavassa). Punaiset pisteet ovat tarkastelupisteiden sijainnit. Kuvassa vasemmalta alkaen: julkisivuverhouslauta, tuuletusväli ja koolauspuu, tuulensuojakipsilevy, lämmöneriste ja runkotolppa, höyrinsulkumuovi, sisäpuolinen lisäeristys ja koolauspuu sekä sisäverhouslevy.



Kuva 4.4. Rakennetyypin laskentamalli ilmavuototapauksissa (ei mittakaavassa). Punaiset pisteet ovat tarkastelupisteiden sijainnit. Kuvassa vasemmalta alkaen: julkisivuverhouslauta, tuuletusväli ja koolauspuut, tuulensuojakipsilevy, lämmöneriste ja runkoltolat, höyrynsulkumuovi ja siinä oleva rako, sisäpuolinen lisäeristys ja koolauspuut sekä sisäverhouslevy.

Laskentaohjelmassa paine-erot asetettiin niin, että ulkoverhouksen ulkopintaan asetettiin normaali ilmanpaine (101325 Pa) ja sisäpintaan vaihtuva ilmanpaine, jolla mallinnettiin rakenteen yli vallitsevia ilmanpaine-eroja. Koska ilmanpaineet asetettiin laskentamallin reunimmaisiihin pintoihin, käytettiin ulkoverhouksen ja sisäverhouslevyn ilmanläpäisevyyksinä ilmaa vastaavia arvoja. Tällöin ulkoilma pääsi vapaasti tuuletusväliin. Myöskään sisäverhouslevyjen saumat ylä- ja alareunassa eivät ole ilmatiiviitä. Myös ilmavuototapauksissa käytettävän tuulensuojamineraalivillan ilmanläpäisevyys asetettiin ilmaa vastaavaksi. Lisäksi tuulensuojakipsilevyn ilmanläpäisevyyttä varioitiin (ks. taulukko 4.1), koska sen ei oletettu olevan liitoskohdistaan täysin ilmatiivis. Tuulensuojakerroksen liittymäkohtien rakoja ei voitu mallintaa laskentamalliin, koska laskenta hidastui tämän seurauksena merkittävästi (käytännössä pysähtyi).

Taulukko 4.1. Ilmavuototapauksissa käytetyt tuulensuojakipsilevyn ilmanläpäisevyydet. Ensimmäinen arvo on tuulensuojakipsilevyn todellinen (materiaaliominaisuuksien mukainen) ilmanläpäisevyys. Delphin 5.8.3 -ohjelmassa käytetty ilmanläpäisevyyden yksikkö, s , vastaa yksikköä $kg/(m \cdot s \cdot Pa)$.

Tuulensuojakipsilevyn ilmanläpäisevyydet [s]				
2.20E-09	1.00E-07	5.00E-07	3.00E-06	1.00E-03
1.00E-08	1.50E-07	6.00E-07	5.00E-06	1.00E-02
1.50E-08	2.00E-07	7.00E-07	1.00E-05	1.00E-01
3.00E-08	2.50E-07	8.00E-07	3.00E-05	
5.00E-08	3.00E-07	9.00E-07	5.00E-05	
8.00E-08	4.00E-07	1.00E-06	1.00E-04	

Ulkopinnan konvektiivisena lämmönsiirtokertoimena käytettiin arvoa $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ja vesihöyryn diffuusion siirtokertoimena $1,22 \cdot 10^{-7} \text{ s}/\text{m}$. Sisäpinnan lämmönsiirtokertoimena käytettiin arvoa $7,69 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ja vesihöyryn diffuusion siirtokertoimena arvoa $1,52 \cdot 10^{-8} \text{ s}/\text{m}$. Konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen arvo valittiin standardin SFS-EN ISO 6946 (2017) mukaan ja lämmönsiirtokerroin standardin SFS-EN ISO 13789 (2017) mukaan. Vesihöyryn diffuusion siirtokertoimet valittiin Delphin 5 Help mukaan. Ulko- ja sisäpintojen maalikerrosten vesihöyrynvastusta ei otettu laskennassa huomioon. Ilmavuototapauksissa ulko- ja sisäpinnan ilman konvektiivisina siirtokertoimina (air convection exchange coefficient) käytettiin arvoa $1000 \text{ s}/\text{m}$, joka oli Delphin 5.8.3 -ohjelmassa oletusarvo.

Lyhytaaltoisen säteilyn absorptiokertoimena, α_{sol} , käytettiin puuverhoukselle arvoa $0,25$, joka vastaa valkoista maalipintaa (Hagentoft 2001) ja tiiliverhoukselle arvoa $0,67$, joka vastaa punaista poltettua savitiiltä (Incropera et al. 2006). Absorptiokertoimien arvot valittiin samoiksi, joita käytettiin myös Mäkitalon (2012) tekemässä tutkimuksessa. Maanpinnan heijastuskertoimena lyhytaaltoiselle säteilylle käytettiin arvoa $0,2$, joka vastaa kuivaa tasaista maata (Delphin 5 Help). Pitkäaaltoisen säteilyn ulkopintojen emissiviteettinä, ε , käytettiin arvoa $0,9$ sekä puu- että tiiliverhotuille rakenteille (Mills 1999). Pitkäaaltoisen säteilyn lämmönsiirtoa ulkoseinän ja maanpinnan tai muiden rakennusten kanssa ei otettu huomioon. Edellä mainittuja säteilyn kertoimia on käytetty kaikissa laskentatapauksissa, ellei muuta ole erikseen mainittu.

Viistosaderasituksen altistuskertoimena (rain exposure coefficient), joka ottaa huomioon seinään kohdistuvan viistosateen määrän, käytettiin arvoa 1 . Viistosade otettiin huomioon seinään kohdistuvana kosteusrasituksena, kun ulkoilman lämpötila oli yli $0 \text{ }^\circ\text{C}$.

5 TULOKSET

5.1 Puuverhotut rakennetyypit

Tuloskuviissa on käytetty puuverhotun rakennetyypin perustapausta (USP1, luku 4.3 ja liite 4) ja siitä eri rakennekerroksia varioimalla muokattuja rakennetyyppejä. Varioidut rakennekerrokset on selitetty kuvien yhteydessä. Lisäksi liitteessä 4 on esitetty muita tutkimuksessa käytettyjä rakennetyyppejä, joihin tuloskuviissa viitataan.

Puuverhotuilla rakennetyypeillä lämmöneristeen sisäpinnan puolella olevissa tarkastelupisteissä homeindeksien maksimiarvot olivat lähellä nollaa tai pieniä rakenteen ulko-osan tarkastelupisteiden arvoihin nähden. Tästä johtuen luvussa 5.1 vertaillaan ainoastaan rakennemallin ulko-osien tarkastelupisteitä.

Rakennetyypeissä olevan sisäpuolisen lisäkoolausten tapauksessa ei ollut tulosten kannalta olennaista vaikutusta, käytetäänkö pysty- vai vaakakoolausta, kun tarkasteltiin rakenteiden ulko-osia. Ero homeindeksien maksimiarvoissa oli pieni. Kun sisäpuolista lisäkoolausta ei käytetty, tarvittiin rakenteen ulkopinnan ja höyrinsulkumuovin välissä olevalta lämmöneritekerrokselta suurempi lämmönvastus, jotta rakennetyypin täytti vertailuarvon mukaisen lämmönsiirtokertoimen arvon ($0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$). Tällöin rakennetyypin toiminta heikkeni hieman (ero homeindeksien maksimiarvoissa oli enintään n. 0,05) verrattuna rakennetyyppeihin, jossa käytettiin sisäpuolista lisäkoolausta.

Tuulensuojakipsilevyn paksuuden kasvattaminen 9 mm:stä 12,5 mm:iin ei tuonut merkittävää parannusta rakennetyypin toimintaan. Ero vuoden 2100 ilmastossa perusrakennetyypillä homeindeksin maksimiarvossa tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa oli 0,04. Myöskään runkotolpan paksuuden muuttaminen ei aiheuttanut tuloksissa olennaisia eroja 42 mm ja 48 mm paksuilla runkotolpilla perustapauksen rakennetyypillä.

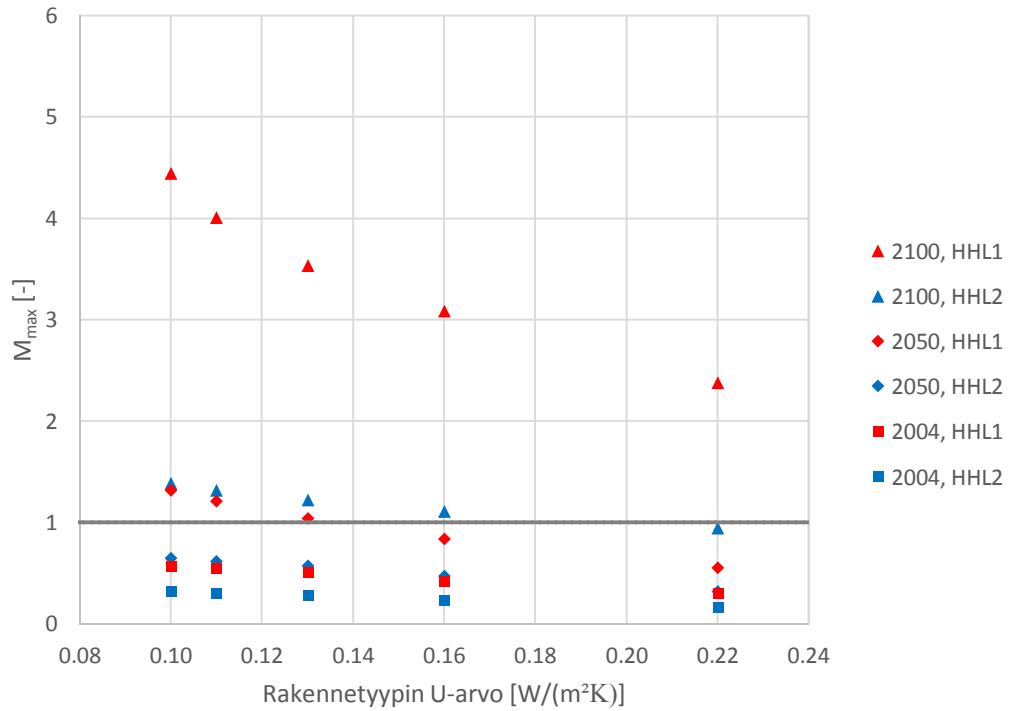
5.1.1 Rakennetyypin U-arvo

Tampereen teknillisessä yliopistossa tehtyjen viimeaikaisten homehtumiskokeiden perusteella on myös olemassa viitteitä siitä, että tavanomainen tuulensuojakipsilevy homehtuu voimakkaammin verrattuna homehtumisherkkyyssuokan 2 materiaalille määritettyihin laskennallisiin arvoihin. Tällöin kipsilevyn homehtumisriski on todellisuudessa suurempi kuin laskelmissa saadut tulokset osoittavat. Tästä johtuen osassa luvun 5 tuulensuojakipsilevyn sisäpinnan tuloskuviissa on esitetty myös homehtumisherkkyyssuokassa 1 saadut laskentatulokset.

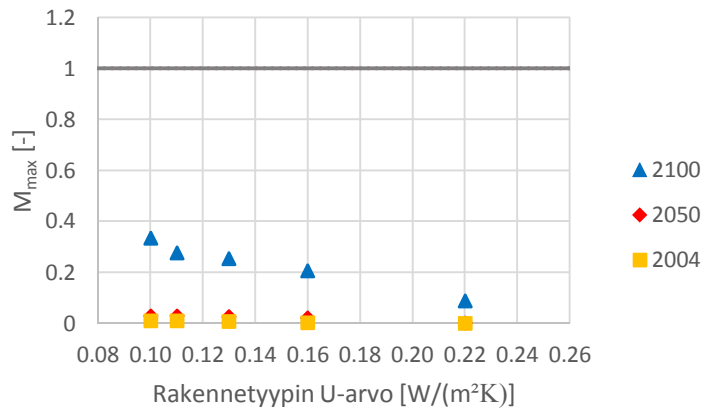
Kuvissa 5.1, 5.2 ja 5.3 on esitetty homeindeksien maksimi-arvot rakennetyypin U-arvon funktiona. Kuvista huomataan, että tuulensuojakipsilevyn sisäpinta runkotolppien välissä on kriittisempi homeen kasvunkannalta kuin runkotolpan ulkonurkka, kun kipsilevyn homeutumisherkkyyssluokka on HHL1 tai HHL2. Mikäli tuulensuojakipsilevy olisi homeutumisherkkyyssluokassa HHL3, sen sisäpinnassa tapahtuva homeen kasvu vähentyisi selvästi homeutumisherkkyyssluokkiin HHL1 ja HHL2 verrattuna. Tällöin runkotolpan ulkonurkan tarkastelupiste olisi kriittisempi. Näin koko rakennetyypin homeutumisherkkyyks pieneni selvästi.

Tuulensuojakipsilevyn ollessa homeutumisherkkyyssluokassa HHL2, rakennetyypin homeindeksien maksimi-arvot jäivät alle homeen kasvun alkamisen raja-arvon yksi nykyilmastossa sekä vuoden 2050 ilmastossa rakennetyypin U-arvon ollessa $0,10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ tai suurempi. Vuoden 2100 ilmastossa homeindeksien maksimi-arvot sen sijaan nousivat selvästi nykyilmastoon ja vuoteen 2050 verrattuna. Vuoden 2100 ilmastossa tuulensuojakipsilevyn sisäpinnan arvot nousivat yli yhden jo lähellä U-arvon vertailuarvoa olevalla rakennetyypillä.

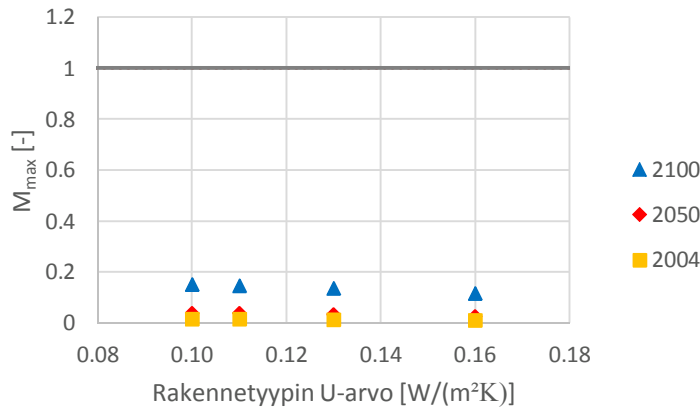
Homeutumisherkkyyssluokassa HHL1 olevan tuulensuojakipsilevyn homeindeksien maksimi-arvot nousivat yli yhden jo vuoden 2050 ilmastossa rakennetyypin U-arvon ollessa $0,13 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ tai pienempi. Vuoden 2100 ilmastossa homeindeksien maksimi-arvot nousivat selvästi homeen kasvun alkamisen raja-arvon yläpuolelle, jossa rakennetyypin U-arvon pienentyminen lisäsi homeen kasvua. Homeindeksien maksimi-arvot olivat toisaalta jo muutenkin homeen kasvun kannalta merkittävät vuoden 2100 ilmastossa.



Kuva 5.1. Rakennetyypin U -arvon vaikutus homeindeksien maksimiarvoihin tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homehtumisherkkyyssluokissa HHL1 ja HHL2. Rakennetyyppi on USPI.



Kuva 5.2. Rakennetyypin U -arvon vaikutus homeindeksien maksimiarvoihin runkotolpan ulkonurkassa homehtumisherkkyyssluokassa HHL1. Rakennetyyppi on USPI.



Kuva 5.3. Rakennetyypin U-arvon vaikutus homeindeksien maksimiarvoihin tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homeutumisherkkyyssluokassa HHL3. Rakennetyyppi on USP1.

Lämmöneristekerroksen paksuuden kasvaessa, rakenteen ulko-osissa lämpötilat laskevat suuremmalta alueelta pienentyneen rakenteen läpi kulkevan lämpövirran seurauksena. Tarkastelupisteiden suhteelliset kosteudet kasvavat pienentyneen lämpötilan ja hidastuneen kuivumisen johdosta. Tulosten perusteella lämmöneristekerroksen paksuuden kasvattaminen aiheuttaa tuulensuojakipsilevyn sisäpintaan homeen kasvun kannalta suotuisimmat olosuhteet vuoden 2100 ilmastossa.

Mäkitalo (2012) on tehnyt vastaavanlaisesta rakenteesta laskentatarkasteluja. Tässä tutkimuksessa saadut tulokset tuulensuojakipsilevyn sisäpinnasta runkotolppien välistä rakennetyypin eri U-arvoilla vastasivat hyvin Mäkitalon (2012) saamia tuloksia kaikilla ilmastovuosilla.

Runkotolpan ulkonurkan osalta tämän tutkimuksen tulokset poikkesivat selvästi Mäkitalon (2012) tuloksista etenkin vuoden 2100 ilmastossa. Mäkitalon (2012) tutkimuksessa runkotolpan ulkonurkan homeindeksien maksimiarvot olivat suurempia kuin tuulensuojakipsilevyn sisäpinnan arvot. Vertailuarvon mukaisella U-arvolla Mäkitalon (2012) homeindeksin maksimiarvo runkotolpan ulkonurkassa vuoden 2100 ilmastossa oli noin 1,3, kun tässä tutkimuksessa vastaava luku oli noin 0,2. Mäkitalon (2012) laskentamallissa ei ollut tuuletusvälissä pystykoolausta runkotolpan kohdalla niin kuin tässä tutkimuksessa on käytetty. Pystykoolausta vaikutuksesta kerrotaan luvussa 5.1.3. Lisäksi Mäkitalo (2012) on tehnyt laskentatarkastelut eri laskentaohjelmalla (WUFI) ja materiaaliominaisuudet ovat olleet erilaiset etenkin puun osalta, jotka voivat myös selittää eroja homeindeksien maksimiarvoissa.

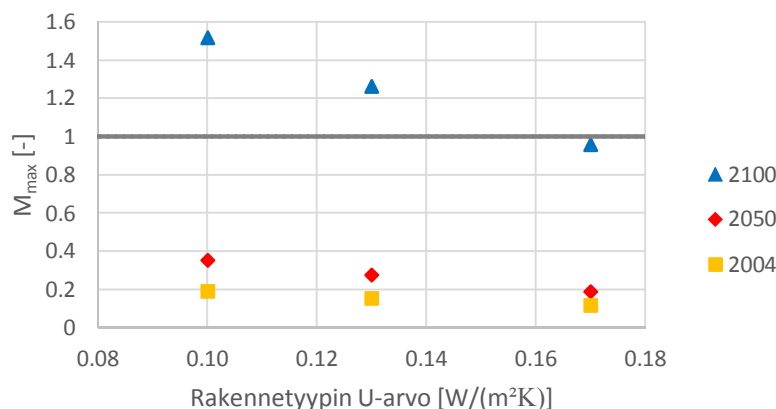
Myös Salonen (2015) on tehnyt laskentatarkasteluja puurunkoisista ulkoseinärakenteista. Erona tämän tutkimuksen rakennetyyppeihin oli, että höyrynsulkukerros toimi massiivipuurakenne, jonka suhteellinen diffuusiovastus on höyrynsulkumuovia alhaisempi. Lisäksi muun muassa puun materiaaliominaisuudet ovat olleet erilaiset tähän tutkimukseen verrattuna. Salosen (2015) tulokset nykyilmastossa ja vuoden 2050 ilmas-

tossa olivat suurempia sekä runkotolpan ulkonurkassa että tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa.

Salosen (2015) tulokset homeindeksien maksimiarvoissa nykyilmastossa molemmissa tarkastelupisteissä olivat välillä 0,7-0,8, kun tämän tutkimuksen vastaavat tulokset olivat enintään noin 0,2. Vuoden 2050 ilmastossa Salosen (2015) tulokset molemmissa tarkastelupisteissä olivat lähellä arvoa yksi. Tässä tutkimuksessa runkotolpan ulkonurkan arvot olivat lähellä nollaa ja tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa noin 0,5. Salosen (2015) suurempia homeindeksien maksimiarvoja voivat selittää pienempi vesihöyrynvastus rakenteen sisäpinnassa sekä erilaiset materiaaliominaisuudet laskentatarkasteluissa. Myös rakennetyypissä oleva massiivipuurakenne tekee tarkasteltavista rakenteista erilaisia.

Kuvasta 5.4 nähdään tulokset rakennetyypistä, jossa runkotolpan ulkopinnassa on 48 mm paksu vaakakoolaus ja lisälämmöneriste. Muista laskentamalleista poiketen, ulkopuolisen lisäkoolauksen laskentamalli oli pystyleikkaus rakennetyypistä runkotolppien keskikohdalta 2D simuloinnin asettamien rajoitusten vuoksi.

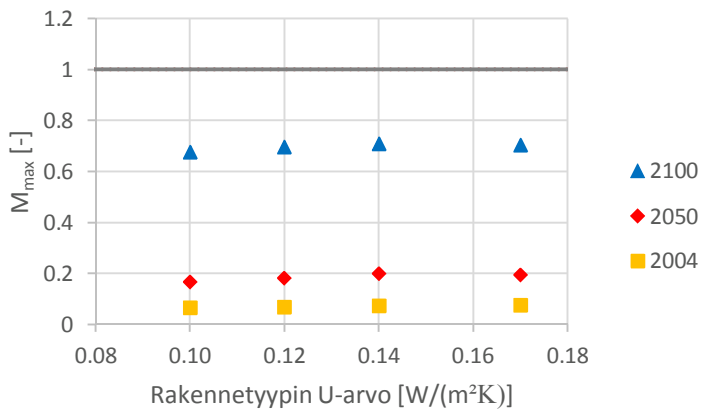
Ulkopuolisen vaakakoolauksen ja rakenteen sisäpinnan välissä on enemmän lämmönvastusta runkotolpan ulkonurkan tarkastelupisteeseen verrattuna, koska runkotolppa johtaa paremmin lämpöä kuin pelkkä lämmöneriste. Nykyilmastossa ja vuoden 2050 ilmastossa homeindeksien maksimiarvot eivät nousseet korkeiksi, mutta vuoden 2100 ilmastossa homeindeksien maksimiarvot nousivat samankaltaisiksi kuin tuulensuojakipsilevyn sisäpinnan tarkastelupisteen arvot perusrakennetyypissä homeutumisherkkyysluokassa HHL2. Tämä tarkoittaa sitä, että vuoden 2100 ilmastossa tuulensuojakipsilevyn takana olevassa puussa on homeen kasvun riski, mikäli sen ja sisäpinnan välissä on hyvin lämpöä eristävä rakenne.



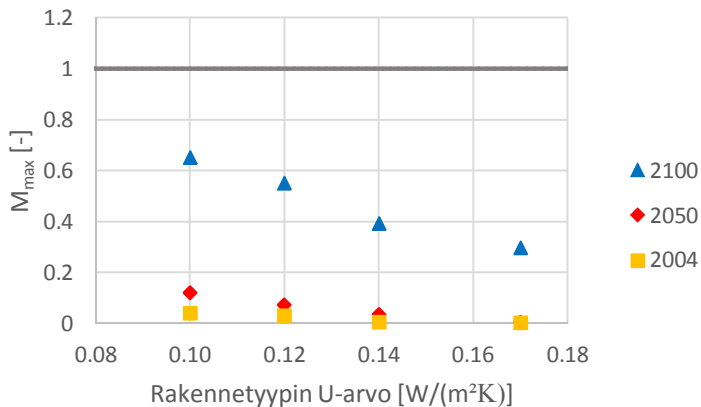
Kuva 5.4. Rakennetyypin U-arvon vaikutus homeindeksien maksimiarvoihin ulkopuolisen vaakakoolauksen ulkopinnassa homeutumisherkkyysluokassa HHL1. Rakennetyyppi on USP4.

Kuvan 5.4 mukaiset tulokset ovat hyvin lähellä tuulensuojakipsilevyn sisäpinnan tuloksia (kuva 5.1). Homehtumisherkkyysluokan pieneneminen ei suoraan pahentanut tilannetta, sillä puun kosteuskapasiteetti tasoitti olosuhteita koolauspuiden ulkopinnassa.

Kuvissa 5.5 ja 5.6 on esitetty tulokset, kun lämmöneristeenä käytetään mineraalivillan sijaan puukuitueristettä. Puukuitueriste paransi rakenteen toimivuutta mineraalivillan nähden tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa. Homeindeksien maksimiarvot pysyivät alle homeen kasvun alkamisen raja-arvon sekä tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa että runkotolpan ulkonurkassa myös vuoden 2100 ilmastossa.



Kuva 5.5. Rakennetyypin U-arvon vaikutus homeindeksien maksimiarvoihin tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homehtumisherkkyysluokassa HHL2, kun lämmöneristeenä on puukuitueriste. Rakennetyyppi on USP2.



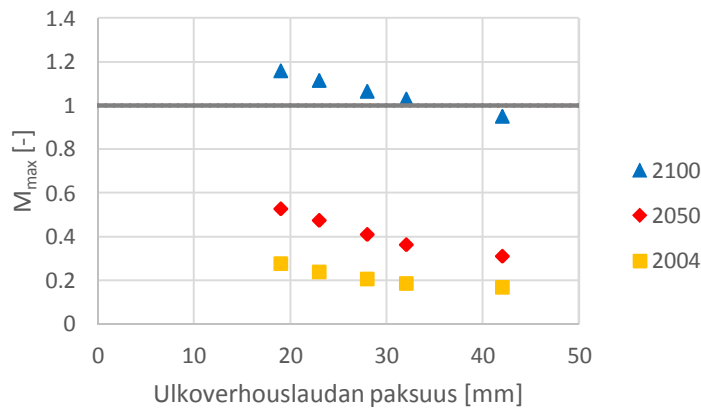
Kuva 5.6. Rakennetyypin U-arvon vaikutus homeindeksien maksimiarvoihin runkotolpan ulkonurkassa homehtumisherkkyysluokassa HHL1, kun lämmöneristeenä on puukuitueriste. Rakennetyyppi on USP2.

Puukuitueriste tasaa kosteusolosuhteita rakenteessa hygroskooppisuutensa ansiosta. Eristepaksuuden lisääminen ei aiheuttanut tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homeindeksien maksimiarvojen nousua rakennetyypin U-arvon pienentyessä. Runkotolpan ulkonurkassa vuoden 2100 ilmastossa lämmöneristekerroksen paksuuden lisääminen kui-

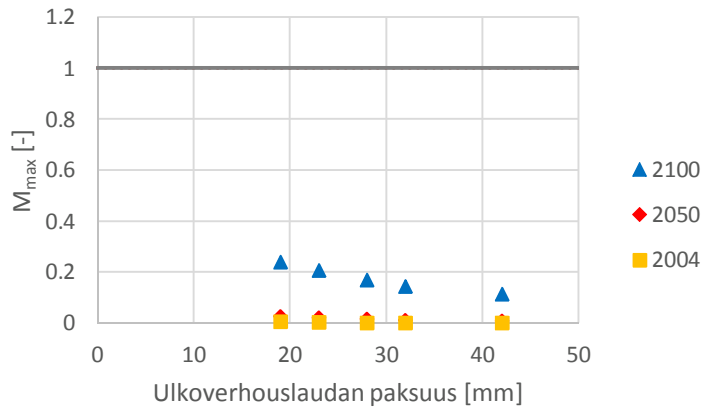
tenkin kasvatti homeindeksien maksimiarvoja mutta ne pysyivät kuitenkin alle homeen kasvun alkamisen raja-arvon. Tulokset puukuitueristeen toimivuudesta mineraalivillaan verrattuna vastasivat myös Pihelo et al. (2016) tekemää laskennallista tutkimusta, jossa he havaitsivat puukuitueristeen vähentävän homeen kasvun riskiä mineraalivillaeristeisiin seinärakenteisiin verrattuna.

5.1.2 Ulkoverhouslaudan paksuus ja sävy

Kuvissa 5.7 ja 5.8 on esitetty homeindeksien maksimiarvot ulkoverhouslaudan paksuuden funktiona. Paksumpi ulkoverhouslautta paransi olosuhteita ulkoseinärakenteen ulkosissa suuremman lämmönvastuksen ansiosta, jolloin tuuletusvälin lämpötila pysyi lämpimämpänä. Tämä pienensi suhteellista kosteutta ja näin vähensi homeen kasvulle otollisia olosuhteita myös sisempänä rakenteessa. Ohuimman tarkastellun julkisivuverhouslaudan lämmönvastus oli $0,16 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$ ja paksuimman $0,35 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$.

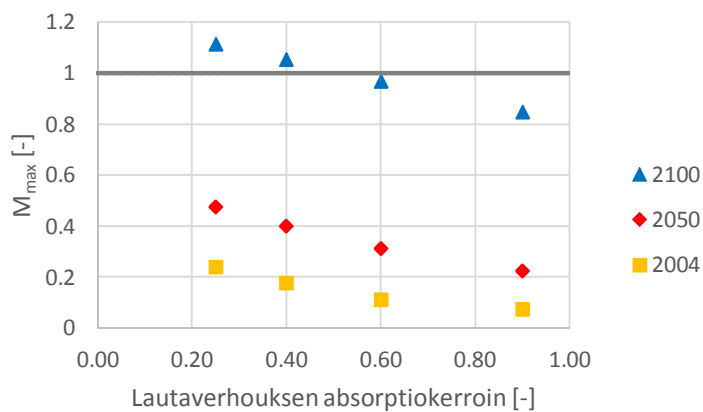


Kuva 5.7. *Ulkoverhouslaudan paksuuden vaikutus homeindeksien maksimiarvoihin tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homehtumisherkkyyssluokassa HHL2. Rakennetyyppi on USP1. Rakennetyypin U-arvo on $0,16 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$.*

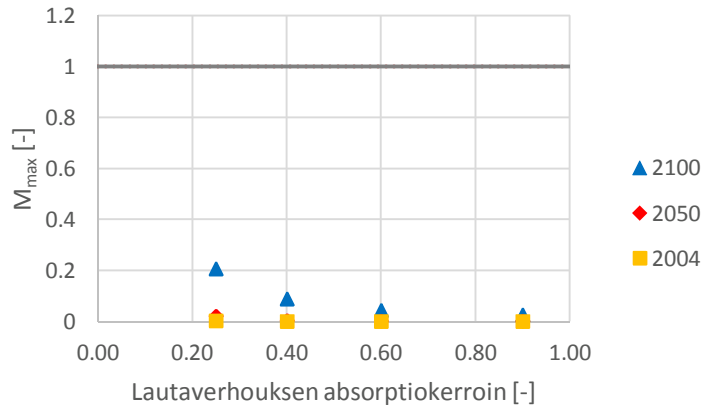


Kuva 5.8. Ulkooverhouslaudan paksuuden vaikutus homeindeksien maksimiarvoihin runkotolpan ulkonurkassa homeutumisherkkyysluokassa HHL1. Rakennetyyppi on USP1. Rakennetyypin U -arvo on $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Kuvissa 5.9 ja 5.10 on esitetty ulkooverhouslaudan absorptiokerroimen vaikutus homeindeksien maksimiarvoihin. Tummempi sävy (suurempi absorptiokerroin) absorboi enemmän auringonsäteilyä, jonka seurauksena tuuletusväli lämpenee enemmän. Tämä johti paksumman ulkooverhouslaudan tavoin pienempiin homeindeksien maksimiarvoihin.



Kuva 5.9. Ulkooverhouslaudan absorptiokerroimen vaikutus homeindeksien maksimiarvoihin tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homeutumisherkkyysluokassa HHL2. Rakennetyyppi on USP1. Rakennetyypin U -arvo on $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.



Kuva 5.10. Ulkoverhouslaudan absorptiokertoimen vaikutus homeindeksien maksimiarvoihin runkotolpan ulkonurkassa homeutumisherkkyyssluokassa HHL1. Rakennetyyppi on USP1. Rakennetyypin U -arvo on $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Pelkästään ulkoverhouslaudan paksuutta tai sävyä muuttamalla ei kuitenkaan saavutettu merkittäviä parannuksia rakennetyypin toimivuuteen vuoden 2100 ilmastossa, jossa homeindeksien maksimiarvot pysyivät edelleen lähellä yhtä.

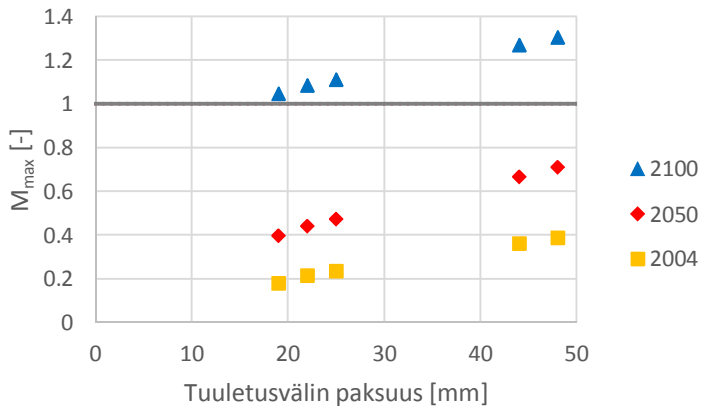
5.1.3 Tuuletusväli ja ilmanvaihtuvuus

Kuvissa 5.11 ja 5.12 on verrattu eri tuuletusvälin paksuuksien vaikutusta homeindeksien maksimiarvoihin. Ilmanvaihtuvuutena on käytetty kunkin tuuletusvälin paksuuden mukaista tunneittain vaihtelevaa ilmanvaihtuvuutta (ks. luku 3.4). Tuuletusvälin pystykoolauspuu on 100 mm leveä lukuun ottamatta 48 mm paksua tuuletusväliä, jossa pystykoolauspuu on 48 mm leveä.

Koska ilmanvaihtuvuus kasvaa tuuletusvälin paksuuden kasvaessa, on sillä myös vaikutusta homeindeksien maksimiarvoihin. Tulosten mukaan paksumpi tuuletusväli kasvattaa tarkastelupisteiden homeindeksien maksimiarvoja. Tämä johtuu siitä, että suuremman ilmanvaihtuvuuden sekä ulkoverhouslaudan lämmöneristysvaikutuksen pienentyneen seurauksena tuuletusvälin olosuhteet lähenevät ulkoilman olosuhteita. Tuuletusvälin lämpötilan laskiessa ja suhteellisen kosteuden noustessa homeen kasvulle otolliset olosuhteet lisääntyvät.

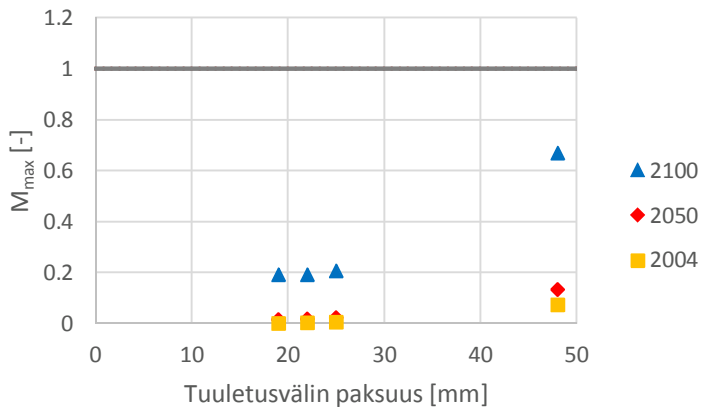
Tässä tutkimuksessa käytettiin myös vakiosuuruisia ilmanvaihtuvuuksia eri tuuletusvälien paksuuksille, jolloin ilmanvaihtuvuuden muutokset eivät vaikuttaneet tuloksiin. Vakioilmanvaihtuvuudet olivat 25 mm paksun tuuletusvälin tunnitaiten ilmanvaihtuvuuksien vuosikeskiarvot ilmastovuosittain. Vähintään 25 mm paksuille tuuletusväleille trendi oli sama kuin kuvassa 5.11 ja tulokset olivat myös hyvin samanlaiset. Ohuemmillä tuuletusväleillä homeindeksien maksimiarvot sen sijaan nousivat enimmillään n. 0,15:llä kuvan 5.11 mukaisiin tuloksiin nähden, koska vakioilmanvaihtuvuus oli suu-

rempi kuin kyseisten tuuletusvälien laskennallisten ilmanvaihtuvuuksien vuosikeskiarvot luvun 3.4 menetelmällä laskettuna.

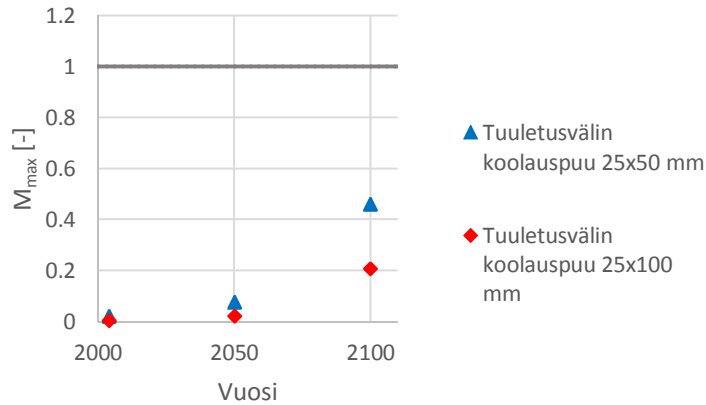


Kuva 5.11. Tuuletusvälin paksuuden vaikutus homeindeksien maksimiarvoihin tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homeutumisherkkyysluokassa HHL2. Rakennetyyppi on USP1. Rakennetyypin U-arvo on $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Kuvassa 5.12 tapahtuva homeindeksin selvä nousu runkotolpan ulkonurkassa 48 mm paksulla tuuletusvälillä johtuu kapeammasta tuuletusvälin pystykoolaustuista. Runkotolppaa leveämmällä koolaustuilla on lämmöneristyskykyä, joka parantaa runkotolpan ulkonurkan olosuhteita kapeampaan koolaustuun verrattuna. Tämä nähdään myös kuvasta 5.13, jossa 25 mm paksussa tuuletusvälissä on verrattu 50 mm ja 100 mm leveyden koolaustuiden vaikutusta homeindeksien maksimiarvoihin.

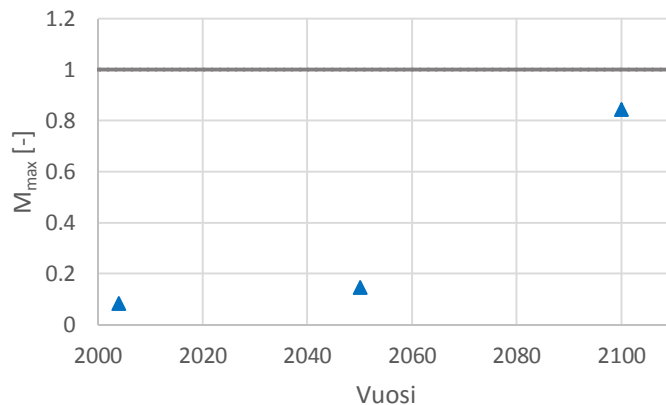


Kuva 5.12. Tuuletusvälin paksuuden vaikutus homeindeksien maksimiarvoihin runkotolpan ulkonurkassa homeutumisherkkyysluokassa HHL1. Tuuletusvälin koolaustu 48 mm paksussa tuuletusvälissä on 48 mm leveä, muissa tapauksissa 100 mm leveä. Rakennetyyppi on USP1. Rakennetyypin U-arvo on $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.



Kuva 5.13. Tuuletusvälin koolauspuiden leveyden vaikutus homeindeksien maksimiarvoihin runkotolpan ulkonurkassa homehtumisherkkyyssluokassa HHL1. Rakennetyyppi on USP1. Rakennetyypin U-arvo on $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

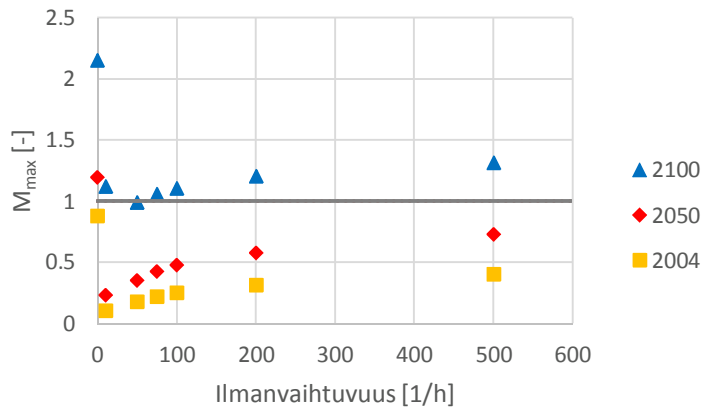
Kuvasta 5.14 nähdään perusrakennetyypin tulokset, kun tuuletusvälissä oli $22 \text{ mm} + 22 \text{ mm}$ paksu ristikoolaus, jossa sisempi koolauspuiden oli vaakasuuntainen. Tässä tapauksessa runkotolpan kohdalla ei ollut pystysuuntaista koolauspuiden, joka olisi parantanut runkotolpan ulkonurkan olosuhteita. Vuoden 2100 ilmastossa tapahtui merkittävä muutos nykyilmastoon ja vuoden 2050 ilmastoon verrattuna, jolloin runkotolpan ulkonurkan homeindeksin maksiarvo nousi lähelle homeen kasvun alkamisen raja-arvoa.



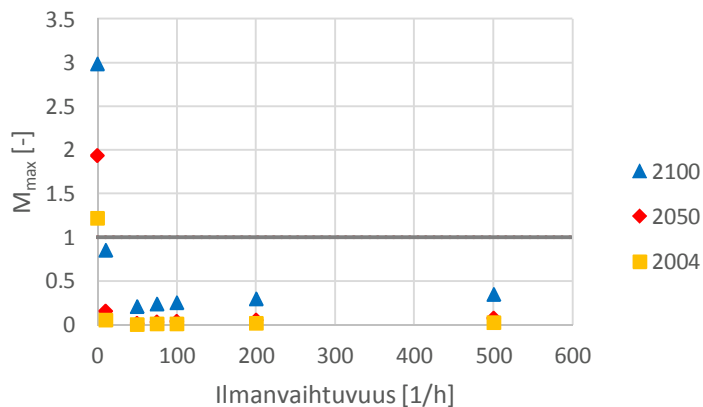
Kuva 5.14. Runkotolpan ulkonurkan homeindeksien maksimiarvot homehtumisherkkyyssluokassa HHL1, kun tuuletusvälissä on $22 \text{ mm} + 22 \text{ mm}$ paksu ristikoolaus. Sisempi koolauspuiden on vaakasuuntainen. Rakennetyyppi on USP1. Rakennetyypin U-arvo on $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Tutkimuksessa tarkasteltiin myös eri vakioilmavaihtuvuuksilla simuloitua rakennetta. Koska todellisissa olosuhteissa ilmavaihtuvuus vaihtelee voimakkaasti, voidaan tällä tavalla esittää ilmavaihtuvuuden vaikutuksen trendejä. Kuvista 5.15 ja 5.16 havaitaan, että jo pienetkin ilmavaihtuvuuden määrät riittävät ylläpitämään puuverhotun seinärakenteen kosteusteknistä toimivuutta käyttötilanteessa. Riittävä vähimmäisilmavaihtu-

vuus on kuitenkin varmistettava. Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuuden kasvaessa, lähestyvät siellä olevat olosuhteet ulkoilman olosuhteita ja homeindeksien maksimi-arvot rajoittuvat sen mukaisten olosuhteiden vaikutusten tasolle.



Kuva 5.15. Ilmanvaihtuvuuden vaikutus homeindeksien maksimi-arvoihin tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homeutumisherkkyysluokassa HHL2. Ilmanvaihtuvuudet ovat vakioarvoja. Rakennetyyppi on USP1. Rakennetyypin U-arvo on $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.



Kuva 5.16. Ilmanvaihtuvuuden vaikutus homeindeksien maksimi-arvoihin runkotolpan ulkonurkassa homeutumisherkkyysluokassa HHL1. Ilmanvaihtuvuudet ovat vakioarvoja. Rakennetyyppi on USP1. Rakennetyypin U-arvo on $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

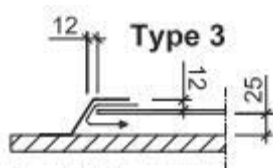
Vakiosuuruisen ilmanvaihtuvuuden, joka oli vaihtelevan ilmanvaihtuvuuden vuosikeskiarvo, ja vaihtelevan ilmanvaihtuvuuden ero tuloksiin oli tässä tutkimuksessa pieni (ero homeindeksien maksimi-arvoissa oli enimmillään noin 0,07). Laskennan epälineaarisuuden johdosta todennäköisempää ilmanvaihtuvuuksia käytettäessä voidaan kuitenkin saada tarkempia tuloksia.

Muuttuvaa ilmanvaihtuvuutta käytettäessä homeindeksien maksimi-arvo oli hiukan alhaisempia vakioilmanvaihtuvuuteen nähden. Muuttuvan ilmanvaihtuvuuden alhaisemmat homeindeksien maksimi-arvot johtuivat todennäköisesti siitä, että pienemmät ilmanvaihtuvuudet vähensivät homeen kasvua enemmän kuin suuremmat ilmanvaihtuvuudet

lisäsivät sitä. Tämä voidaan havaita myös muun muassa kuvasta 5.15, jossa kasvavan ilmanvaihtuvuuden suuntaan homeindeksien maksimiarvojen kasvunopeus pienenee.

Maastoluokka vaikuttaa ilmanvaihtuvuuden määrään ja viistosaderasitukseen. Puuverhotulle pohjoissuunnan seinälle viistosaderasituksella ei kuitenkaan maastoluokan mukaan ole suurta vaikutusta homeindeksien maksimiarvoihin vähäisen saderasituksen ja suojaavan lautaverhouksen takia, jolloin maastoluokka vaikutti tuloksiin pääasiassa ilmanvaihtuvuuden perusteella. Tulosten mukaan suuremmassa maastoluokassa (tuulelta suojaisimmat olosuhteet) on ilmanvaihtuvuutta vähentävä ja sen seurauksena homeindeksien maksimiarvoja vähentävä vaikutus. Erot eri maastoluokkien välillä eivät kuitenkaan olleet suuria, joten selkeää hyötyä tuulelta suojaisammasta paikasta ei ollut. Homeindeksien maksimiarvot olivat maastoluokassa 4 noin 0,05 yksikköä pienemmät kuin maastoluokassa 1.

Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuuden laskennassa on käytetty ilman virtausta hidastavien taivutusten häviökertoimena, ξ_{be} , arvoa nolla, jolloin tuuletusvälin yläpäässä ei ole ilman virtausta hidastavia mutkia. Lähteessä Falk & Sandin (2013b) on havainnollistettu erilaisia yläpään virtausta hidastavia peltien taivutuksia. Kuvassa 5.17 on esitetty edellä mainitun lähteen suurimpia häviökertoimia vastaava tuuletusvälin yläpään peltin taivutus. Tämän tutkimuksen yhteydessä tehdyissä tarkasteluissa ei havaittu Falkin ja Sandinin (2013b) esittämällä häviökertoimilla olevan suurta vaikutusta homeindeksien maksimiarvoihin. Erot homeindeksien maksimiarvoissa olivat kuvan 5.17 mukaisella taivutuksella noin 0,05 yksikköä pienemmät kuin avoimella tuuletusvälin yläpäässä. Tulosten mukaan suojapellit tai muut tuuletusvälin ilmavirtausta hidastavat rakenteelliset tekijät eivät vaikuta suuresti rakenteen homehtumisriskiin, mikäli ne eivät oleellisesti rajoita ilmavirtauksen kulkua.

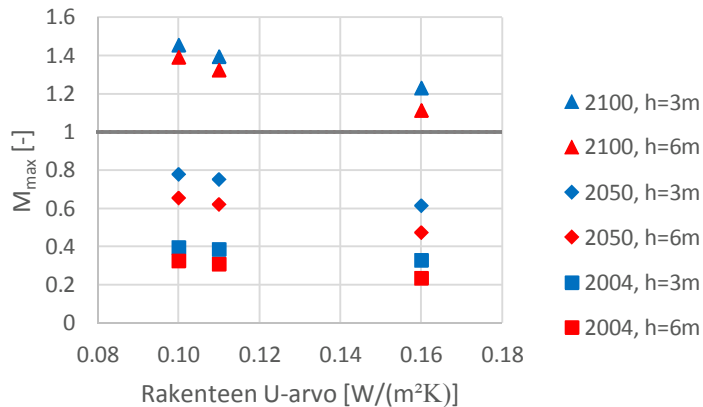


Kuva 5.17. Lähteen Falk & Sandin (2013b) suurimpia häviökertoimia vastaava tuuletusvälin yläpään taivutus.

Tässä tutkimuksessa on havaittu tuuletusvälin suuren ilmanvaihtuvuuden kasvattavan homeindeksien maksimiarvoja pienempään ilmanvaihtuvuuteen verrattuna. Luvussa 3.4 todettiin, että matalammassa tuuletusvälissä ilmanvaihtuvuus oli suurempi. Seuraavissa kuvissa vertaillaan tuloksia, joissa ilmanvaihtuvuus on laskettu 3 m ja 6 m korkeille seinille.

Kuvasta 5.18 havaitaan, että tuuletusvälin korkeuden ollessa matalampi, homeindeksien maksimiarvot nousevat lisääntyneen ilmanvaihtuvuuden seurauksena. Tuuletusvälin paksuuden ollessa 48 mm seinän korkeuden aiheuttamilla ilmanvaihtuvuuksien eroilla

ei ollut yhtä suurta heikentävää vaikutusta 25 mm paksuun tuuletusväliin verrattuna, sillä ilmanvaihtuvuudet olivat jo muutenkin suurempia. Runkotolpan ulkonurkan homeindeksien maksimiarvoissa erot 3 m ja 6 m korkeiden tuuletusvälien välillä vuoden 2100 ilmastossa olivat samansuuruiset kuin tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa olevat erot. Nykyilmastossa ja vuoden 2050 ilmastossa tulokset runkotolpan ulkonurkassa olivat sen sijaan vielä lähempänä toisiaan molemmilla seinän korkeuksilla.

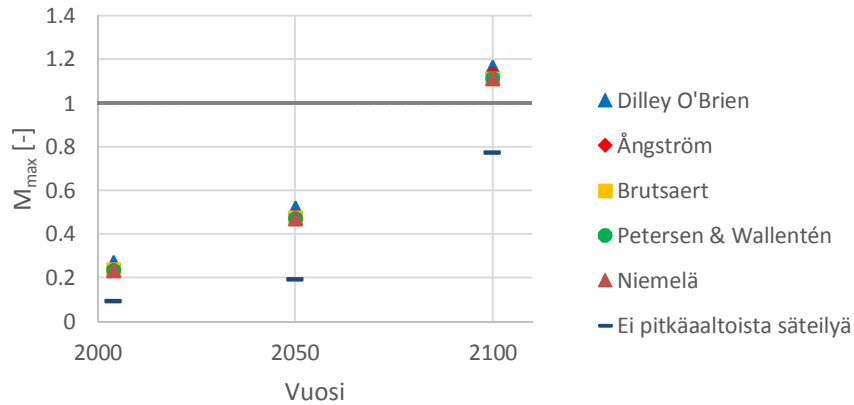


Kuva 5.18. Rakennetyypin U-arvon vaikutus homeindeksien maksimiarvoihin tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homehtumisherkkyysluokassa HHL2. Ilmanvaihtuvuuksina on käytetty 3 m ja 6 m korkeille tuuletusväleille määritettyjä ilmanvaihtuvuuksia. Rakennetyyppi on USP1.

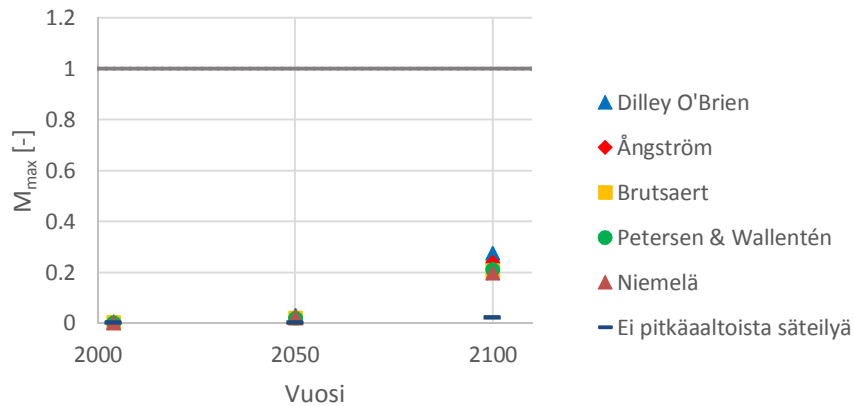
Etelän suuntaan olevalla seinällä ilmanvaihtuvuudet olivat pohjoisseinää suurempia (ks. luku 3.4). Tulosten mukaan pohjoisseinä oli kuitenkin eteläseinää kriittisempi. Auriongsäteilyn lämmittävä vaikutus riitti pitämään olosuhteet viistosaderasituksesta sekä pohjoisseinää suuremmista ilmanvaihtuvuuksista huolimatta parempana pohjoisseinään verrattuna. Erot pohjoisseinän homeindeksien maksimiarvoihin olivat kuitenkin alle 0,1 yksikön suuruisia.

5.1.4 Ilmakehästä tuleva pitkäaaltoinen säteily

Tässä tutkimuksessa vertailtiin Suomen ilmasto-olosuhteiden kaltaisissa olosuhteissa sekä maantieteellisesti Suomen lähialueella määritettyjä ilmakehän pitkäaaltoisen säteilyn eri parametrisointien eroja homeindeksien maksimiarvoihin. Kuvissa 5.19 ja 5.20 näkyvät homeindeksien maksimiarvoissa olevat erot puuverhotulla perusrakennetyypillä. Kuvista nähdään, että homeindeksien maksimiarvot ovat hyvin lähellä toisiaan. Tästä johtuen kaikkia tässä tutkimuksessa esitettyjä malleja voidaan käyttää rakennusfysikaalisessa laskennassa arvioimaan pitkäaaltoisen säteilyn määrää Suomen ilmastossa tulosten tarkkuuden olennaisesti kärsimättä. Kuvista nähdään myös, että pitkäaaltoisen säteilyn huomiotta jättäminen aliarvioi homeindeksien maksimiarvoja.



Kuva 5.19. Ilmakehän pitkäaaltoisen säteilyn eri parametrusointien vaikutus homeindeksien maksimiarvoihin tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homehtumisherkkyysluokassa HHL2. Parametrusoinneissa on otettu huomioon pilvisyyden vaikutus luvussa 3.5 valitulla tavalla. Rakennetyyppi on USP1. Rakennetyypin U-arvo on $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.



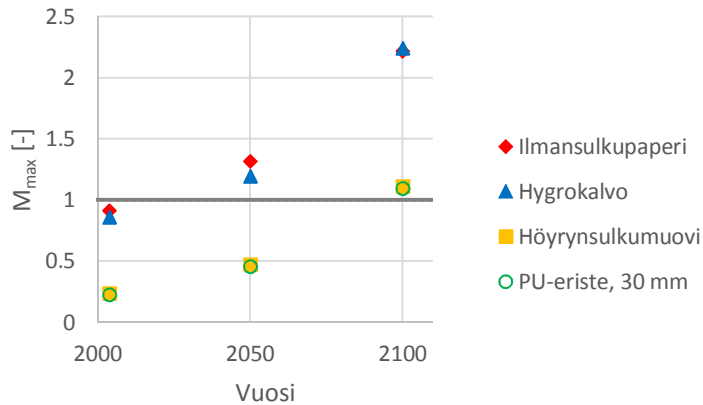
Kuva 5.20. Ilmakehän pitkäaaltoisen säteilyn eri parametrusointien vaikutus homeindeksien maksimiarvoihin runkotolpan ulkonurkassa homehtumisherkkyysluokassa HHL1. Rakennetyyppi on USP1. Rakennetyypin U-arvo on $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

5.1.5 Höyrynsulkukerrokset

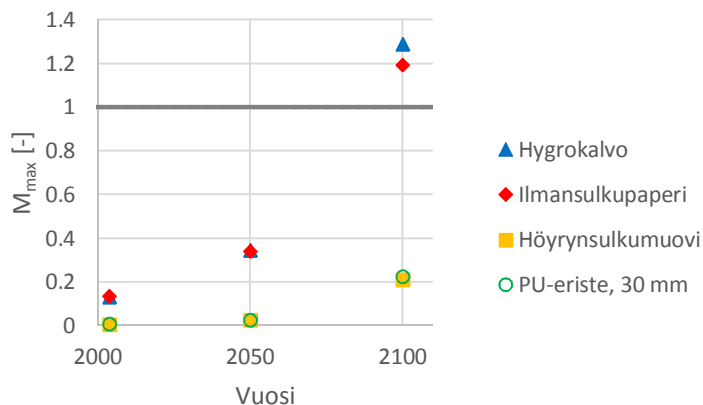
Kuvissa 5.21 ja 5.22 on esitetty eri höyrynsulkukerrosten vaikutuksia homeindeksien maksimiarvoihin puuverhotun rakennetyypin perustapauksessa. Kuvissa 5.23 ja 5.24 on puolestaan esitetty tulokset, kun lämmöneristeenä on puukuitueriste. Tämän luvun tulokset on esitetty tämän tutkimuksen perusrakennetyypin mukaiselle U-arvolle.

Vesihöyrytiivinä kerroksina toimivat höyrynsulkumuovi ja alumiinilaminaattipintainen polyuretaanilevy toimivat sekä mineraalivillan että puukuitueristeen kanssa paremmin kuin vesihöyryä läpäisevämmät ilmansulkupaperi sekä hygrokalvo. Ilmansulkupaperi ja hygrokalvo ylittivät homeen kasvun alkamisen raja-arvon jo vuoden 2050 ilmas-

tossa mineraalivillalla eristetyssä perusrakennetyypissä tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa.



Kuva 5.21. Eri höyrynsulkukerrostojen vaikutus homeindeksien maksimiarvoihin tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homeutumisherkkyysluokassa HHL2. Rakennetyypit ovat USP1 ja USP5. Rakennetyyppien U-arvot ovat 0,16 W/(m²·K).

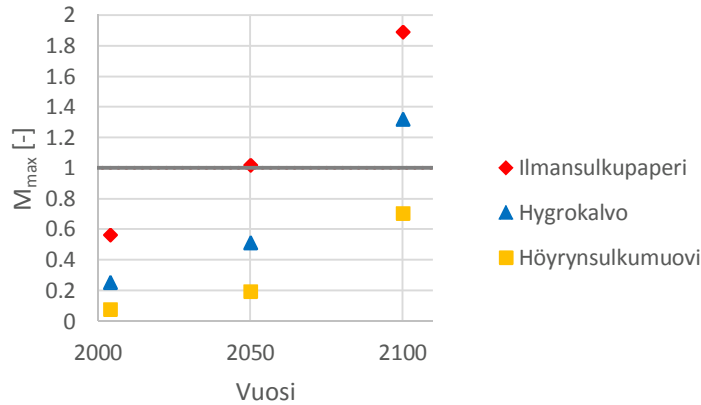


Kuva 5.22. Eri höyrynsulkukerrostojen vaikutus homeindeksien maksimiarvoihin runkotolpan ulkonurkassa homeutumisherkkyysluokassa HHL1. Rakennetyypit ovat USP1 ja USP5. Rakennetyyppien U-arvot ovat 0,16 W/(m²·K).

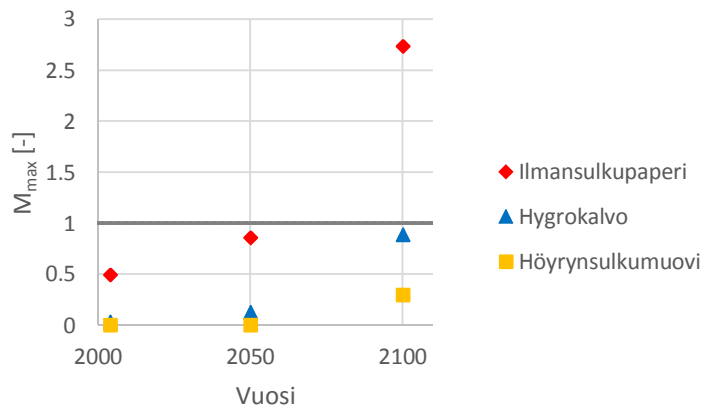
Puukuitueristeisessä rakennetyypissä höyrynsulkumuovin ja hygrokalvon kanssa homeindeksien maksimiarvot jäivät alle homeen kasvun alkamisen raja-arvon nykyilmastossa ja vuoden 2050 ilmastossa perusrakennetyypin mukaisella U-arvolla. Vuoden 2100 ilmastossa myös vesihöyryä läpäisevämpiä ilmansulkukerroksia käytettäessä homeindeksien maksimiarvot nousivat yli homeen kasvun alkamisen raja-arvon tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homeutumisherkkyysluokassa HHL2. Runkotolpan ulkonurkassa ilmansulkupaperi aiheutti selvästi suurimmat homeindeksien maksimiarvot vuoden 2100 ilmastossa.

Vesihöyryä läpäisevän ilmansulkupaperin toiminta puukuitueristeen kanssa etenkin vuoden 2100 ilmastossa kertoo siitä, että rakenteeseen tulevien suurten kosteuskuor-

mien vaikutus on myös puukuitueristeisessä rakenteessa haitallista. Tähän viittavia tuloksia on esitetty myös aiemmissa tutkimuksissa, kuten lähteessä Pihelo & Kalamees (2016).



Kuva 5.23. Eri höyrynsulkukerrosten vaikutus homeindeksien maksimiarvoihin tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homeutumisherkkyyssluokassa HHL2. Lämmöneristeinä on puukuitueriste. Rakennetyyppi on USP2. Rakennetyypin U-arvo on $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.



Kuva 5.24. Eri höyrynsulkukerrosten vaikutus homeindeksien maksimiarvoihin runkotalpan ulkonurkassa homeutumisherkkyyssluokassa HHL1. Lämmöneristeinä on puukuitueriste. Rakennetyyppi on USP2. Rakennetyypin U-arvo on $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

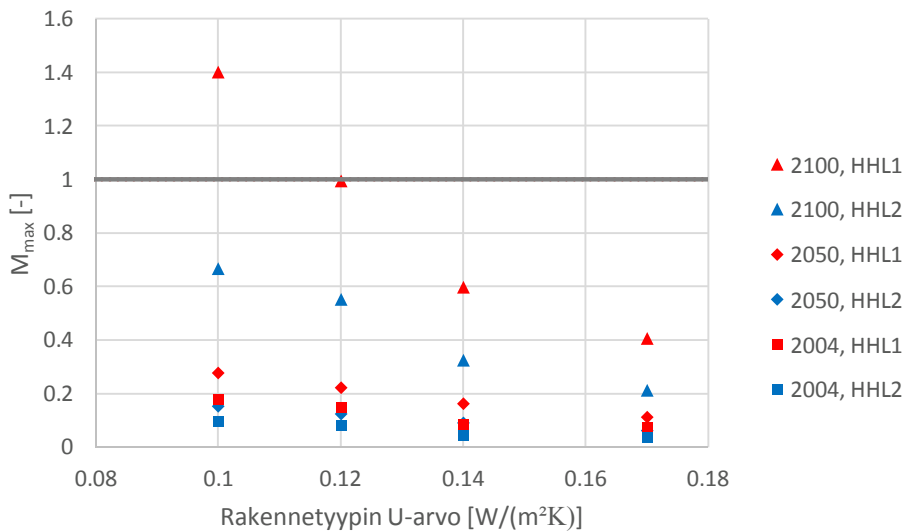
5.1.6 Tuulensuojakipsilevyn ulkopuolinen lisäeristys

Kuvassa 5.25 on esitetty tulokset rakennetyypeistä U-arvon mukaan, joissa tuulensuojakipsilevyn ulkopintaan on lisätty 25 mm paksu tuulensuojamineraalivilla. Lisäksi lisäeristetyissä rakennetyypeissä käytettiin 48 mm paksua tuuletusväliä, joka aiheutti suurempia homeindeksien maksimiarvoja kuin ohuemmat tuuletusvälit.

Tuloksista nähdään, että lämmöneristeiden lisääminen rakenteen ulkopintaan paransi huomattavasti sen lämpö- ja kosteusteknistä toimivuutta. Tuulensuojakipsilevyn sisä-

pinnassa homeindeksien maksimi-arvot pysyivät alle homeen kasvun alkamisen raja-arvon vielä vuoden 2100 ilmastossa rakennetyypin U-arvolla $0,10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, kun kipsilevyn homeutumisherkkyyssluokka oli HHL2. Homeutumisherkkyyssluokassa HHL1 homeen kasvun alkamisen raja-arvo ylittyi ainoastaan vuoden 2100 ilmastossa rakennetyypin U-arvon ollessa pienempi kuin $0,12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Runkotolpan ulkonurkassa arvot pysyivät hyvin lähellä nollaa. Tuulensuojamateriaalivillan lämmönvastus riitti pitämään rakenteen ulko-osien lämpötilat riittävän suurina, jolloin suhteellisen kosteuden arvot pysyivät alhaisina homeen kasvun kannalta myös tämän tutkimuksen matalaimpien U-arvojen rakennetyypeissä.



Kuva 5.25. Tuulensuojakipsilevyn ulkopinnassa olevan 25 mm paksun tuulensuojamateriaalivillan vaikutus homeindeksien maksimi-arvoihin tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homeutumisherkkyyssluokissa HHL1 ja HHL2. Tuuletusvälin paksuus on 48 mm. Rakennetyyppi on USP3.

5.1.7 Ilmavuodot

Rakennetyypin lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan vaikuttavien ilmavuotojen määrittämistä varten tutkittiin höyrynsulkumuovissa olevan raon leveyden vaikutusta homeindeksien maksimi-arvoihin. Raon ollessa molemmin puolin runkotolpan vieressä ja raon leveyden ollessa välillä 0,2-1,0 mm runkotolpan ulkonurkan homeindeksien maksimi-arvot vaihtelivat välillä 0,128-0,193 Jokioisen vuoden 2004 ilmastossa. Vastaavasti tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa arvot vaihtelivat välillä 0,471-0,545.

Suurin osa seinärakenteen yli vallitsevasta paine-eron muutoksesta tapahtui ilmavuodotomassa rakenteessa höyrynsulkumuovien kohdalla, koska höyrynsulkumuovilla on selvästi pienin ilmanläpäisevyys rakenteessa. Kun höyrynsulkumuovissa oli rako, suurin paineen muutos tapahtui tuulensuojakipsilevyn yli. Tämä johtui siitä, että tuulensuojakipsilevyllä oli seuraavaksi pienin ilmanläpäisevyys sekä siitä, että tuulensuojakerros oli

laskentamallissa muiden rakennekerrosten tavoin ideaalitiivis liittymäkohdistaan. Tällöin paine-erot höyrynsulkukerroksen yli olivat pieniä tuulensuojakerrokseen verrattuna. Kun höyrynsulkumuovissa olevan raon leveyttä kasvatettiin, raon kohdalla paine-ero höyrynsulkukerroksen yli pieneni, jolloin myös konvektiolla siirtyvän vesihöyryn määrä pinta-alaa kohden pieneni. Kokonaisilmavirta raon läpi kuitenkin kasvoi.

Tuulensuojakerroksessa olevia rakoja ei tämän tutkimuksen yhteydessä pystytty simuloimaan, koska laskenta hidastui merkittävästi. Tästä johtuen tässä tutkimuksessa tuulensuojakipsilevykerroksen epätiivistä liittymäpintojen asennusta tai epätiivittä lävistäviä liitoksia on mallinnettu pienentämällä tuulensuojakipsilevyn ilmanläpäisevyyttä, jolloin paine-erot höyrynsulkumuovissa olevan raon ylitse kasvoivat ja vesihöyryn konvektio raon läpi kasvoi. Koko tuulensuojakipsilevyn ilmanläpäisevyyttä pienentämällä ei voitu mallintaa tuulensuojakerroksessa olevia yksittäisiä rakoja, jotka ohjaisivat vuotoilmaa kohdennetummin vuotokohtien läheisyyteen.

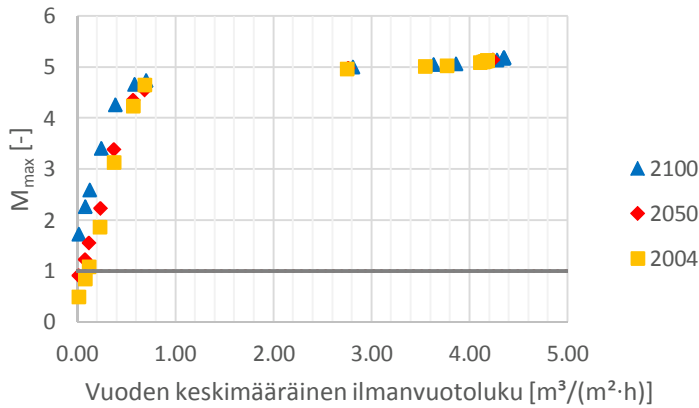
Muuttuvien paine-erojen vaikutus Jokioisen 2004 ilmastossa vastasi melko hyvin vakioilla 10 Pa sisäilman vakioylipaineella tehtyjä simuloitteja, kun tuulensuojakipsilevyn ilmanläpäisevyys oli lähtötietoina olevien materiaaliominaisuuksien mukainen. Myös käytetyt vakioylipaineet 5 Pa ja 15 Pa aiheuttivat 10 Pa ylipaineeseen verrattuna samoissa olosuhteissa homeindeksien maksimiarvoissa vain $\pm 0,02$ erot runkotolpan ulkonurkassa ja $\pm 0,01$ erot tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa. Erot homeindeksien maksimiarvoissa olivat eri ylipaineilla pieniä, koska tuulensuojakipsilevyn ilmanläpäisevyys oli niin pieni, että suurin osa rakenteen yli tapahtuvasta paineen muutoksesta tapahtui tuulensuojakipsilevyn kohdalla. Paine-eron muutoksella ei siten ollut suurta vaikutusta höyrynsulkumuovissa olevan raon kautta siirtyvään ilmamäärään.

Höyrynsulkumuovissa olevan raon leveydeksi valittiin mahdollisimman pieni, jossa laskenta-ajat olivat kohtuulliset. Tästä johtuen raon leveydeksi valittiin 0,3 mm. Koska tuulensuojakipsilevyn ilmanläpäisevyyksiä varioitiin, ei raon leveyden valinnalla oletettu olevan merkittävää vaikutusta homeindeksien maksimiarvoihin.

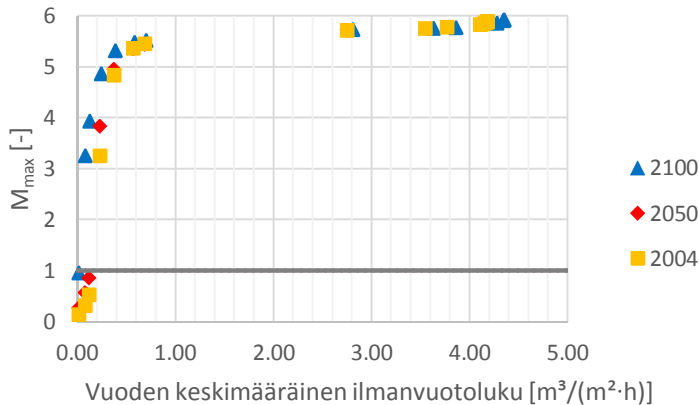
Kuvissa 5.26 ja 5.27 on esitetty tulokset puuverhotun perusrakennetyypin tapauksesta. Kuvista nähdään, että jo pienillä ilmanvuotomäärillä homeindeksien maksimiarvot nousevat korkeiksi (lähelle asteikon ylärajaa). Suurin homeindeksien maksimien nousu tapahtui jo alle $1,0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ olevilla ilmavuotomäärillä.

Runkotolpan ulkonurkan homeindeksien maksimiarvot nousivat tuulensuojakipsilevyn sisäpintaa nopeammin korkeiksi, kun ilmavuotomäärää kasvatettiin. Tämä osaltaan johtui siitä, että ilmavuotokohta oli juuri runkotolpan sisänurkan kohdalla. Lisäksi kuvista voidaan huomata, että homeindeksien maksimiarvot nousevat yli viiden ja runkotolpan ulkonurkassa jo lähelle kuutta, joka on asteikon suurin arvo.

Ilmastonmuutosta kuvaavien testivuosien väliset erot eivät näytä tulosten perusteella olevan merkittäviä etenkin suuremmilla ilmavuotomäärillä. Alle $1,0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ suuruisilla ilmavuotomäärillä vuoden 2100 ilmastossa homeindeksien maksimi-arvot nousivat kuitenkin nykyilmastoa ja vuoden 2050 ilmastoa suuremmiksi samoilla ilmavuotomäärillä.



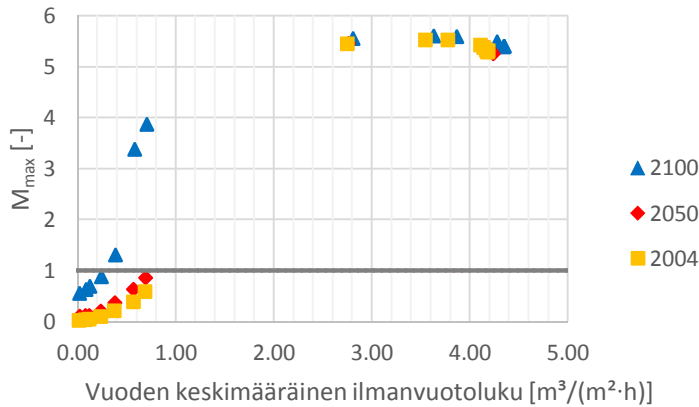
Kuva 5.26. Ilmavuotojen vaikutus homeindeksien maksimi-arvoihin tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homehtumisherkkyysluokassa HHL2 vuoden keskimääräisen ilmanvuotoluvun $\overline{q_{50}}$ funktiona. Rakennetyyppi on USP1. Rakennetyypin U-arvo on $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.



Kuva 5.27. Ilmavuotojen vaikutus homeindeksien maksimi-arvoihin runkotolpan ulkonurkassa homehtumisherkkyysluokassa HHL1 vuoden keskimääräisen ilmanvuotoluvun $\overline{q_{50}}$ funktiona. Rakennetyyppi on USP1. Rakennetyypin U-arvo on $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Tarkastelupiste on samassa runkotolpassa, jonka sisänurkan vieressä ilmavuotokohta on.

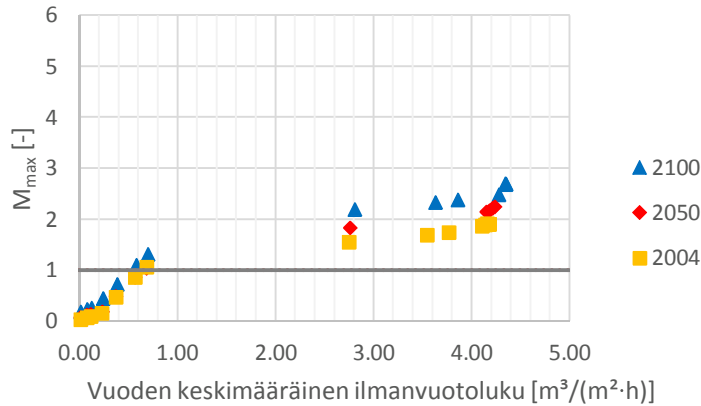
Kuvassa 5.28 on esitetty kuvaan 5.27 verrattuna vastaavat tulokset, mutta tarkastelupiste on ilmavuotokohdan viereinen runkotolppa. Tuloksista nähdään, että paikalliset ilmavuodot eivät vaikuttaneet yhtä paljon vuotokohdan viereiseen runkotolppaan, joka oli 600 mm etäisyydellä vuotokohdasta, kuin vuotokohdassa olevaan runkotolppaan. Vuotoilmamäärien kasvaessa myös viereisen runkotolpan homeindeksien maksimi-arvot

nousivat selvästi. Nykyilmastossa ja vuoden 2050 ilmastossa ilmavuotojen määrän ollessa lähellä arvoa $0,8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ homeindeksien maksimiarvot pysyivät vielä alle homeen kasvun alkamisen raja-arvon. Vuoden 2100 ilmastossa sen sijaan homeindeksin maksimiarvot nousivat jo pienemmillä ilmavuotomäärillä yli homeen kasvun alkamisen raja-arvon ja selvästi suuremmiksi kuin muissa ilmastoissa. Erot tasoittuivat suuremmilla ilmavuotomäärillä.



Kuva 5.28. Ilmavuotojen vaikutus homeindeksien maksimiarvoihin ilmavuotokohdan viereisen runkotolpan ulkonurkassa homeutumisherkkyysluokassa HHL1 vuoden keskimääräisen ilmanvuotoluvun $\overline{q_{50}}$ funktiona. Rakennetyyppi on USP1. Rakennetyypin U -arvo on $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Kuvassa 5.29 on esitetty tulokset tuulensuojakipsilevyn sisäpinnasta homeutumisherkkyysluokassa HHL3. Tuloksista nähdään, että kipsilevyn homeutumisherkkyuden vähentäminen pienensi selvästi homeindeksien maksimiarvoja. Homeindeksien maksimiarvot pysyivät ilmavuotomäärien kasvaessa pidempään homeen kasvun alkamisen raja-arvon alapuolella homeutumisherkkyysluokkaan HHL2 verrattuna. Lisäksi suurimmilla tarkastelluilla ilmavuotomäärillä homeindeksien maksimiarvot jäivät paljon pienemmiksi. Kipsilevyn homeutumisherkkyuden muutos ei kuitenkaan vaikuta runkotolpan ulkonurkan tuloksiin, jossa homeindeksin maksimiarvot olivat lähellä asteikon ylärajaa jo pienillä ilmavuotomäärillä.

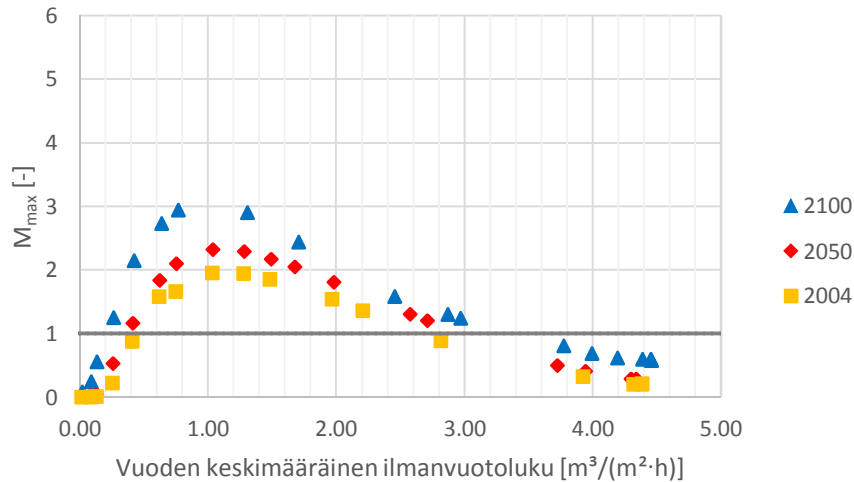


Kuva 5.29. Ilmavuotojen vaikutus homeindeksien maksimiarvoihin tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homeutumisherkkyysluokassa HHL3 vuoden keskimääräisen ilmanvuotoluvun $\overline{q_{50}}$ funktiona. Rakennetyyppi on USP1. Rakennetyypin U-arvo on $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

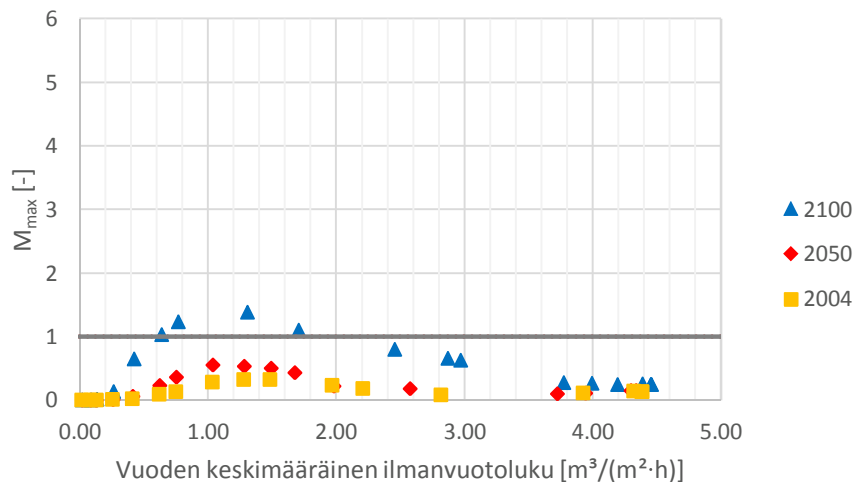
Kun tuulensuojakipsilevyn ulkopinnassa käytettiin 50 mm paksua lisäeristettä, parani myös ilmavuototapauksissa rakennetyypin toiminta. Tämän nähdään kuvista 5.30 ja 5.31, joissa on esitetty lisäeristetyn rakenteen tulokset ilmavuototapauksessa.

Tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homeindeksien maksimiarvot nousivat edelleen yli homeen kasvun alkamisen raja-arvon jo suhteellisen pienillä ilmavuotomäärillä mutta eivät ilmavuotomäärien lisääntyessä jatkaneet kasvua, vaan pienenivät suurimmilla tutkituilla ilmavuotomäärillä jopa lähelle nollaa. Tähän on voinut vaikuttaa paljon se, että tuulensuojakipsilevyn ja lisäeristeen ilmanläpäisevyyksiä on muutettu reilusti verrattuna lähtötietoina olevien materiaaliominaisuuksien mukaisiin arvoihin, joten nämä tulokset eivät välttämättä kuvaa kovin hyvin todellista tilannetta.

Runkotolpan ulkonurkassa homeindeksien maksimiarvot pienenivät merkittävästi varsinkin pienillä ilmavuotomäärillä, eikä tulosten mukaan homeindeksien maksimiarvot ylittäneet nykyilmastossa eikä vuoden 2050 ilmastossa homeen kasvun alkamisen raja-arvoa yksi. Vuoden 2100 ilmastossa homeindeksien maksimiarvot sen sijaan nousivat hieman yli yhden. Ilmavuotokohdan viereisen runkotolpan ulkonurkan homeindeksien maksimiarvot olivat lähellä nollaa tai pieniä kaikilla tarkastelluilla ilmavuotomäärillä nykyilmastossa sekä vuoden 2050 ilmastossa. Vuoden 2100 ilmastossa arvot sen sijaan nousivat yli yhden (enimmillään noin 1,3) yli $2 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ olevilla ilmavuotomäärillä.

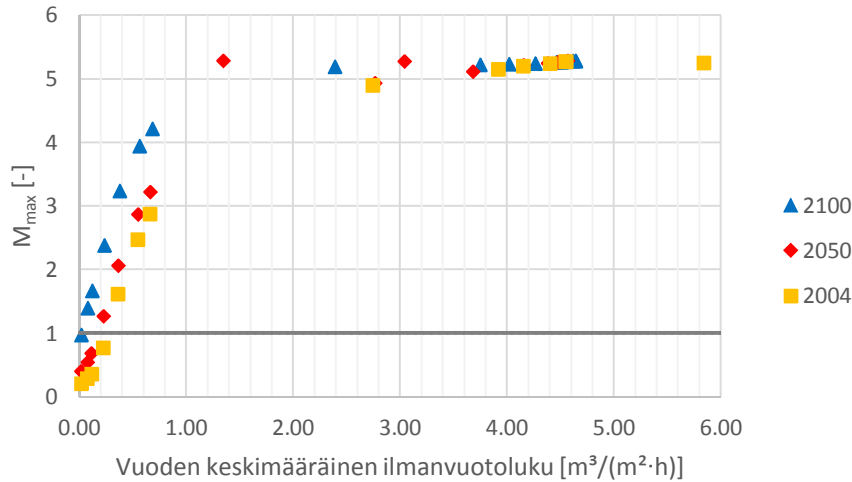


Kuva 5.30. Ilmavuotojen vaikutus homeindeksien maksimiarvoihin tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homeutumisherkkyyssuokassa HHL2 vuoden keskimääräisen ilmanvuotoluvun $\overline{q_{50}}$ funktiona, kun tuulensuojakipsilevyn ulkopinnassa on lisäeristeenä 50 mm paksu tuulensuojamineraalivilla. Rakennetyyppi on USP3. Rakennetyypin U-arvo on $0,13 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

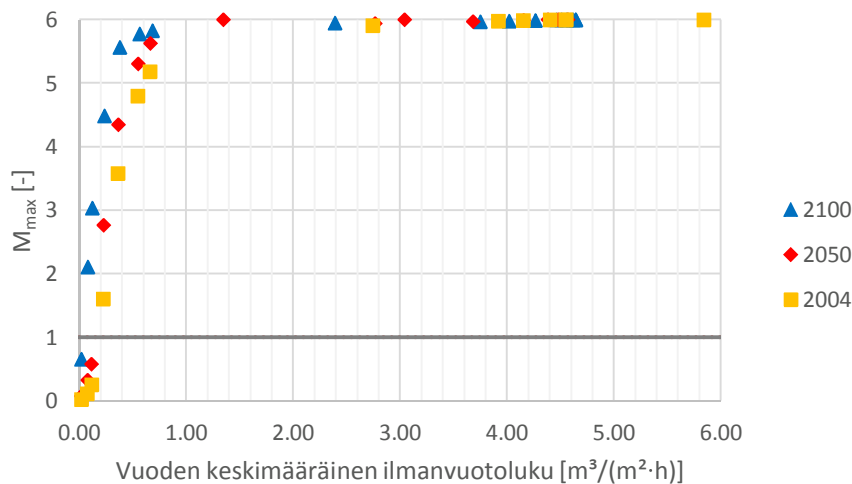


Kuva 5.31. Ilmavuotojen vaikutus homeindeksien maksimiarvoihin runkotolpan ulkonurkassa homeutumisherkkyyssuokassa HHL1 vuoden keskimääräisen ilmanvuotoluvun $\overline{q_{50}}$ funktiona, kun tuulensuojakipsilevyn ulkopinnassa on lisäeristeenä 50 mm paksu tuulensuojamineraalivilla. Rakennetyyppi on USP3. Rakennetyypin U-arvo on $0,13 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Kuvissa 5.32 ja 5.33 on esitetty tulokset rakennetyypistä, jossa lämmöneristeenä on käytetty mineraalivillan sijaan puukuitueristettä. Tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homeindeksien maksimiarvot olivat puukuitueristeen kanssa hyvin samanlaiset mineraalivillaeristeisen rakennetyypin kanssa. Runkotolpan ulkonurkassa puukuitueristeisessä rakennetyypissä homeindeksien maksimiarvot nousivat jo maksimitasolle ilmavuotomäärien ollessa noin $1,0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$.

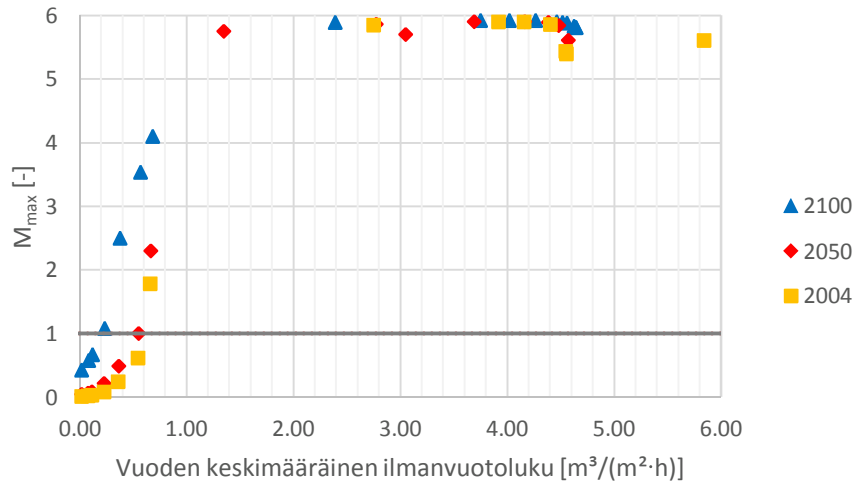


Kuva 5.32. Ilmavuotojen vaikutus homeindeksien maksimiarvoihin tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homeutumisherkkyysluokassa HHL2 vuoden keskimääräisen ilmanvuotoluvun $\overline{q_{50}}$ funktiona. Lämmöneristeenä on puukuitueriste. Rakennetyyppi on USP2. Rakennetyypin U-arvo on $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.



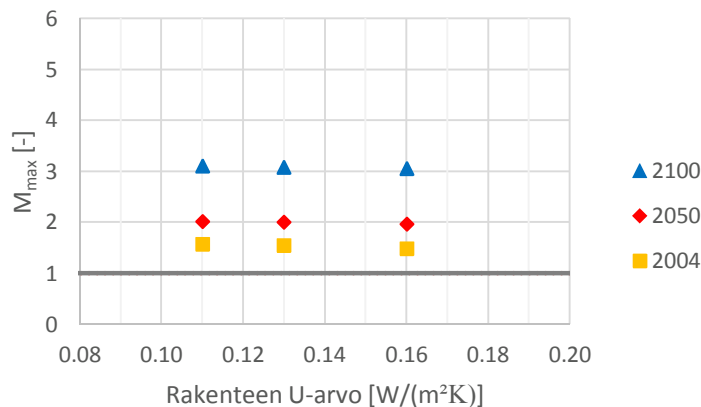
Kuva 5.33. Ilmavuotojen vaikutus homeindeksien maksimiarvoihin runkotolpan ulkonurkassa homeutumisherkkyysluokassa HHL1 vuoden keskimääräisen ilmanvuotoluvun $\overline{q_{50}}$ funktiona. Lämmöneristeenä on puukuitueriste. Rakennetyyppi on USP2. Rakennetyypin U-arvo on $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Kuvan 5.34 mukaan ilmavuotokohdan viereisen runkotolpan homeindeksien maksimiarvot nousivat puukuitueristeen kanssa vastaavasti kuin mineraalivillalla eristetyssä rakennetyypissä yli homeen kasvun alkamisen raja-arvon yksi jo pienillä ilmavuotomäärillä. Puukuitueristeestä ei siis näytä tulosten perusteella olevan etua mineraalivillan nähden, mikäli rakenteeseen on ilmavuotoja.

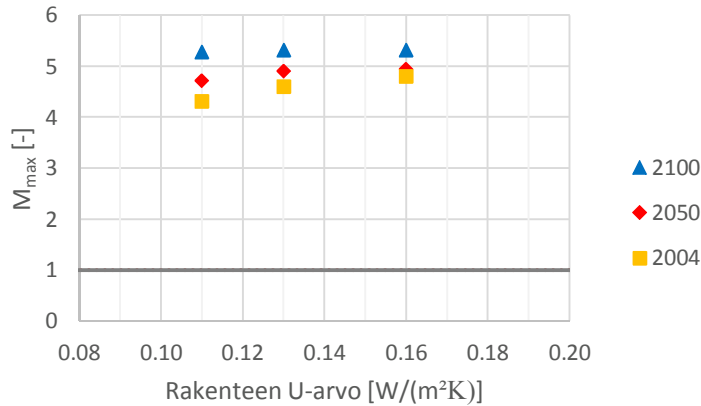


Kuva 5.34. Ilmavuotojen vaikutus homeindeksien maksimiarvoihin ilmavuotokohdan viereisen runkotolpan ulkonurkassa homehtumisherkkyysluokassa HHL1 vuoden keskimääräisen ilmanvuotoluvun $\overline{q_{50}}$ funktiona. Lämmöneristänä on puukuitueriste. Rakennetyyppi on USP2. Rakennetyypin U-arvo on $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Kuvissa 5.35 ja 5.36 on esitetty rakennetyypin U-arvon vaikutus ilmavuototapausten homeindeksien maksimiarvoihin. Tulosten mukaan paksumpi eristekerros ei heikentänyt ilmavuototapauksissa rakennetyypin lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa tutkitulla ilmavuotomäärällä. Tämä johtui luultavasti siitä, että ilmavuotojen aiheuttamat homeindeksien maksimiarvojen nousulla on määräävä vaikutus rakenteiden toimintaan. Simulointitapauksissa tuulensuojakipsilevyn ilmanläpäisevyys pidettiin samana kaikissa eri U-arvon rakennetyypeissä. Trendit pysyivät samanlaisina sekä mineraalivillan että puukuitueristeen kanssa.



Kuva 5.35. Rakennetyypin U-arvon vaikutus homeindeksien maksimiarvoihin tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homehtumisherkkyysluokassa HHL2, kun rakenteessa on ilmavuoto. Rakennetyyppi on USP1.



Kuva 5.36. Rakennetyypin U -arvon vaikutus homeindeksien maksimiarvoihin runkotolpan ulkonurkassa homeutumisherkkyyssluokassa HHL1, kun rakenteessa on ilmavuoto. Rakennetyyppi on USPI.

Ilmavuodollisissa rakenteissa tulokset kuvaavat ensisijaisesti rakennetyypin herkkyyttä homeen kasvulle ilmavuototapauksissa. Todellisissa rakenteissa olevia ilmavuotoja ei ollut tiedossa. Tämän tutkimuksen menetelmällä voitiin kuitenkin tarkastella eri rakennetyypien trendejä, herkkyyksiä ja eroja ilmavuototapauksissa.

5.1.8 Kuivuminen

Kuivumista tutkittiin eri höyrynsulkukerroksilla sekä mineraalivilla- että puukuitueristeisillä rakennetyypeillä. Lämmöneristekerrosten alkukosteuksina käytettiin taulukoiden 5.1 ja 5.2 mukaisia arvoja. Alkutilanteiden suhteellisten kosteuksien tunnukset ovat etuliitteellä MC (moisture content). Rakenteiden kuivumista eri lämmöneristekerroksilla ei voida suoraan vertailla keskenään niiden eri kosteuspitoisuuksista johtuen, vaan kuivumista tarkasteltiin eri höyrynsulkukerrosten kanssa samalla lämmöneristeellä.

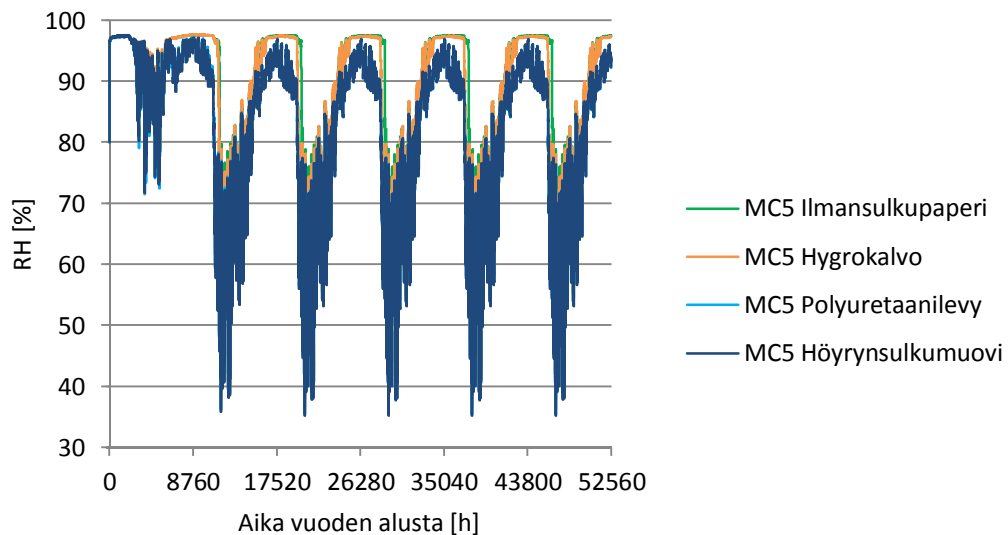
Taulukko 5.1. Mineraalivillaeristeisten rakennetyyppien lämmöneristekerroksen alkukosteuspitoisuudet kuivumistarkasteluissa.

Mineraalivilla	Suhteellinen kosteus RH [%]	Kosteuspitoisuus [kg/m ³]
MC1	80.0000	0.98
MC2	97.0387	15
MC3	97.0694	25
MC4	97.1000	35
MC5	97.1461	50

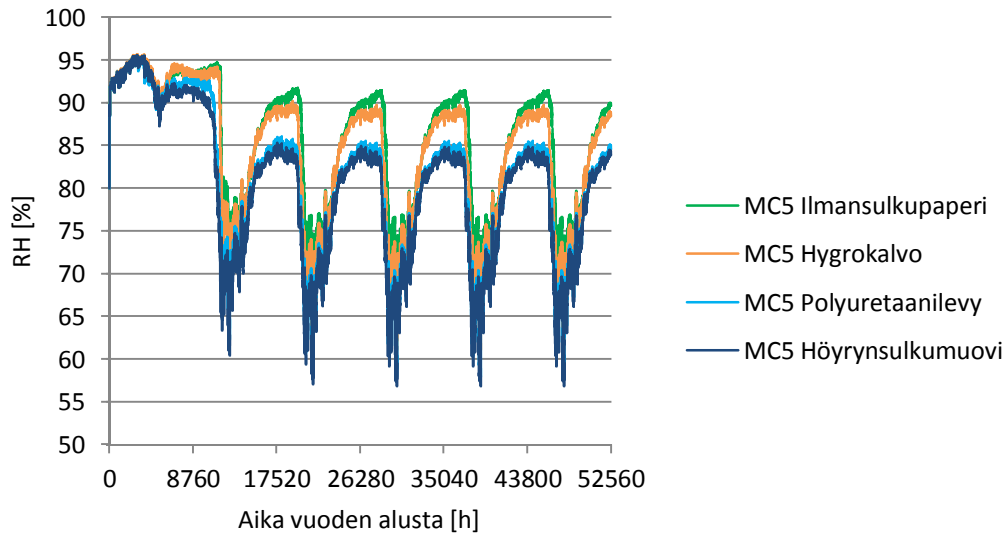
Taulukko 5.2. Puukuitueristeisten rakennetyyppien lämmöneristekerroksen alkukosteuspitoisuudet kuivumistarkasteluissa.

Puukuitueriste	Suhteellinen kosteus RH [%]	Kosteuspitoisuus [kg/m ³]
MC1	80.00	9.7
MC2	90.00	17.1
MC3	97.00	24.7
MC4	98.00	32.8
MC5	99.00	42.2

Kuvissa 5.37 ja 5.38 on esitetty eri höyrinsulkukerrostojen vaikutus tarkastelupisteiden suhteelliseen kosteuteen mineraalivillaeristetyn ja puuverhotun perusrakennetyypin tapauksessa. Kuvista nähdään silmämääräisesti, että olosuhteet rakenteessa tasaantuivat kahden vuoden aikana. Vesihöyryä läpäisevimmillä höyrinsulkukerroksilla suhteellinen kosteus pysyi talviaikana melko tasaisesti hyvin korkeana, koska mineraalivillan hygroskooppisen tasapainokosteuskäyrän mukaan kosteuspitoisuus nousee jyrkästi tietyn suhteellisen kosteuden jälkeen. Vesihöyrytiiviimmillä höyrinsulkukerroksilla suhteellisen kosteuden kuvaajat olivat muodoltaan terävämpiä, koska höyrinsulut eivät päästäneet sisäilmasta niin paljoa kosteutta rakenteeseen kuin vesihöyryavoimemmat höyrinsulut. Vesihöyryä läpäisevämmillä höyrinsulkukerroksilla myös runkotolpan ulkonurkka pysyi kosteampana kuin vesihöyrytiiviimmillä kerroksilla.

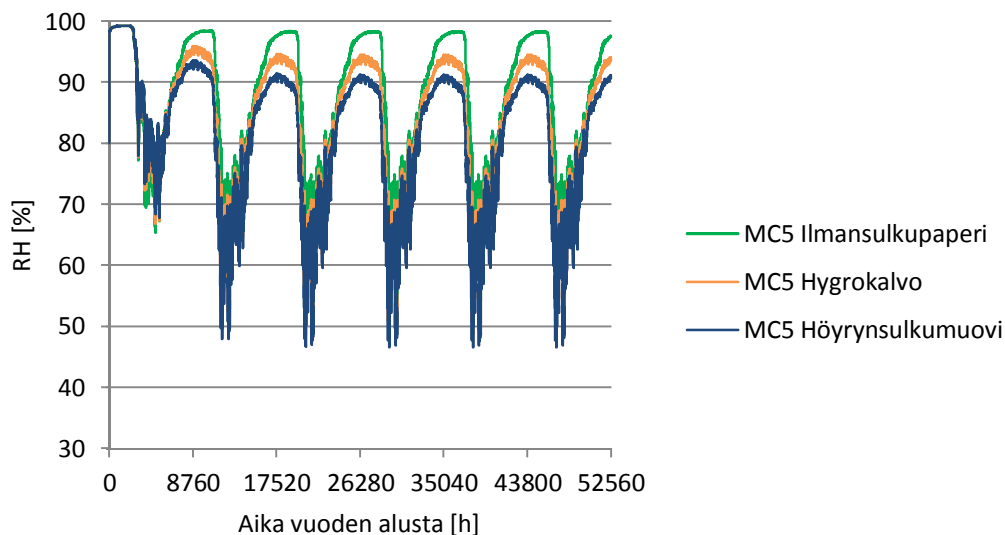


Kuva 5.37. Suhteellisen kosteuden arvot tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa eri höyrinsulkukerroksilla Jokioisen vuoden 2004 ilmastossa. Rakennetyypit ovat USP1 ja USP5. Rakennetyyppien U-arvot ovat 0,16 W/(m²·K).

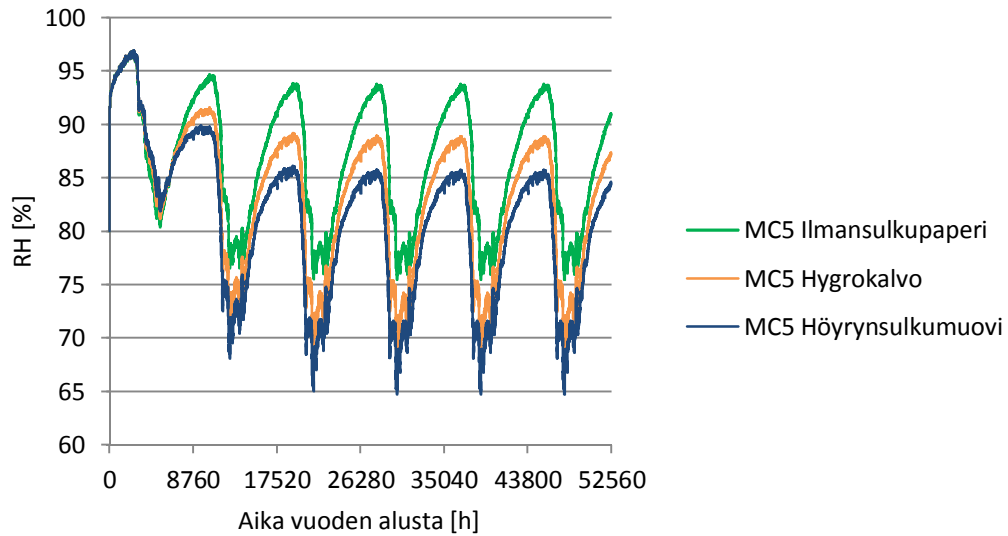


Kuva 5.38. Suhteellisen kosteuden arvot runkotolpan ulkonurkassa eri höyrynsulkukerroksilla Jokioisen vuoden 2004 ilmastossa. Rakennetyypit ovat USP1 ja USP5. Rakennetyyppien U-arvot ovat $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Kuvissa 5.39 ja 5.40 on esitetty edellisiin kuvaajiin verrattuna vastaavat tulokset rakennetyypillä, jossa lämmöneristeenä on puukuitueriste. Puukuitueristeen kosteuskapasiteetti tasoitti kosteuspiikkejä, jolloin suhteellisen kosteuden kuvaajat olivat loivempia mineraalivillaan verrattuna. Vesihöyrytiiviimpien höyrynsulkukerrostojen kanssa suhteellisen kosteuden arvot olivat pienempiä myös puukuitueristeisessä rakennetyypissä. Olosuhteet rakenteissa tasaantuivat mineraalivillallisten rakennetyyppien tavoin kahden vuoden aikana.

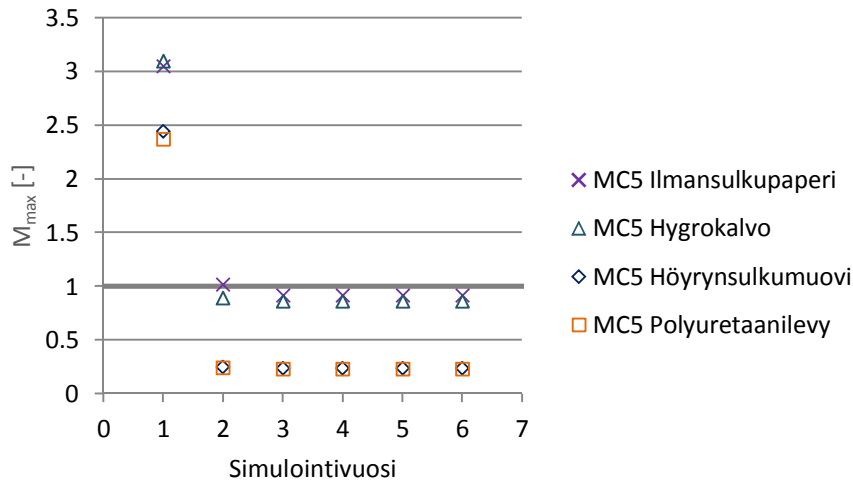


Kuva 5.39. Suhteellisen kosteuden arvot tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa eri höyrynsulkukerroksilla Jokioisen vuoden 2004 ilmastossa. Lämmöneristeenä on puukuitueriste. Rakennetyyppi on USP2. Rakennetyypin U-arvo on $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

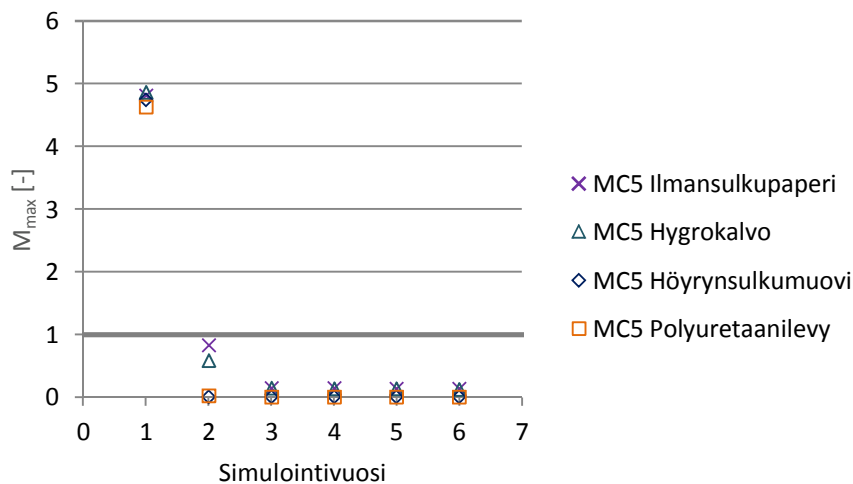


Kuva 5.40. Suhteellisen kosteuden arvot runkotolpan ulkonurkassa eri höyrinsulkukerroksilla Jokioisen vuoden 2004 ilmastossa. Lämmöneristeenä on puukuitueriste. Rakennetyyppi on USP2. Rakennetyypin U-arvo on $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

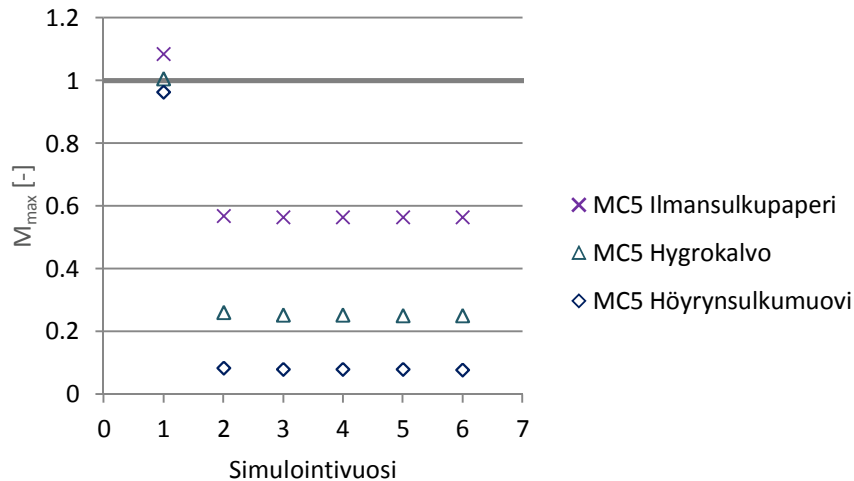
Kuvista 5.41-5.50 nähdään jokaisen simulointivuoden alusta lasketut homeindeksien maksimi-arvot sekä mineraalivillan että puukuitueristeen tapauksissa. Molempien lämmöneristeen rakennetyypeissä jo toisen vuoden simuloinnin tulokset vastasivat silmämääräisesti tasaantuneita olosuhteita. Ensimmäisen vuoden aikana homeindeksien maksimi-arvot sen sijaan olivat suurempia tasaantuneisiin olosuhteisiin nähden. Sekä mineraalivilla- että puukuitueristetyissä rakennetyypeissä U-arvon vertailuarvon mukaisilla rakennetyypeillä korkean vesihöyrynvastuksen höyrinsulkukerrokset toimivat paremmin kuin vesihöyryä läpäisevämmät höyrinsulkukerrokset.



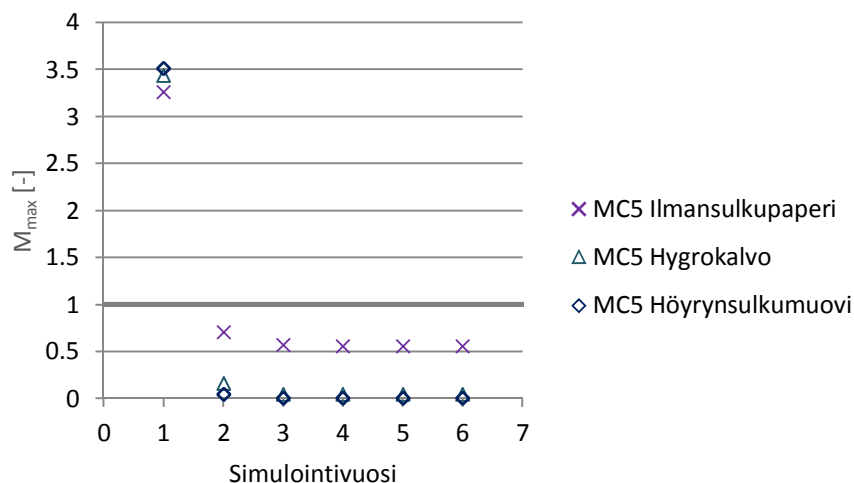
Kuva 5.41. Homeindeksien maksimi-arvot tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homeutumisherkkyysluokassa HHL2 eri höyrynsulkukerroksilla Jokioisen vuoden 2004 ilmastossa. Homeindeksien maksimi-arvot on laskettu jokaisen simulointivuoden alusta. Rakennetyypit ovat USP1 ja USP5. Rakennetyyppien U -arvot ovat $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.



Kuva 5.42. Homeindeksien maksimi-arvot tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homeutumisherkkyysluokassa HHL2 eri höyrynsulkukerroksilla Jokioisen vuoden 2004 ilmastossa. Homeindeksien maksimi-arvot on laskettu jokaisen simulointivuoden alusta. Rakennetyypit ovat USP1 ja USP5. Rakennetyyppien U -arvot ovat $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.



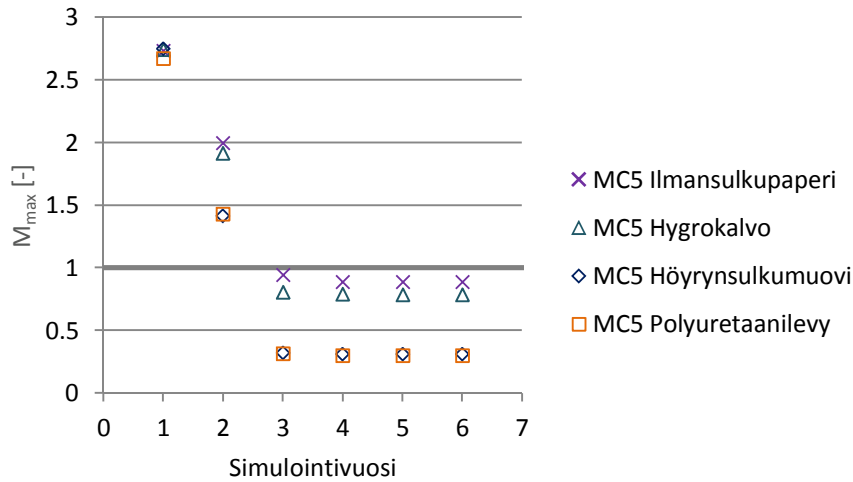
Kuva 5.43. Homeindeksien maksimi-arvot tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homeutumisherkkyysluokassa HHL2 eri höyrynsulkukerroksilla Jokioisen vuoden 2004 ilmastossa. Lämmöneristeenä on puukuitueriste. Homeindeksien maksimi-arvot on laskettu jokaisen simulointivuoden alusta. Rakennetyyppi on USP2. Rakennetyypin U-arvo on $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.



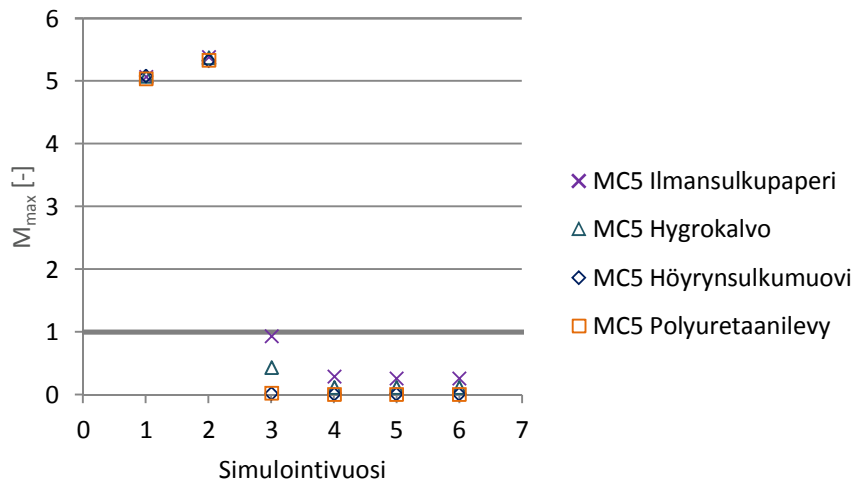
Kuva 5.44. Homeindeksien maksimi-arvot runkotolpan ulkonurkassa homeutumisherkkyysluokassa HHL2 eri höyrynsulkukerroksilla Jokioisen vuoden 2004 ilmastossa. Lämmöneristeenä on puukuitueriste. Homeindeksien maksimi-arvot on laskettu jokaisen simulointivuoden alusta. Rakennetyyppi on USP2. Rakennetyypin U-arvo on $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Molemmilla lämmöneristeillä rakennetyyppien U-arvon pienentäminen näkyi hidastuneena kuivumisena. Kuvista 5.45-5.48 nähdään, että paksummalla lämmöneristekerroksella toisen vuoden homeindeksien maksimi-arvot eivät vielä olleet tasaantuneiden olosuhteiden mukaisia. Alhaisemmilla alkukosteuspitoisuuksilla toisen vuoden tulokset olivat lähellä tasaantuneita olosuhteita. U-arvon vertailuarvon mukaisella rakenteilla sen sijaan jo toisen vuoden homeindeksien maksimi-arvot olivat tasaantuneet kaikilla tutkituilla alkukosteuspitoisuuksilla. Tulevaisuuden ilmastojen vaikutus ei näkynyt merkittä-

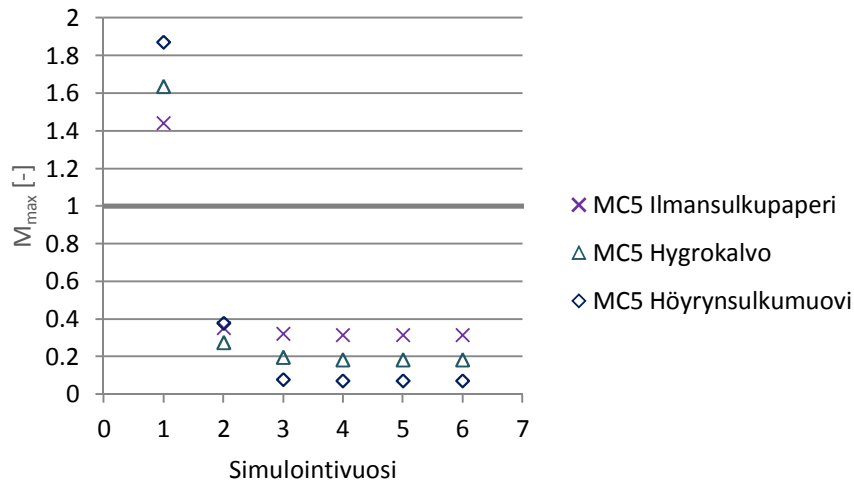
västi rakenteiden hidastuneena kuivumisena, kun tarkasteltiin simulointivuosittain laskettuja homeindeksien maksimiarvoja.



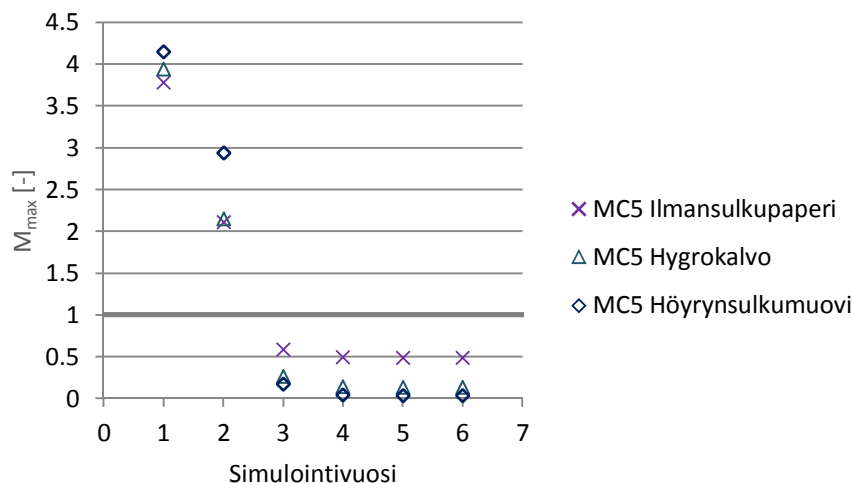
Kuva 5.45. Homeindeksien maksimiarvot tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homeutumisherkkyysluokassa HHL2 eri höyrynsulkukerroksilla Jokioisen vuoden 2004 ilmastossa. Homeindeksien maksimiarvot on laskettu jokaisen simulointivuoden alusta. Rakennetyypit ovat USP1 ja USP5. Rakennetyyppien U -arvot ovat $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.



Kuva 5.46. Homeindeksien maksimiarvot runkotolpan ulkonurkassa homeutumisherkkyysluokassa HHL1 eri höyrynsulkukerroksilla Jokioisen vuoden 2004 ilmastossa. Homeindeksien maksimiarvot on laskettu jokaisen simulointivuoden alusta. Rakennetyypit ovat USP1 ja USP5. Rakennetyyppien U -arvot ovat $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.



Kuva 5.47. Homeindeksien maksimi-arvot tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homeutumisherkkyysluokassa HHL2 eri höyrynsulkukerroksilla Jokioisen vuoden 2004 ilmastossa. Lämmöneristeenä on puukuitueriste. Homeindeksien maksimi-arvot on laskettu jokaisen simulointivuoden alusta. Rakennetyyppi on USP2. Rakennetyypin U -arvo on $0,12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

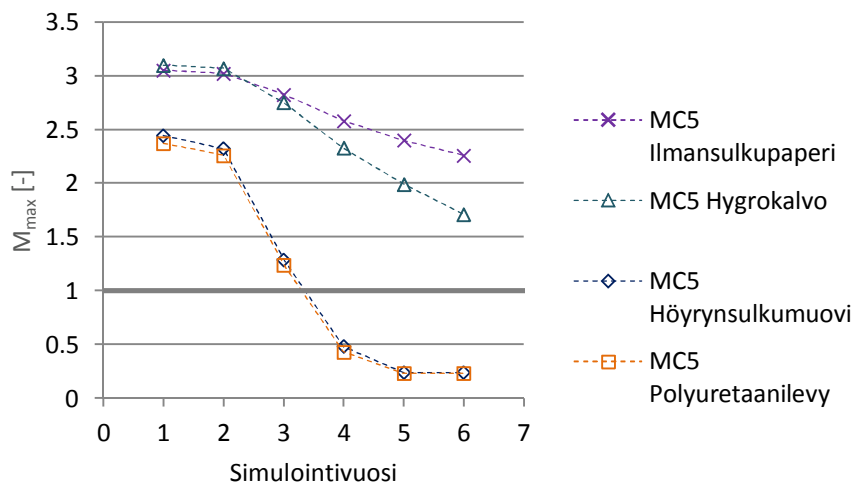


Kuva 5.48. Homeindeksien maksimi-arvot runkotolpan ulkonurkassa homeutumisherkkyysluokassa HHL1 eri höyrynsulkukerroksilla Jokioisen vuoden 2004 ilmastossa. Lämmöneristeenä on puukuitueriste. Homeindeksien maksimi-arvot on laskettu jokaisen simulointivuoden alusta. Rakennetyyppi on USP2. Rakennetyypin U -arvo on $0,12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

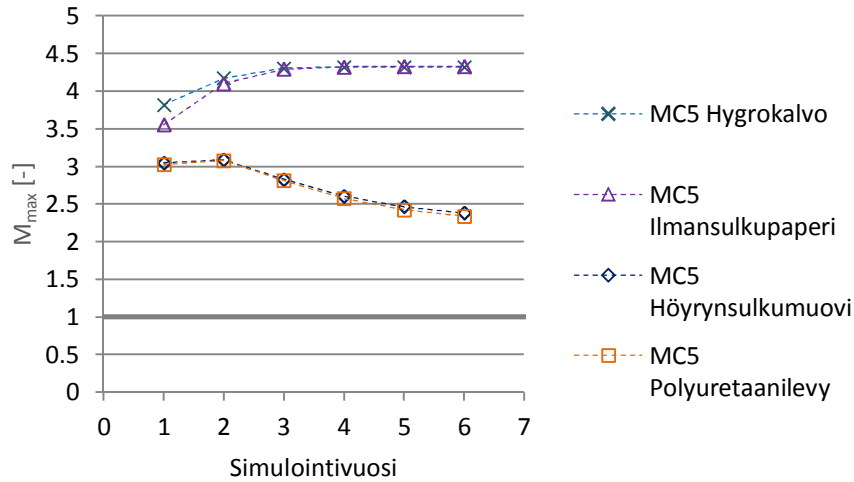
Kuvissa 5.49-5.53 homeindeksien maksimi-arvot on laskettu jatkuvina simuloinnin alusta lähtien. Tällöin uuden simulointivuoden homeindeksin laskenta lähtee liikkeelle edellisen vuoden tilanteesta, jossa homeindeksin arvo voi poiketa nolasta. Jatkuvan homeindeksin laskentaan täytyy kuitenkin suhtautua kriittisesti, koska pidemmän aikavälin homeindeksien laskenta voi sisältää paljon enemmän virhettä kuin lyhyemmän ajan las-

kenta. Toisaalta kuivumistarkasteluissa todellinen tilanne ei välttämättä ole myöskään se, että homeen kasvu olisi täysin taantunutta, vaan tilanne on jotain siltä väliltä.

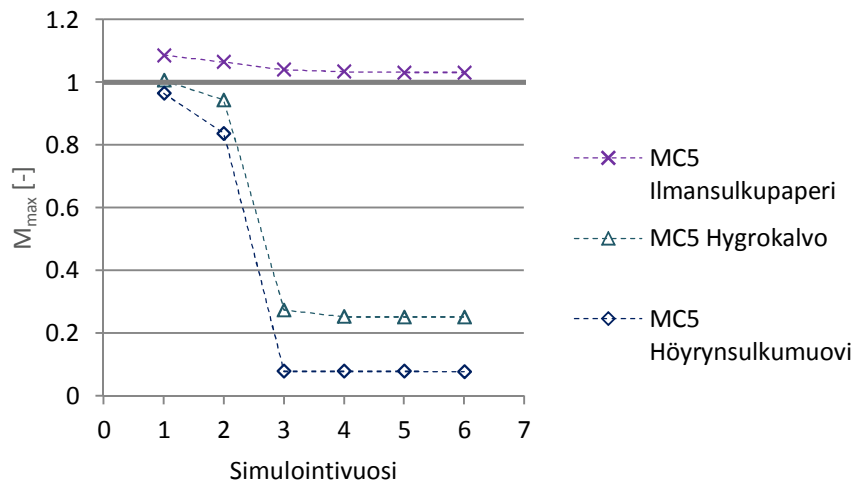
Kuvista huomataan, että taantumaa ei välttämättä ole riittävästi, jotta homeindeksien maksimi-arvot tasaantuisivat simulointivuosittain laskettujen homeindeksien maksimien tasoille. Lisäksi sekä mineraalivillan että puukuitueristeen kanssa homeindeksien maksimi-arvot taantuivat voimakkaammin suuren vesihöyrynvastuksen höyrynsulkukerroksilla. Tämä on havaittavissa etenkin vuoden 2100 ilmastossa, jossa taantumaa ei ollut nykyilmastoon nähden yhtä paljon.



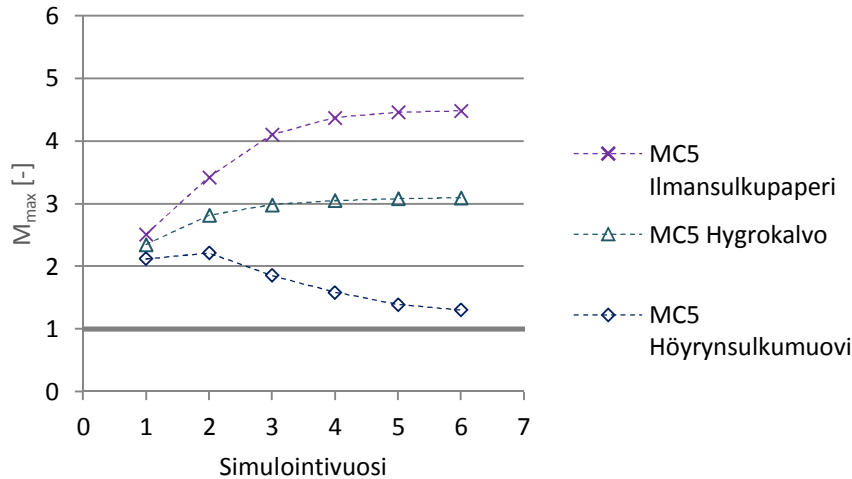
Kuva 5.49. Homeindeksien maksimi-arvot tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homehtumisherkkyysluokassa HHL2 eri höyrynsulkukerroksilla Jokioisen vuoden 2004 ilmastossa. Homeindeksien maksimi-arvot on laskettu jatkuvana simuloinnin alusta. Rakennetyypit ovat USP1 ja USP5. Rakennetyyppien U-arvot ovat $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.



Kuva 5.50. Homeindeksien maksimi-arvot tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homeutumisherkkyysluokassa HHL2 eri höyrynsulkukerroksilla Jokioisen vuoden 2100 ilmastossa. Homeindeksien maksimi-arvot on laskettu jatkuvana simuloinnin alusta. Rakennetyypit ovat USP1 ja USP5. Rakennetyyppien U-arvot ovat $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

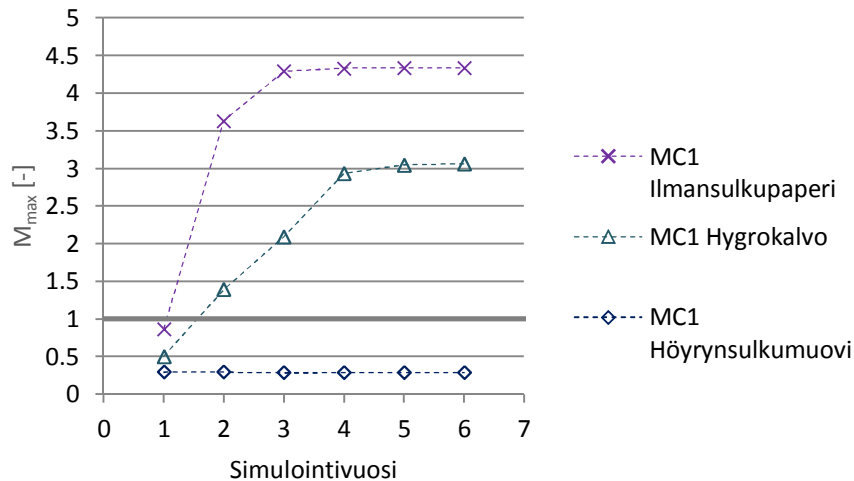


Kuva 5.51. Homeindeksien maksimi-arvot tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homeutumisherkkyysluokassa HHL2 eri höyrynsulkukerroksilla Jokioisen vuoden 2004 ilmastossa. Lämmöneristeenä on puukuitueriste. Homeindeksien maksimi-arvot on laskettu jatkuvana simuloinnin alusta. Rakennetyyppi on USP2. Rakennetyypin U-arvo on $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.



Kuva 5.52. Homeindeksien maksimi-arvot tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homeutumisherkkyysluokassa HHL2 eri höyrynsulkukerroksilla Jokioisen vuoden 2100 ilmastossa. Lämmöneristeenä on puukuitueriste. Homeindeksien maksimi-arvot on laskettu jatkuvana simuloinnin alusta. Rakennetyyppi on USP2. Rakennetyypin U-arvo on $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Kuvassa 5.53 on esitetty alkukosteudesta 80 % RH lähteneessä rakenteessa jatkuvan homeindeksin laskennalla saadut tulokset puukuitueristeisestä rakennetyypistä runkotolpan ulkonurkasta. Kuvasta huomataan, että vesihöyryä läpäisevimmillä ilmansulkukerroksilla homeen kasvu ei vuoden 2100 ilmastossa taantunut. Höyrynsulkumuovilla sen sijaan homeindeksien arvot pysyivät samoina simuloinnin alusta lähtien. Nykyilmastossa ja vuoden 2050 ilmastossa ilmansulkupaperin homeindeksin arvot pysyivät homeen kasvun alkamisen raja-arvon alapuolella kuuden simulointivuoden aikana runkotolpan ulkonurkassa, mutta tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa ilmansulkupaperin kanssa homeindeksin maksimi-arvot nousivat kuuden vuoden aikana lähelle arvoa kaksi jo vuoden 2050 ilmastossa. Myös mineraalivillalla eristetyssä rakennetyypissä tapahtui sama ilmiö vuoden 2100 ilmastossa kuin kuvassa 5.53.

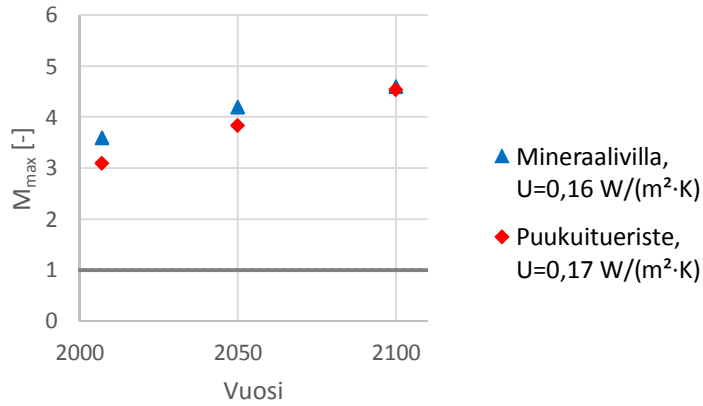


Kuva 5.53. Homeindeksien maksimi-arvot runkotolpan ulkonurkassa homehtumisherkkyysluokassa HHL1 eri höyrynsulkukerroksilla Jokioisen vuoden 2100 ilmastossa. Lämmöneristeinä on puukuitueriste. Homeindeksien maksimi-arvot on laskettu jatkuvana simuloinnin alusta. Rakennetyyppi on USP2. Rakennetyypin U-arvo on $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

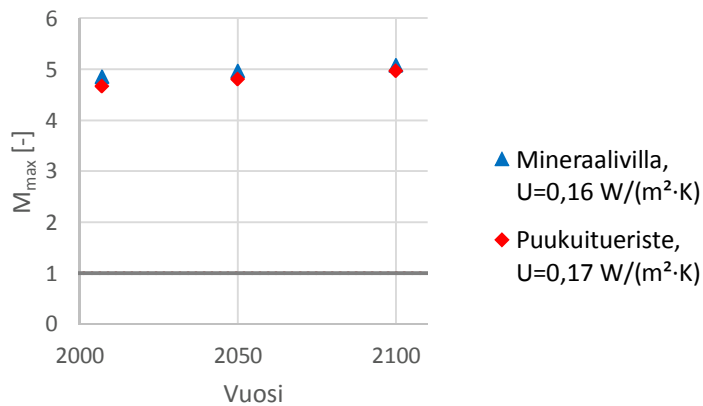
5.2 Tiiliverhotut rakennetyypit

Tiiliverhottuihin rakennetyyppeihin vaikuttaa voimakkaasti viistosaderasitus, joka imeytyy tiiliverhoukseen. Tiiliverhouksesta kosteus siirtyy diffuusion vaikutuksesta tuuletusväliin ja sitä kautta sisemmälle seinärakenteeseen. Tästä johtuen tiiliverhotut rakennetyypit ovat suuremman kosteusrasituksen alaisena puuverhottuihin rakennetyyppeihin nähden.

Kuvista 5.54 ja 5.55 nähdään, että jo nykyilmastossa tiiliverhotuilla rakennetyypeillä homeindeksien maksimi-arvot nousevat suuriksi, kun tuulensuojalevynä käytetään kipsilevyä. Tulokset ovat hyvin samanlaisia sekä mineraalivillaa että puukuitueristettä käytettäessä. Tiiliverhotuissa rakenteissa runkotolpan ulkonurkka on kriittisempi kohta kuin tuulensuojakipsilevyn ulkopinta toisin kuin puuverhotuissa rakenteissa.

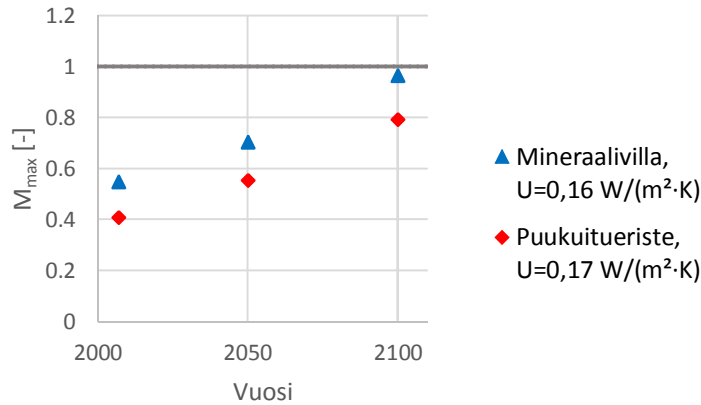


Kuva 5.54. Tuulensuojakipsilevyn sisäpinnan homeindeksien maksimi-arvot homeutumisherkkyysluokassa HHL2 mineraalivillalla sekä puukuidulla eristetyssä rakennetyypissä. Rakennetyypit ovat UST1 ja UST2.



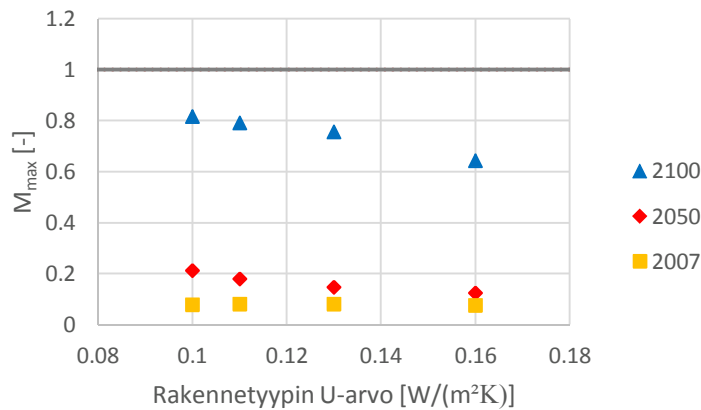
Kuva 5.55. Runkotolpan ulkonurkan homeindeksien maksimi-arvot homeutumisherkkyysluokassa HHL1 mineraalivillalla sekä puukuidulla eristetyssä rakennetyypissä. Rakennetyypit ovat UST1 ja UST2.

Kuvassa 5.56 on esitetty tulokset tuulensuojakipsilevyn sisäpinnasta, kun kipsilevyn homeutumisherkkyysluokka on HHL3. Kuvasta nähdään, että homeindeksien maksimi-arvot laskevat merkittävästi HHL2 luokan kipsilevyn verrattuna mutta pysyvät vielä vuoden 2100 ilmastossa alle homeen kasvun alkamisen raja-arvon. Kipsilevyn homeutumisherkkyuden muutoksella ei ollut kuitenkaan vaikutusta koko rakenteen toimintaan, sillä runkotolpassa tapahtui tästä huolimatta homeen kasvua.

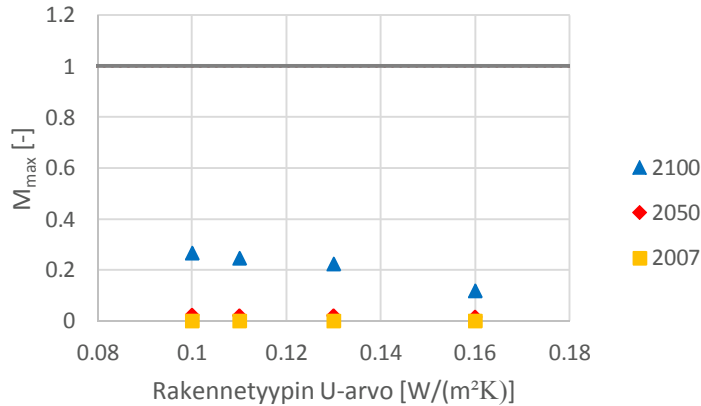


Kuva 5.56. Tuulensuojakipsilevyn sisäpinnan homeindeksien maksimiarvot homeutumisherkkyysluokassa HHL3 mineraalivillalla sekä puukuitueristeellä olevassa rakennetyypissä. Rakennetyypit ovat UST1 ja UST2.

Kun tiiliverhouksen takana olevaan tuuletusväliin laitettiin vesihöyryn diffuusiota hidastava peltirakenne (ks. sadetakkipelti, Vinha et al. 2013), homeindeksien maksimiarvot laskivat kuvien 5.57 ja 5.58 mukaan puuverhottuja rakennetyyppejä alhaisemmiksi. Tämä johtui selvästi pienentyneestä rakenteen sisäosiin siirtyvästä kosteuskuormasta. Lisäksi kosteusrasituksen selvä pienentyminen vaikutti siten, että tuulensuojakipsilevyn sisäpinnasta tuli rakenteen kriittisin kohta.



Kuva 5.57. Rakennetyypin U-arvon vaikutus homeindeksien maksimiarvoihin tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homeutumisherkkyysluokassa HHL2. Tuuletusvälissä on sadetakkipelti. Rakennetyyppi on UST4.

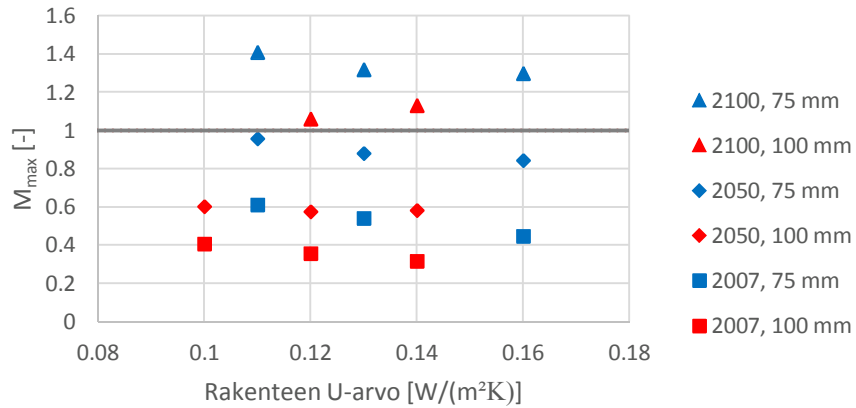


Kuva 5.58. Rakennetyypin U-arvon vaikutus homeindeksien maksimiarvoihin runkotolpan ulkonurkassa homehtumisherkkyyssuokassa HHL1. Tuuletusvälissä on sadetakkipelti. Rakennetyyppi on UST4.

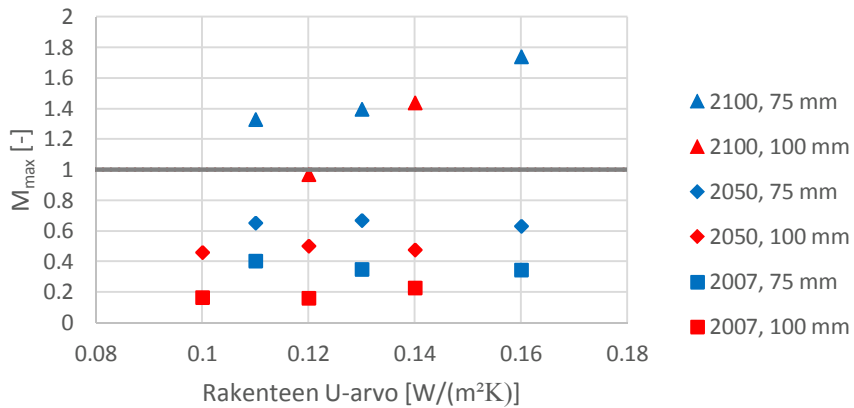
Tuulensuojakipsilevyn ulkopintaan voidaan myös laittaa lisälämmöneristeeksi tuulensuojamineraalivilla. Kuvista 5.59-5.61 nähdään, että nykyilmastossa ja vuoden 2050 ilmastossa 75 mm tuulensuojamineraalivilla riitti pitämään homeindeksien maksimiarvot alle homeen kasvun alkamisen raja-arvon.

Vuoden 2100 ilmastossa arvot nousivat kuitenkin homeen kasvun alkamisen raja-arvon yläpuolelle myös runkotolpan sisänurkassa (kuva 5.61), jossa homeindeksien maksimiarvojen trendi oli pienenevä alhaisemman U-arvon suuntaan. Rakenteen sisäpinnan homeen kasvuille otolliset olosuhteet johtuivat ilmeisesti siitä, että höyrinsulkumuovi oli liian vesihöyrytiivis. Vesihöyryä läpäisevämpi kalvo voisi parantaa rakenteen sisäpinnan olosuhteita mutta lisäisi kosteusrasitusta ulkopinnassa.

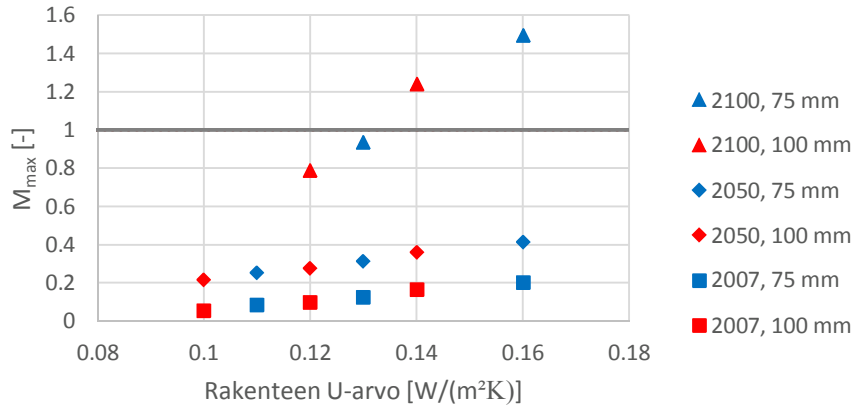
100 mm paksu lisäeriste paransi rakenteen toimintaa 75 mm paksuun lisäeristeeseen verrattuna, mutta edelleen vuoden 2100 ilmastossa homeindeksien maksimiarvot nousivat homeen kasvun alkamisen raja-arvon yläpuolelle. Nykyilmastossa ja vuoden 2050 ilmastossa homeindeksien maksimiarvot pysyivät alle homeen kasvun alkamisen raja-arvon.



Kuva 5.59. Rakennetyypin U-arvon vaikutus homeindeksien maksimiarvoihin tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homehtumisherkyysluokassa HHL2 tuulensuojamineraalivillan paksuuksilla 75 mm ja 100 mm. Rakennetyyppi on UST3.



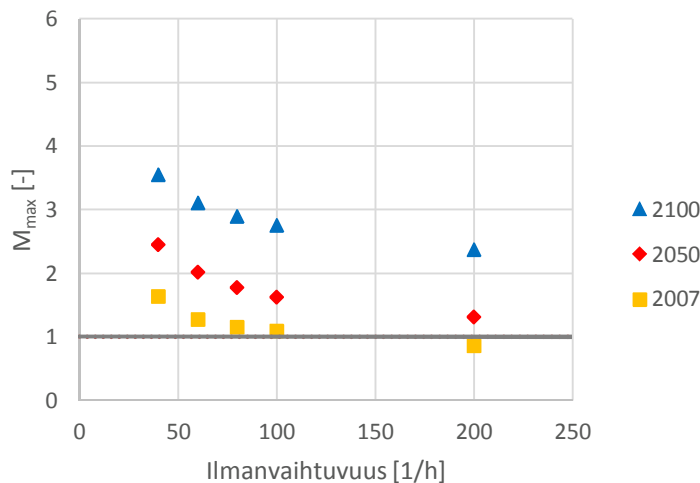
Kuva 5.60. Rakennetyypin U-arvon vaikutus homeindeksien maksimiarvoihin runkotolpan ulkonurkassa homehtumisherkyysluokassa HHL1 tuulensuojamineraalivillan paksuuksilla 75 mm ja 100 mm. Rakennetyyppi on UST3.



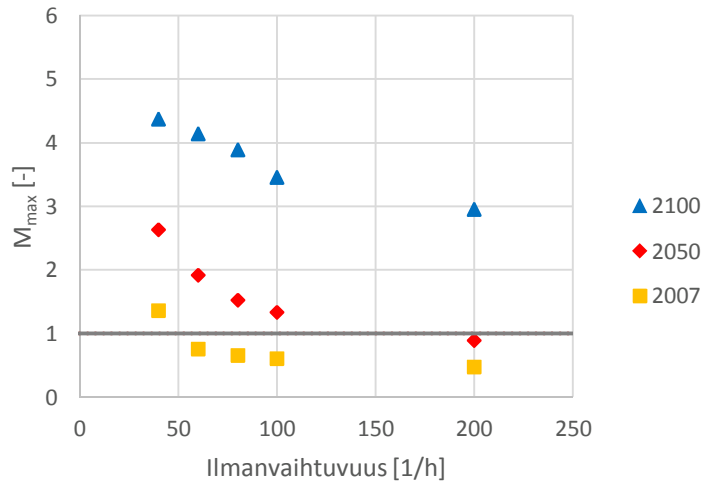
Kuva 5.61. Rakennetyypin U-arvon vaikutus homeindeksien maksimi-arvoihin runkotolpan sisänurkassa homeutumisherkkyyssuokassa HHL1 tuulensuojamineraalivillan paksuuksilla 75 mm ja 100 mm. Rakennetyyppi on UST3.

Tuuletusväli toimii myös tiiliverhotuilla rakenteilla kosteutta poistavana rakennekerroksena. Koska tiiliverhouksesta kulkeutuu rakenteeseen haitallisissa määrin kosteutta, on kuvissa 5.62-5.65 tarkasteltu tuuletusvälin paksuuden ja ilmanvaihtuvuuden vaikutusta homeindeksien maksimi-arvoihin. Tuuletusvälien ilmanvaihtuvuudet olivat laskentatarkasteluissa vakiosuuruisia.

Kuvista 5.62 ja 5.63 nähdään, että vaikka ilmanvaihtuvuutta kasvatettiin arvoon 200 1/h, homeindeksien maksimi-arvot olivat jo vuoden 2050 ilmastossa hyvin lähellä homeen kasvun alkamisen raja-arvoa. Vuoden 2100 ilmastossa arvot olivat vielä suurempia.

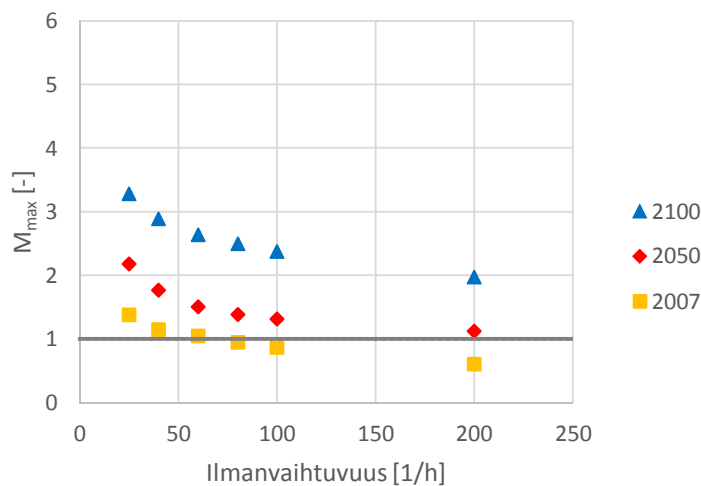


Kuva 5.62. Ilmanvaihtuvuuden vaikutus homeindeksien maksimi-arvoihin tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homeutumisherkkyyssuokassa HHL2. Ilmanvaihtuvuudet ovat vakioarvoja. Tuuletusvälin paksuus on 40 mm. Rakennetyyppi on UST1. Rakennetyypin U-arvo on 0,16 W/(m²·K).

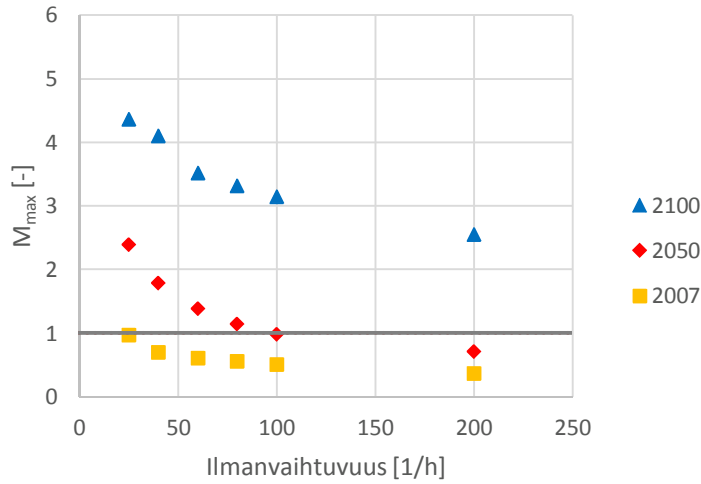


Kuva 5.63. Ilmanvaihtuvuuden vaikutus homeindeksien maksimiarvoihin runkotolpan ulkonurkassa homeutumisherkkyyssluokassa HHL1. Ilmanvaihtuvuudet ovat vakioarvoja. Tuuletusvälin paksuus on 40 mm. Rakennetyyppi on UST1. Rakennetyypin U-arvo on $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Kuvista 5.64 ja 5.65 voidaan havaita, että vielä 80 mm paksussakin tuuletusvälissä vuoden 2050 ilmastossa tuulensuojakipsilevyn sisäpinnan homeindeksien maksimiarvot olivat yli homeen kasvun alkamisen raja-arvon ja runkotolpan ulkonurkan arvot laskivat alle tämän arvon vasta yli 100 1/h ilmanvaihtuvuuksilla.



Kuva 5.64. Ilmanvaihtuvuuden vaikutus homeindeksien maksimiarvoihin tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homeutumisherkkyyssluokassa HHL2. Ilmanvaihtuvuudet ovat vakioarvoja. Tuuletusvälin paksuus on 80 mm. Rakennetyyppi on UST1. Rakennetyypin U-arvo on $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.



Kuva 5.65. Ilmanvaihtuvuuden vaikutus homeindeksien maksimiarvoihin runkotolpan ulkonurkassa homehtumisherkkyysluokassa HHL1. Ilmanvaihtuvuudet ovat vakioarvoja. Tuuletusvälin paksuus on 80 mm. Rakennetyyppi on UST1. Rakennetyypin U-arvo on $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Tuuletusvälin kasvattamisella ja ilmanvaihtuvuuden lisäämisellä oli tiiliverhotuissa rakennetyypeissä rakenteen toimintaa parantava vaikutus, toisin kuin puuverhottujen rakennetyyppien tapauksissa. Vuoden 2100 ilmaston lämpötila- ja kosteusolot olivat kuitenkin siinä määrin homeen kasvun kannalta kriittiset, että homeindeksien maksimiarvot pysyivät siitä huolimatta selvästi yli homeen kasvun alkamisen raja-arvon.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

6.1 Laskentamenetelmien kehittäminen

Tutkimuksessa tuuletusvälin ilmanvaihtuvuus ja ilmakehästä alaspäin tuleva pitkäaaltoinen säteily otettiin huomioon kirjallisuuskatsauksen perusteella uusimman saatavilla olevan tiedon mukaan Delphin 5.8.3 -ohjelmaan soveltuvalla tavalla. Tämä on vastaavanlaisiin laskennallisiin tutkimuksiin verrattuna uutta, sillä monissa aiemmissä tutkimuksissa nämä asiat on otettu huomioon paljon yksinkertaisimmilla tavoilla. Koska laskenta on epälineaarista, lähempänä todellisempia ilmasto-olosuhteiden arvoja suorite-tussa laskennassa tarkkuus paranee yksinkertaistetumpaan laskentaan verrattuna.

Ilmakehästä alaspäin suuntautuva pitkäaaltoinen säteily otettiin huomioon Suomen ilmasto-olosuhteiden kaltaisissa olosuhteissa kehitetyillä parametrisoinneilla. Näissä malleissa pitkäaaltoisen säteilyn määrä riippui ulkoilman lämpötilasta, vesihöyryn osapaineesta ulkoilmassa sekä pilvisyydestä. Tämän tutkimuksen tuloksista voidaan päätellä, että kaikilla tässä tutkimuksessa vertailuilla malleilla päästiin hyvin samoihin tuloksiin, joten laskennan virhe ei oleellisesti lisääny käytettäessä mitä tahansa näistä malleista.

Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuutena käytettiin käytettävissä olleesta sääaineistosta lasket-tuja tunnittaisia ilmanvaihtuvuuksia, jotka laskettiin kirjallisuudessa esitettyjen lasken-tamenetelmien perusteella. Ilmanvaihtuvuuksien laskentatulokset vastasivat hyvin kirjallisuudessa esitettyjä tuloksia mitatuista ilmanvaihtuvuuksista.

Laskennan suorittamisen apuna käytettiin Narvi laskentaklusteria (TUT Narvi Cluster), jossa oli mahdollista suorittaa satoja laskentatapauksia samanaikaisesti laskenta-aikojen vaihdella tyypillisesti muutamasta päivästä noin 1-2 kuukauteen. Tämä mahdollisti soveltuvimpien lähtötietojen valinnan laskentaan sekä tuloksien saamisen suuresta mää-rästä laskentatapauksia.

Laskentamenetelmien ja laskennan lähtötietojen kehittyminen ovat parantaneet tulosten tarkkuutta, mutta tulosten analysoinnissa on otettava huomioon, että ne ovat kuitenkin vain arvioita rakenteiden todellisesta toiminnasta. Esimerkiksi materiaaliominaisuuksien määrittämisessä syntyy virhettä muun muassa mittauksien tarkkuudesta johtuen. Lisäksi materiaaliominaisuudet voivat olla erilaiset todellisissa rakenteissa, kuin hallituissa laboratorio-olosuhteissa mitatut ominaisuudet. Lisäksi useat tässäkin tutkimuksessa simuloitujen rakenteiden tulokset ovat olleet ideaalisia versioita todellisista rakenteista, joissa ei muun muassa ole otettu huomioon todellisen rakentamisen aiheuttamia virhetilanteita, kuten epätiivitä asennuksia. Laskentamenetelmät tarvitsevat siis vielä lisätutkimuksia ja vertailuja to-

dellisten rakenteiden toimintaan, jotta päästään yhä tarkempaan ennusteisiin rakenteiden toiminnasta laskentatarkastelujen avulla. Laskentamenetelmien epävarmuudesta johtuen rakenteiden suunnittelussa tulisi olla mukana lisävarmuutta, jolloin toteutettavat rakenteet olisivat vikasietoisempia.

6.2 Puuverhotut rakennetyypit

Kun ilmavuotojen vaikutuksia tai kuivumistarkasteluja ei otettu huomioon, oli tuulensuojakipsilevyn sisäpinnan tarkastelupiste kriittisempi kuin runkotolpan ulkonurkka, jossa homeindeksien maksimi-arvot pysyivät pääsääntöisesti selvästi alle yhden. Tuulensuojakipsilevyllisen puurunkoisen ulkoseinärakenteen toimintaa voidaan parantaa huomattavasti käyttämällä sen ulkopuolella lisälämmöneristekerrosta tai vähentämällä kipsilevyn homehtumisherkkyyttä. Näillä toimenpiteillä homeindeksien maksimi-arvot jäivät alle homeen kasvun alkamisen raja-arvon yksi vuoden 2100 ilmastossa, kun tuulensuojakipsilevyn homehtumisherkkyyksiluokka oli HHL2.

Ennustetun ilmastomuutoksen aiheuttamat olosuhteiden muutokset heikensivät ideaalisesti mallinnettujen kipsilevytuulensuojallisten puurunkoisten ulkoseinärakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa. Vuoden 2100 ilmasto, joka poikkesi nykyilmastosta ja vuoden 2050 ilmastosta melko suuresti, aiheutti homeen kasvun riskiä tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa. U-arvon pienentäminen kasvatti tässä ilmastossa homeindeksien maksimi-arvoja tuulensuojakipsilevyn ollessa homehtumisherkkyyksiluokassa HHL2, mutta kasvu oli suhteellisen pientä, sillä arvot vaihtelivat välillä 1,0-1,4. Nykyilmastossa ja vuoden 2050 ilmastossa homeindeksien maksimi-arvot jäivät alle homeen kasvun alkamisen raja-arvon. Tulokset vastasivat näiltä osin hyvin aiemmin FRAME-projektissa saatuja tuloksia.

Tuulensuojakipsilevyn homehtumisherkkyyksiluokan muuttaminen herkimpään luokkaan (HHL1) kasvatti homeindeksien maksimi-arvoja. Voimakkain muutos tapahtui vuoden 2100 ilmastossa, jossa homeindeksien maksimi-arvot nousivat U-arvon vertailuarvon täyttävillä rakennetyypeillä yli kolmen, joka tarkoittaa jo silmillä havaittavaa homeen kasvua. Kipsilevyille käytettiin myös herkintä homehtumisherkkyyksiluokkaa, koska viimeaikaisten Tampereen teknillisessä yliopistossa tehtyjen homehtumiskokeiden perusteella on olemassa viitteitä siitä, että tavanomainen tuulensuojakipsilevy homehtuu voimakkaammin verrattuna homehtumisherkkyyksiluokan 2 materiaalille määritettyihin laskennallisiin arvoihin.

Seinärakenteen U-arvon vaikutus näkyi kuivumistarkasteluissa siten, että lämmöneristekerroksen paksuuden kasvattaminen aiheutti toisen simulointivuoden tuloksissa homeindeksien maksimi-arvojen nousun verrattaessa lämmöneristekerrokseltaan ohuempaan rakennetyyppiin. U-arvon vertailuarvon mukaisissa seinärakenteissa jo toisen vuoden tulokset olivat lähes tasaantuneiden olosuhteiden mukaisia etenkin nykyilmastossa. Tulevaisuuden ilmastot eivät merkittävässä määrin pidentäneet rakenteiden olosuhteiden

tasaantumisaikaa, kun homeindeksien maksimi-arvot laskettiin jokaiselle simulointivuodelle vuoden alusta alkavana.

Sekä mineraalivillalla että puukuitueristeellä eristetyissä ulkoseinärakenteissa suuren vesihöyrynvastuksen höyrynsulkukerrokset estivät homeen kasvulle otollisten olosuhteiden syntymistä paremmin kuin vesihöyryä läpäisevämmät höyrynsulkukerrokset. Myös kuivumistarkasteluissa, joissa rakenteiden alkukosteutta kasvatettiin käyttötilanteen tarkasteluihin nähden, höyrynsulkumuovi ja alumiinilaminaattipintainen polyuretaanilevy toimivat tulosten mukaan vesihöyryä läpäisevämpää ilmansulkupaperia paremmin.

Julkisivun lautaverhouksen paksuuden kasvattaminen ja tummempi sävy pienensivät homeindeksien maksimi-arvoja, koska tuuletusvälin ilma pysyi lämpimämpänä ohuempana ja vaaleampana lautaverhoukseen verrattuna. Vaikutukset eivät kuitenkaan olleet läheskään yhtä merkittäviä kuin tuulensuojalevyn ulkopuolisella lisälämmöneristekeroksella tai kipsilevyn homeutumisherkkyyden parantamisella.

Tuuletusvälin paksuuden ja ilmanvaihtuvuuden kasvattaminen heikensivät rakenteen toimintaa tuuletusvälin ilman viilentyessä. Laskentatarkasteluissa ei kuitenkaan otettu huomioon mahdollisia viistosateesta aiheutuvia kosteusvuotoja seinärakenteeseen. Tuuletusvälin paksuuden ja ilmanvaihtuvuuden vaikutus tällaisissa tilanteissa tulisi tutkia erikseen. Pelkästään tämän tutkimuksen tiedoilla ei voida kuitenkaan antaa suosituksia tuuletusvälin paksuuden tai ilmanvaihtuvuuden rajoittamiselle, koska mikäli rakenteessa on ylimääräistä kosteutta, tuuletusvälin on mahdollistettava riittävä kuivuminen.

Pitkäaaltoisen säteilyn huomioon ottaminen kasvatti homeindeksien maksimi-arvoja ulkoseinärakenteen ulkopinnan läheisyydessä olevissa tarkastelupisteissä viilentävän vaikutuksen seurauksena. Viilentävä vaikutus oli seurausta pitkäaaltoisen säteilyn nettosiirtymisestä julkisivuverhouksesta ilmakehään.

Ilmavuodottomissa tarkasteluissa puukuitueriste paransi tulosten perusteella rakennetyyppien toimintaa mineraalivillan verrattuna. Vastaavia tuloksia on saatu myös aiemmissä tutkimuksissa. Puukuitueristeen hygroskooppisuus ja kosteuden varastointikyky tasasivat kosteuden jakautumista rakenteessa, jolloin myös vuoden 2100 ilmastossa homeindeksien maksimi-arvot pysyivät alle yhden, kun rakenteen sisäosassa käytettiin höyrynsulkumuovia.

Ilmavuototarkasteluissa käytettiin tunneittain vaihtelevia paine-eroja seinärakenteen yli. Paine-erot pyrkivät vastaamaan todellisia rakennuksessa vallitsevia paine-eroja. Tämän seurauksena paine-erot vaihtelivat sisäilman yli- ja alipaineen välillä, joka aiheutti vuotoilmavirran suunnan vaihtelua. Koska tulokset esitettiin vuoden keskimääräisen ilmavuotoluvun mukaan, voidaan niitä jossain määrin verrata q_{50} -lukuun, joka kuvaa vaipan sisältä poistuvaa vuotoilman määrää vaipan pinta-alaa ja aikayksikköä kohden 50 Pa

ylipaineella. Tämän perusteella jo pienillä vuotoilmamäärillä (alle $1,0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$) puurunkoisten ulkoseinärakenteiden homeindeksien maksimi-arvot voivat nousta jopa lähelle asteikon maksimi-arvoja, kun sisäilmassa on kosteuslisä ulkoilmaan verrattuna. Kosteuslisän suuruuden vaikutusta homeindeksien maksimi-arvoihin ei tutkittu tässä tutkimuksessa.

Ilmavuototapausten tulosten vertailussa täytyy kuitenkin ottaa huomioon, että rakenteiden sisään ei välttämättä todellisuudessa mene saman verran vuotoilmaa kuin mitä tuloksia vastaava q_{50} -luku osoittaisi. Tämä johtuu eroista laskennallisen simulointimallin ja todellisen rakennuksen välillä, jossa vuotoilmalla on myös muita poistumisreittejä. Toisaalta todellisessa rakennuksessa on paljon pinta-alaa, joissa vuotoja ei tapahdu ollenkaan, jolloin vuotokohdat voivat keskittyä kohdennetusti tiettyihin kohtiin. Ilmavuotomalleihin tarvitaan näiltä osin lisää tutkimusta ja laskentamenetelmien kehittämistä, jotta pystyttäisiin arvioimaan paremmin todellisia rakenteisiin kulkeutuvia vuotoilmamääriä ja niiden vaikutuksia rakenteiden kosteustekniselle toiminnalle.

Lisätutkimuksia ilmavuotojen tarkasteluista tarvitaan myös esimerkiksi luonnollisen konvektion aiheuttaman ilmavirran liikkeen ottamisessa huomioon. Lämmöneristekeroksessa tapahtuva sisäinen konvektio lisää rakenteen kosteusrasitusta seinän yläosassa, jolloin se voi lisätä riskiä homeen kasvulle entisestään. Lisäksi materiaaliominaisuuksien etenkin korkeiden suhteellisten kosteuksien alueella täytyy olla tarkkoja, jotta kosteuden jakautumista rakenteissa voidaan arvioida luotettavasti.

6.3 Tiiliverhotut rakennetyypit

Tiiliverhotut ulkoseinärakenteet altistuvat puuverhottuja rakenteita enemmän kosteusrasituksille viistosateen imeytyessä tiiliverhoukseen. Tiiliverhouksesta kosteus siirtyy diffuusion vaikutuksesta rakenteeseen, jota myös auringonsäteily voimistaa. Tämän seurauksena pelkästään kipsilevytuulensuojallisessa puurunkoisessa ulkoseinässä homeen kasvua esiintyi jo nykyilmastossa sekä tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa että runkotalpan ulkonurkassa.

Matalissa tiiliverhotuissa rakenteissa tuulensuojakipsilevyn ulkopuolisella lisäeristyksellä voidaan nykyilmastossa ja vuoden 2050 ilmastossa saada homeen kasvun alkamisen raja-arvon yksi alittavia rakenteita, mutta vuoden 2100 ilmastossa homeindeksien maksimi-arvot voivat nousta lisäeristyksestä huolimatta yli homeen kasvun alkamisen raja-arvon.

Kosteusrasitusta voidaan vähentää estämällä kosteuden pääsy tiiliverhouksesta rakenteeseen diffuusion vaikutuksesta esimerkiksi sadetakkipelti-rakenteella. Tuuletusvälissä oleva pelti estää tiiliverhoukseen imeytyneen sadeveden siirtymisen diffuusiolla rakenteen sisäosiin. Lisäksi sadetakkipelti estää mahdollisten vuotovesien pääsyn rakenteeseen, mikäli vuotovedet tulevat pellin ulkopuolelta.

Tiiliverhouksen takana olevassa tuuletusvälissä ilmanvaihtuvuuden kasvattaminen paransi ulkoseinärakenteen toimintaa. Pelkästään sillä ei kuitenkaan voida parantaa kipsilevytuulensuojallisen rakenteen toimintaa riittävästi niin, että homeindeksien maksimiarvot laskisivat alle homeen kasvun alkamisen raja-arvon myös tulevaisuuden ilmas-
toissa.

7 YHTEENVETO

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli tuottaa uutta tietoa tuulensuojakipsilevyllä toteutettujen puurunkoisten ulkoseinärakenteiden rakennusfysikaalisesta toiminnasta sekä selvittää, kuinka tuulensuojakipsilevy suojaa kantavia rakenteita ja niihin liittyviä rakennusmateriaaleja homehtumiselta. Tutkimuksessa tarkasteltiin erityisesti rakenteellisten ratkaisujen, ilmakehän pitkäaaltoisen säteilyn sekä vuotoilman vaikutuksia ulkoseinärakenteiden kosteustekniseen toimintaan.

Rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa arvioitiin laskennallisesti simulointitarkastelujen avulla Delphin 5.8.3 -ohjelmalla. Laskentatarkasteluissa käytettiin Tampereen teknillisessä yliopistossa kehitettyä rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmää, jossa rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa tarkastellaan laskennallisesti mitoittavissa ulko- ja sisäilman olosuhteissa. Tarkastelukriteerinä homeen kasvua ei sallittu, jolloin Suomalaisen homemallin homeindeksin maksimiarvon (M_{max}) tuli olla pienempi kuin yksi. Ulkoilman olosuhteina käytettiin Ilmatieteen laitoksen tuottamia tunnittaisia sääaineistoja, joista FRAME-projektin yhteydessä on määritetty rakennusfysikaalisia testivuotia nykyilmastossa sekä tulevaisuuden ilmastoissa.

Laskentatarkasteluja varten kirjallisuuden avulla määritettiin ilmakehästä alaspäin tulevan pitkäaaltoisen säteilyn määrä, jolla otettiin huomioon ulkoseinärakenteen ja ilmakehän välinen pitkäaaltoisen säteilyn lämmönsiirto. Lisäksi määritettiin tuuletusväleissä tapahtuva ilmanvaihtuvuus kirjallisuudessa esitettyjen laskentamenetelmien perusteella.

Tutkimuksessa tarkasteltiin puurunkoisia ulkoseiniä, joiden ulkoverhouksena käytettiin puu- ja tiiliverhousta. Rakenteiden toimintaa tarkasteltiin käyttötilanteen olosuhteissa sekä kuivumistilanteissa. Lisäksi käyttötilanteen tarkasteluissa tutkittiin ilmavuotojen vaikutusta seinärakenteen kosteustekniseen toimintaan. Ilmavuotokohdat mallinnettiin höyrynsulkumuoviin pystysuuntaisina rakoina runkotolpan molemmin puolin. Vuotoilmavirta siirtyi rakenteeseen paine-erojen aiheuttaman konvektion vaikutuksesta. Kuivumistarkasteluissa lämmöneristekerroksen alkukosteuspitoisuutta kasvatettiin käyttötilanteen tarkasteluihin verrattuna.

Ennustettu ilmastonmuutos heikensi selvästi puurunkoisten ulkoseinärakenteiden kosteusteknistä toimintaa. Vuoden 2100 ennustettu ilmasto osoittautui ulkoseinärakenteessa lähellä ulkoilman olosuhteita olevissa materiaaleissa selvästi nykyilmastoa ja ennustettua vuoden 2050 ilmastoa kriittisemmäksi. Myös lämmöneristyksen lisäys heikensi ulkoseinärakenteiden kosteusteknistä toimintaa.

Tutkimuksen tulosten perusteella puurunkoisen ulkoseinärakenteen kosteusteknistä toimintaa voidaan parantaa erityisesti tuulensuojan lämmönvastusta lisäämällä, vähentämällä lähellä ulkoilman olosuhteita olevien rakennusmateriaalien homehtumisherkkyyttä sekä vähentämällä sisäilmasta rakenteeseen kulkeutuvia ilmavuotoja.

Tutkimuksessa kipsilevyn homehtumisherkkyyssluokkana käytettiin pääasiassa luokkaa 2. Tampereen teknillisessä yliopistossa tehtyjen viimeaikaisten homehtumiskokeiden perusteella on myös olemassa viitteitä siitä, että tavanomainen tuulensuojakipsilevy homehtuu voimakkaammin verrattuna homehtumisherkkyyssluokan 2 materiaalille määritettyihin laskennallisiin arvoihin. Tällöin kipsilevyn homehtumisriski on todellisuudessa suurempi kuin laskelmissa saadut tulokset osoittavat. Tästä johtuen osassa luvun 5 tuulensuojakipsilevyn sisäpinnan tuloskuviissa on esitetty myös homehtumisherkkyyssluokassa 1 saadut laskentatulokset.

LÄHTEET

Almorox, J. & Hontoria, C. (2004). Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain, *Energy Conversion and Management*, Vol. 45(9), pp. 1529-1535.

Defraeye, T., Blocken, B. & Carmeliet, J. (2011). Convective heat transfer coefficients for exterior building surfaces: Existing correlations and CFD modelling, *Energy Conversion and Management*, Vol. 52(1), pp. 512-522.

Delphin 5 Help. Viitattu 25.6.2018.

Ekovilla Oy (2018). Saatavissa: <http://www.ekovilla.com/tuotteet/ekovilla-ilmatiiviystuotteet/ekovilla-x5-ilmansulku/>, viitattu 25.6.2018.

Falk, J. & Sandin, K. (2013a). Ventilated rainscreen cladding: A study of the ventilation drying process, *Building and Environment*, Vol. 60, pp. 173-184.

Falk, J. & Sandin, K. (2013b). Ventilated rainscreen cladding: Measurements of cavity air velocities, estimation of air change rates and evaluation of driving forces, *Building and Environment*, Vol. 59, pp. 164-176.

Falk, J. (2014). Rendered rainscreen walls, Division of Building Materials Faculty of Engineering Lund University, Lund.

Falk, J., Molnár, M. & Larsson, O. (2014). Investigation of a simple approach to predict rainscreen wall ventilation rates for hygrothermal simulation purposes, *Building and Environment*, Vol. 73(March), pp. 88-96.

Finch, G. (2007). The performance of rainscreen walls in coastal British Columbia, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 938 p.

Flerchinger, G.N., Xaio, W., Marks, D., Sauer, T.J. & Yu, Q. (2009). Comparison of algorithms for incoming atmospheric long-wave radiation, *Water Resources Research*, Vol. 45, W03423, 13 p.

Hagentoft, C.-E. (2001). Introduction to Building Physics, Lund, Sweden, 422 p.

Hukka, A. & Viitanen, H. 1999. A Mathematical Model of Mould Growth on Wooden Material. *Wood Science and Technology*, Vol. 33, pp. 475-485.

Hyland, R. W. & Wexler, A. (1983). Formulations for the Thermodynamic Properties of the saturated Phases of H₂O from 173.15K to 473.15K, ASHRAE Transactions, 89(2A), pp. 500-519.

Iivonen, P., Viljanen, M. (1984). Lämmön siirtyminen konvektiolla rakennuksen vaipan pinnoilla, Teknillinen korkeakoulu, julkaisu 68, 88 s.

Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T.L. & Lavine, A.S. (2006). Fundamentals of Heat and Mass Transfer, sixth edition, John Wiley & Sons, USA, 997 p.

Isover (2018). Saatavissa: <https://www.isover.fi/tuotteet/isover-varior-km-duplex-uv>, viitattu 25.6.2018.

Iziomon, M.G., Mayer, H. & Matzarakis, A. (2003). Downward atmospheric longwave irradiance under clear and cloudy skies: Measurement and parameterization, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Vol. 65(10), pp. 1107-1116.

Kauppinen, T. (2011). Rakennuksen ilmanpitävyys, Rakentajain kalenteri 2011, Rakennustietosäätiö RTS, Rakennustieto Oy, Rakennusmestarit ja insinöörit AMK RKL ry.

Kharseh, M. (2018). Solar Radiation Calculation. Saatavissa: <https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id=553e4871d685ccd10e8b4618&assetKey=AS%3A273765705945088%401442282238044>, viitattu 25.6.2018.

Kronvall, J. (1980). Air flows in building components, Division of Building Technology, Lund Institute of Technology.

Laine, K. (2010). Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet, Tampereen teknillinen yliopisto, 122 s. + 32 liites.

Lam, J. C. & Li, D. H. W. (1996). Correlation between global solar radiation and its direct and diffuse components, Building and Environment, Vol. 31(6), pp. 527-535.

Langmans, J., Klein, R., De Paepe, M. & Roels, S. (2010). Potential of wind barriers to assure airtightness of wood-frame low energy constructions, Energy & Buildings, Vol. 42(12), pp. 2376-2385.

Langmans, J., Klein, R. & Roels, S. (2012). Hygrothermal risks of using exterior air barrier systems for highly insulated light weight walls: A laboratory investigation, Building and Environment, Vol. 56, pp. 192-202.

Langmans, J., Klein, R. & Roels, S. (2013). Numerical and experimental investigation of the hygrothermal response of timber frame walls with an exterior air barrier, Journal of Building Physics, Vol. 36(4), pp. 375-397.

Langmans, J. & Roels, S. (2015a). Experimental analysis of cavity ventilation behind rainscreen cladding systems: A comparison of four measuring techniques, *Building and Environment*, Vol. 87, pp. 177-192.

Langmans, J. & Roels, S. (2015b). What are the hygrothermal consequences of applying exterior air barriers in timber frame construction in Europe? *Journal of Building Performance Simulation*, Vol. 8(3), pp. 191-204.

Langmans, J., Desta, T.Z., Alderweireldt, L. & 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.

Li, M., Jiang, Y. & Coimbra, C.F.M. (2017). On the determination of atmospheric longwave irradiance under all-sky conditions, *Solar Energy*, Vol. 144, pp. 40-48.

Mills, A.F. (1999). *Basic heat and mass transfer*, second edition, Prentice Hall, Los Angeles, California, USA, 1000 p.

Mirsadeghi, M., Cóstola, D., Blocken, B. & Hensen, J.L.M. (2013). Review of external convective heat transfer coefficient models in building energy simulation programs: Implementation and uncertainty, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 56(1-2), pp. 134-151.

Moisio, T. (diplomityön luonnos, 2018). Puurankarunkoisten ulkoseinien liitosten lämpö- ja kosteustekninen toiminta, Tampereen teknillinen yliopisto.

Mundt-Petersen, S. O. (2015). Moisture Safety in Wood Frame Buildings – Blind evaluation too WUFI using field measurements and determination of factors affecting the moisture safety, *Byggnadsfysik LTH*, Lunds Tekniska Högskola, 84 p.

Mundt-Petersen, S. & Wallentén, P. (2014). Methods for compensate lack of climate boundary data, *Proceedings XIII DBMC - XIII International Conference on Durability of Building Materials and Components*, pp. 632-639.

Mäkitalo, M. (2012). Puurunkoisten ulkoseinien kosteustekninen toimivuus nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa, Tampereen teknillinen yliopisto, 134 s. + 37 liites.

Niemelä, S., Räisänen, P. & Savijärvi, H. (2001). Comparison of surface radiative flux parameterizations: Part I: Longwave radiation, *Atmospheric Research*, Vol. 58(1), pp. 1-18.

Nore, K. (2009). *Hygrothermal performance of ventilated wooden cladding*, Trondheim: NTNU.

Ojanen, T., Viitanen, H., Peuhkuri, R., Lähdesmäki, K., Vinha, J. & Salminen, K. (2010). Mould growth modeling of building structures using sensitivity classes of materials. Proceedings of Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XI, Clearwater Beach, Florida, USA, December 5-9. ASHRAE, DOE, ORNL, Session II-B, 10 p.

Palomäki, E. Kosteus- ja homevauriot. Rakennustietosäätiö RTS, Rakennustieto Oy. Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK00s497.pdf>, viitattu 25.6.2018.

Pihelo, P. & Kalamees, T. (2016). The effect of thermal transmittance of building envelope and material selection of wind barrier on moisture safety on timber frame exterior wall, *Journal of Building Engineering*, Vol. 6, pp. 29-38.

Pihelo, P., Kikkas, H. & Kalamees, T. (2016). Hygrothermal Performance of Highly Insulated Timber-frame External Wall, *Energy Procedia*, Vol. 96, pp. 685-695.

PVEducation (2018). Saatavissa: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/declination-angle>, viitattu 25.6.2018.

RIL 107-2012. Rakennusten veden- kosteudeneristysohjeet, Suomen Rakennusinsinööriliitto RIL ry, 219 s.

RIL 255-1-2014. Rakennusfysiikka 1. Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset, Suomen Rakennusinsinööriliitto RIL ry, 500 s.

Salonen, J. (2015). Lämpö- ja kosteusteknisesti turvalliset lähiökerrostalojen korjausratkaisut puuelementeillä Suomessa, Tampereen teknillinen yliopisto, 129 s. + 12 liites.

SFS-EN ISO 10456 (2008). Rakennusaineet ja -tuotteet. Lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet. Taulukoidut suunnitteluarvot ja menetelmät ilmoitetun lämpöteknisen arvon ja lämpöteknisen suunnitteluarvon määrittämiseksi. 2. painos, Suomen standarditoimistoliitto SFS, 30 s.

SFS-EN ISO 13789 (2017). Thermal performance of buildings. Transmission and ventilation heat transfer coefficients. Calculation method (ISO 13789:2017), Suomen standarditoimistoliitto SFS, 32 p.

SFS-EN ISO 15927-3 (2009). Rakennusten lämpö- ja kosteustekninen käyttäytyminen. Säätiöjen laskenta ja esittäminen. Osa 3: Pystypintojen viistosadeindeksin laskenta tuulen ja sateen tuntitiedoista, Suomen standarditoimistoliitto SFS, 17 s.

SFS-EN 1991-1-4 (2011). Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Yleiset kuormat. Tuulikuormat. Toinen painos, Suomen standarditoimistoliitto SFS, 254 p.

SFS-EN ISO 6946 (2017). Building components and building elements. Thermal resistance and thermal transmittance. Calculation methods (ISO) 6946:2017), Suomen standarditoimistoliitto SFS, 48 p.

Sisäilmäyhdistys ry (2018). Saatavissa: <http://www.sisailmayhdistys.fi/Perustietoasisailmasta/Homevaurioiden-ehkaisy-ja-tunnistaminen>, viitattu 3.9.2018.

Solar Resource Assessment and Economics (2018). Saatavissa: <http://www.me.umn.edu/courses/me4131/LabManual/AppDSolarRadiation.pdf>, viitattu 25.6.2018.

Straube, J., VanStraaten, R., Burnett, E. & Schumacher, C. (2004). ASHRAE 1091 – Development of Design Strategies for Rainscreen and Sheathing Membrane Performance in Wood Frame Walls, Review of Literature and Theory, Report # 1, Final Report, Building Engineering Group, University of Waterloo, 1150 p.

Van Straaten, R. (2003) Measurement of ventilation and drying of vinyl siding and brick clad wall assemblies, Waterloo, Ont. : University of Waterloo [Dept. of Civil Engineering], 182 p.

Venäläinen, A., Solantie, R. & Laine, V. (1998). Mean long-term surface energy balance components in Finland during the summertime, Boreal Environment Research 3, Vol 3, pp. 171-180.

Venäläinen, A., Rontu, L. & Solantie, R. (1999), On the influence of peatland draining on local climate, Boreal Environment Research, Vol 4, pp. 89-100.

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

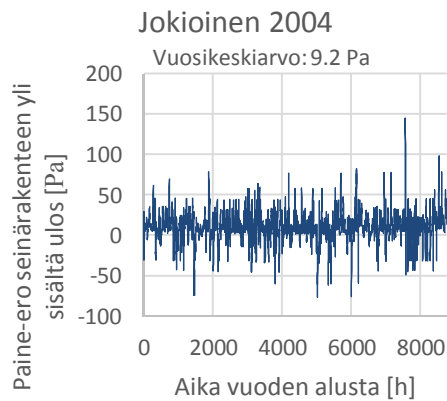
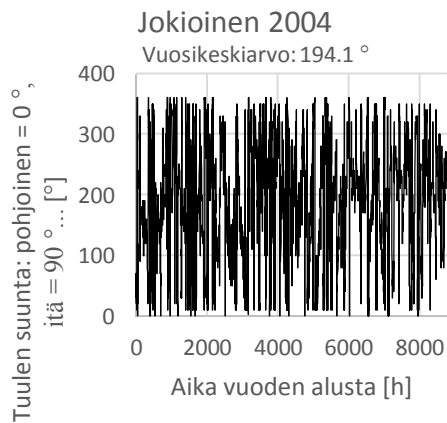
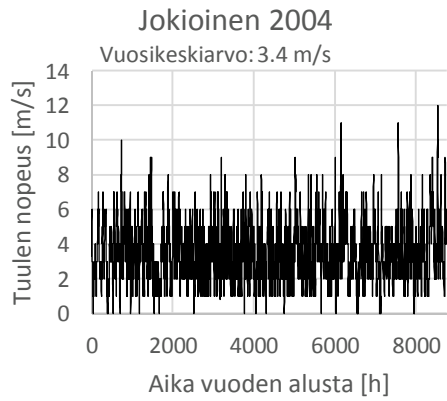
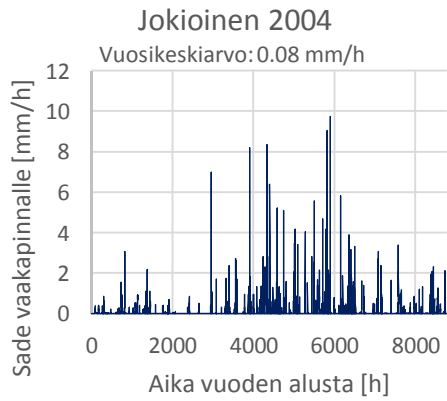
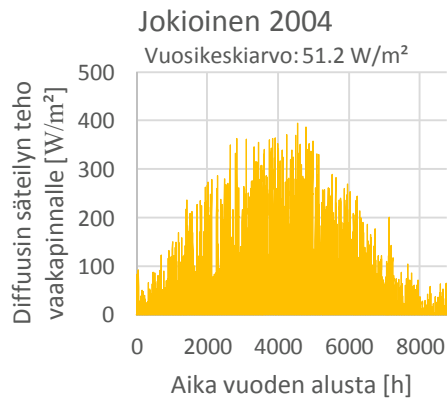
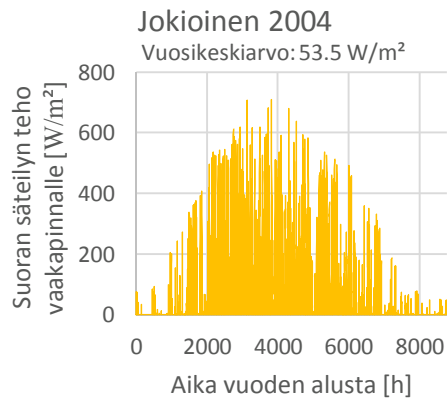
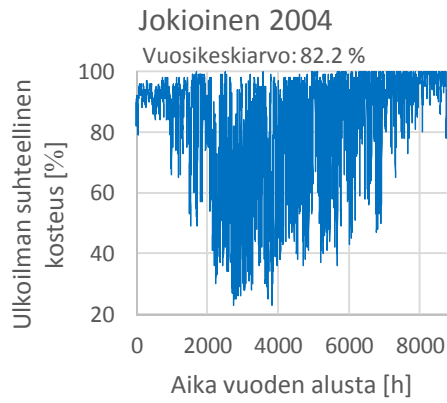
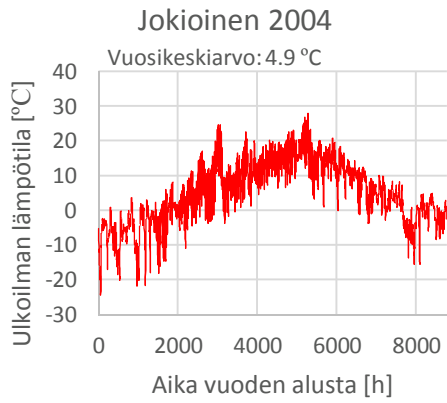
Vinha, J. & Käkelä, P. (1999). Vesihöyryn siirtyminen seinärakenteessa diffuusion ja konvektion vaikutuksesta, kolmas uudistettu painos, Tampereen teknillinen korkeakoulu, julkaisu 96, 81 s. + 29 liites.

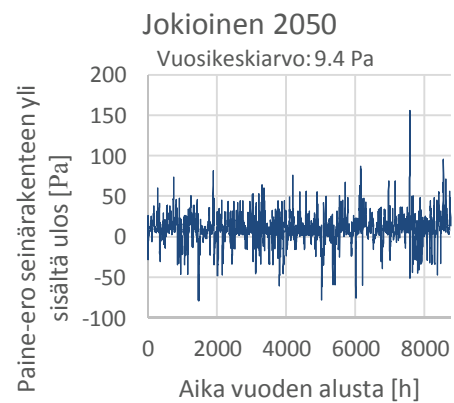
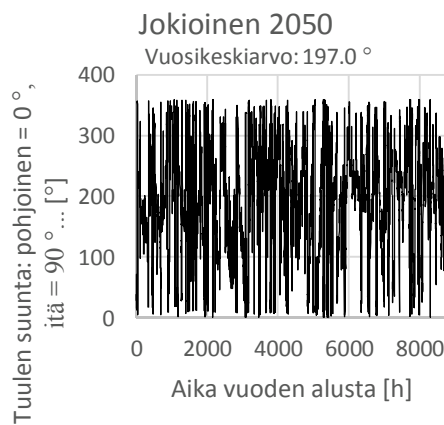
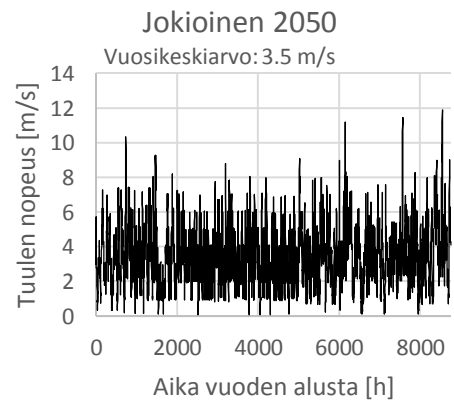
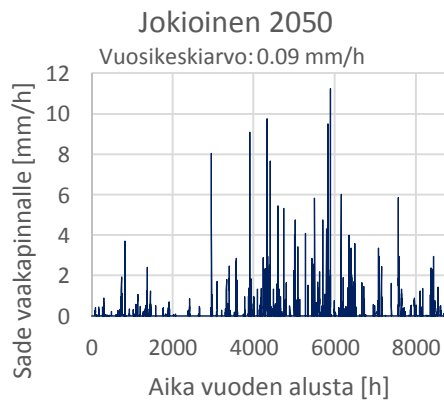
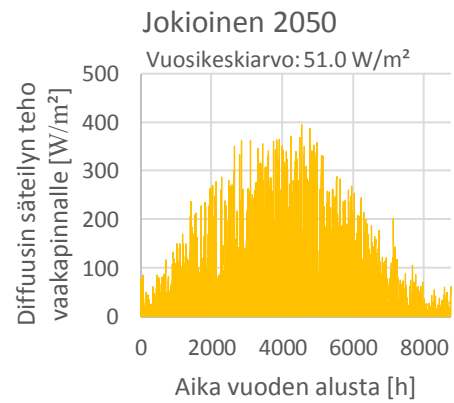
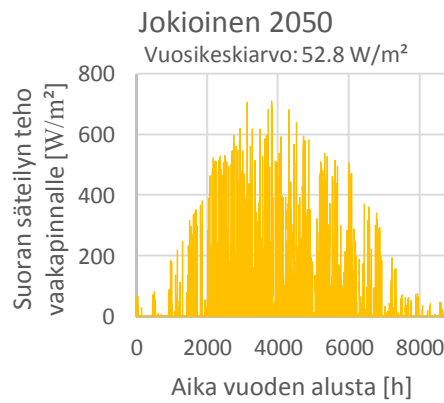
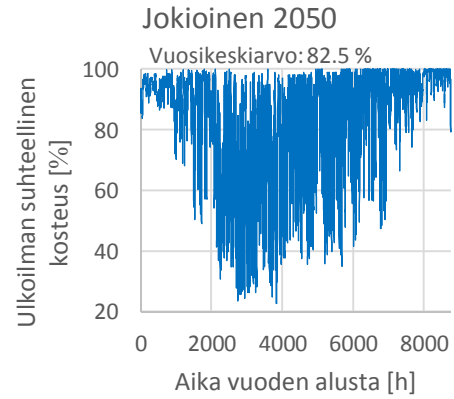
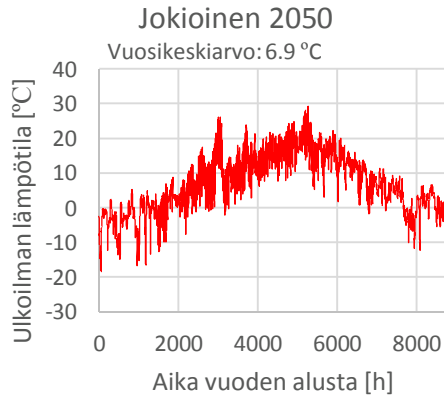
Vinha, J., Laukkarinen, A., Mäkitalo, M., Nurmi, S., Huttunen, P., Pakkanen, T., Kero, P., Manelius, E., Lahdensivu, J., Köliö, A., Lähdesmäki, K., Piironen, J., Kuhno, V., Piirinen, M., Aaltonen, A., Suonketo, J., Jokisalo, J., Teriö, O., Koskenvesa, A. & Palolahi, T. (2013). Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Tutkimusraportti 159, 354 s. + 43 liites.

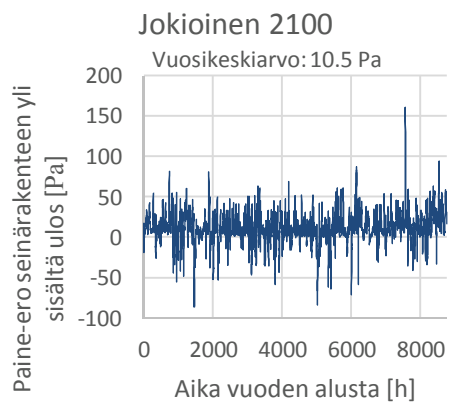
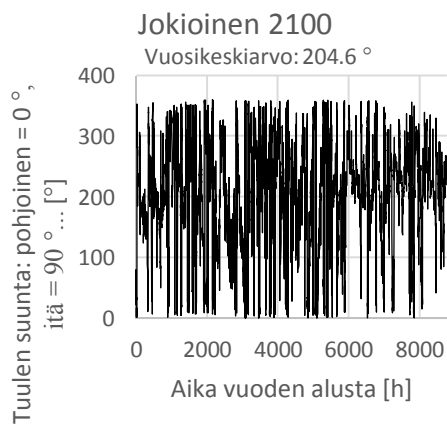
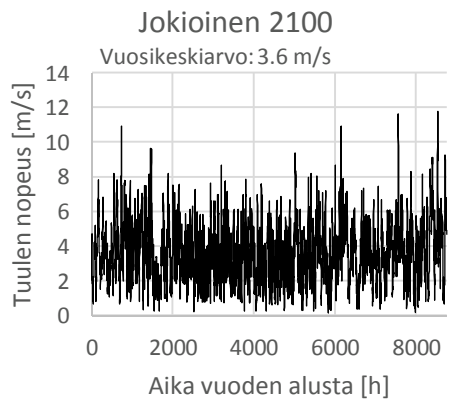
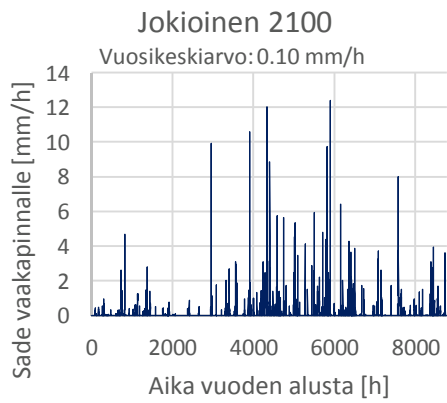
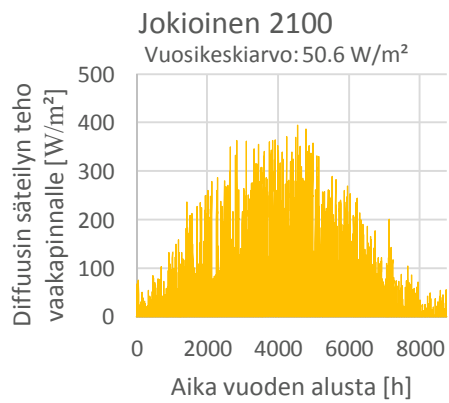
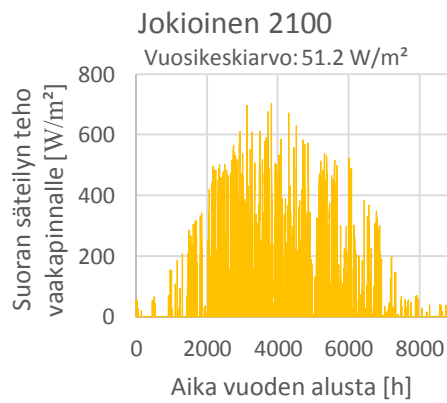
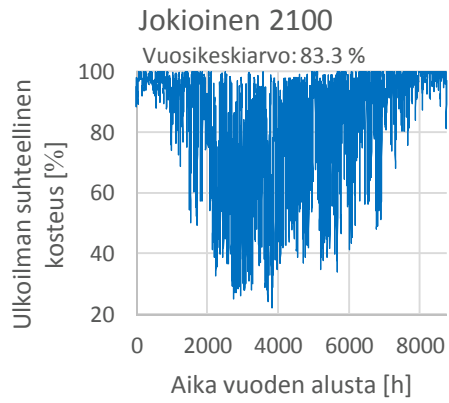
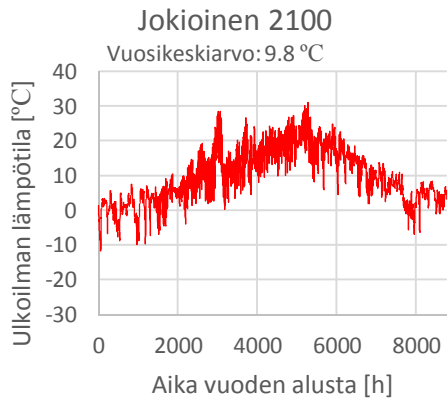
Viúdez-Mora, A. (2011). Atmospheric downwelling longwave radiation at the surface during cloudless and overcast conditions. Measurements and modeling, Universitat de Girona.

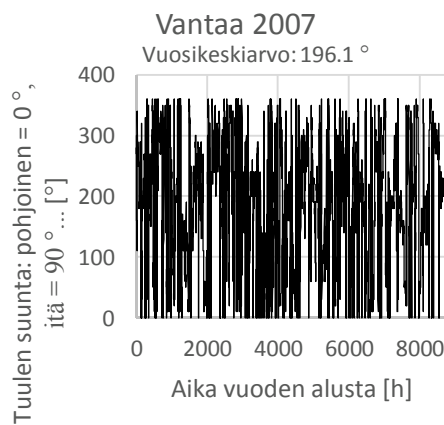
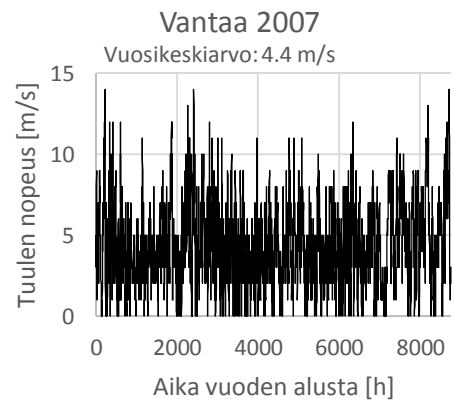
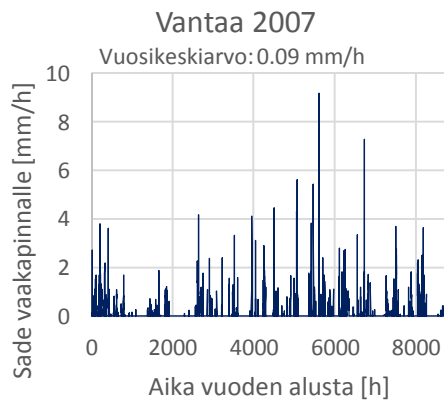
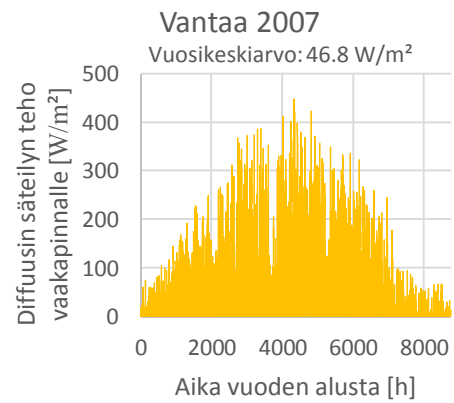
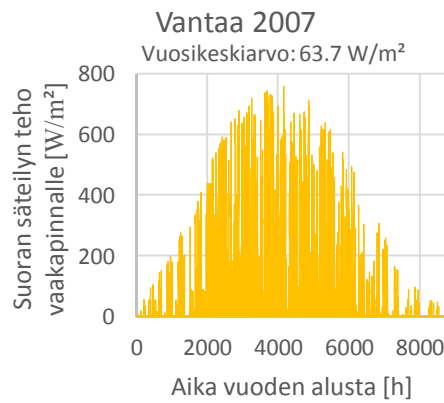
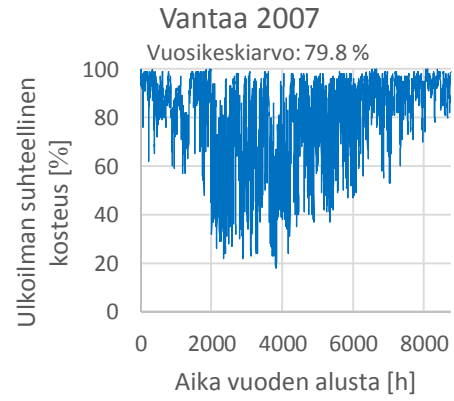
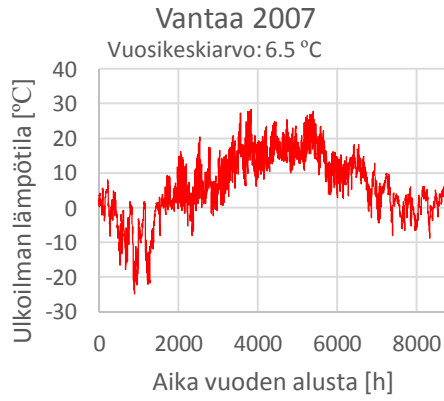
Wallentén, P. (2010). The Treatment of Long-Wave Radiation and Precipitation in Climate Files for Building Physics Simulations, 10 p.

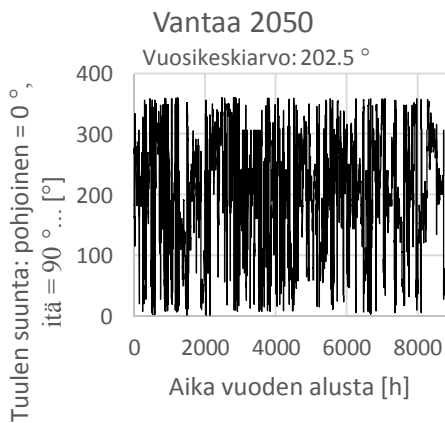
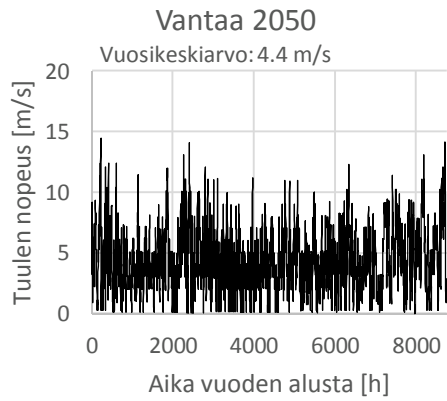
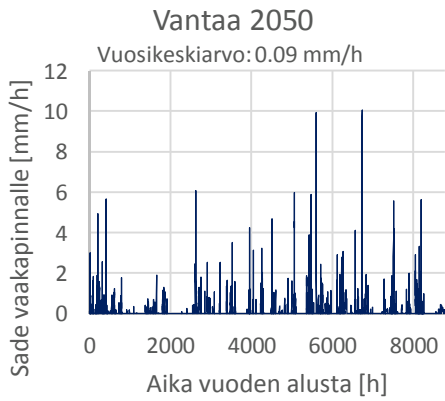
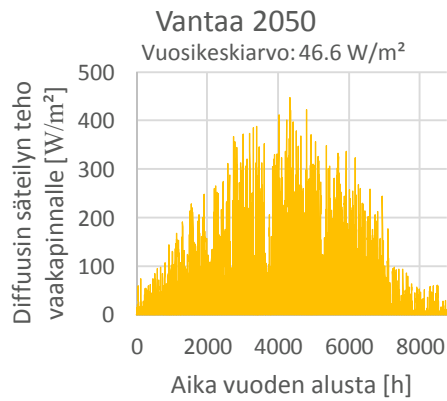
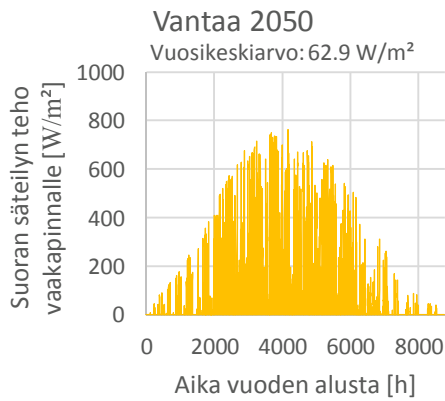
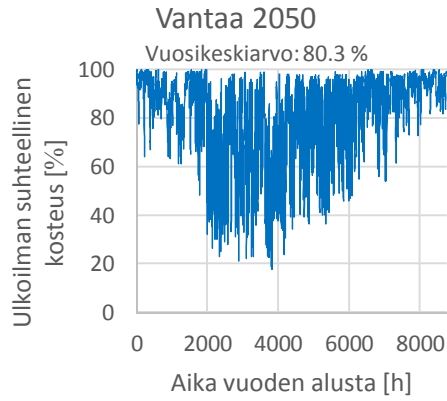
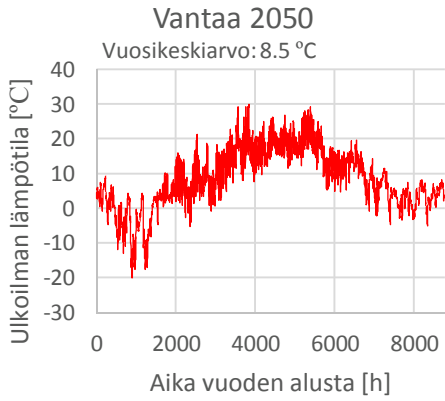
Watt, D., Sjöberg, S. & Wahlgren, P. (2015). Hygrothermal Performance of a Light Weight Timber Wall Assembly with an Exterior air Barrier, Energy Procedia, Vol. 78, pp. 1419-1424.

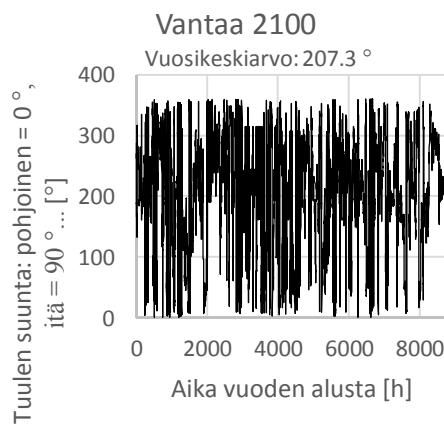
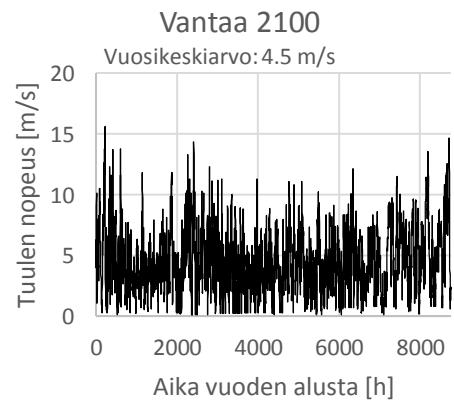
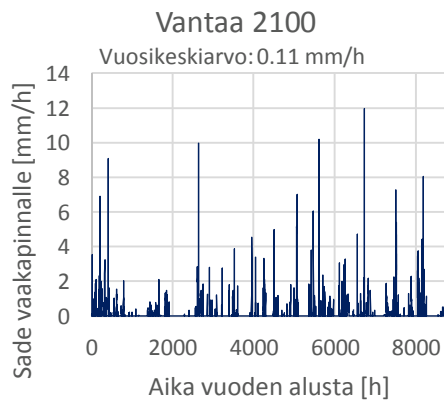
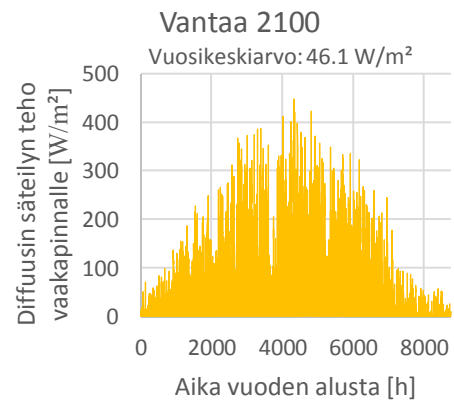
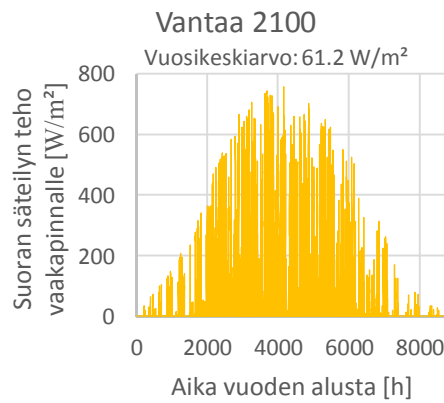
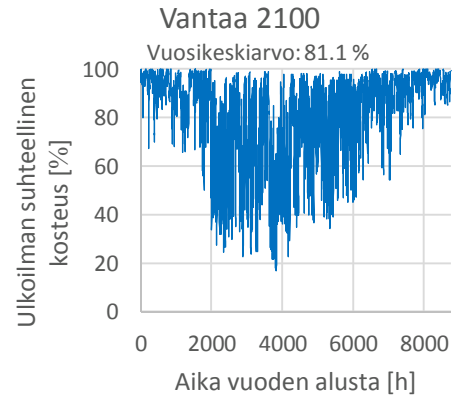
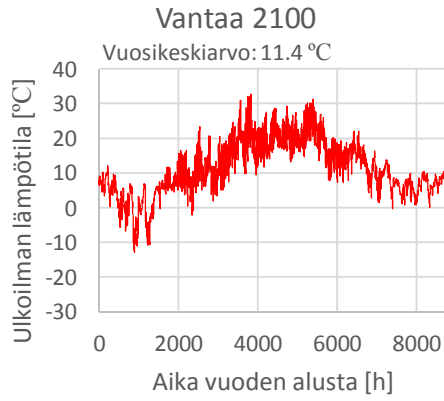












Tunnus	Yksikkö	Selitys
NAME		Nimi
FLAGS		Erityisominaisuudet
RHO	kg/m ³	Tiheys
CE	J/(kgK)	Ominaislämpökapasiteetti
THETA_POR	m ³ /m ³	Huokoisuus
THETA_EFF	m ³ /m ³	Kosteuspitoisuus vesiupotuksessa
THETA_CAP	m ³ /m ³	Kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus
THETA_80	m ³ /m ³	Kosteuspitoisuus 80 % RH suhteellisessa kosteudessa
LAMBDA	W/(mK)	Lämmönjohtavuus
AW	kg/(m ² s ^{0,5})	Veden imeytymiskerroin
MEW	-	Diffuusiovastuskerroin
KLEFF	s	Kosteudenjohtavuus THETA_EFF kosteuspitoisuudessa
KG	s	Ilmanläpäisevyys
Theta_l	m ³ /m ³	Kosteuspitoisuus
pC	lg(Pa)	Veden huokosalipaineen kymmenkertainen logaritmi
RH	-	Suhteellinen kosteus
lgKI	lg(s)	Kosteudenjohtavuuden kymmenkertainen logaritmi

Tiheys, ominaislämpökapasiteetti, lämmönjohtavuus, diffuusiovastuskerroin ja ilmanläpäisevyys ovat kuivan materiaalin ominaisuuksia.

Seuraavat materiaalikerrokset on määritetty Delphin-laskentamallissa lisävastuksena materiaalikerrosten välissä.

Ilmansulkupaperi:

Suhteellinen diffuusiovastus: 0,7 m (Ekovilla Oy 2018).

Sadetakkipelti:

Suhteellinen diffuusiovastus: 98 m (Salonen 2015).

NAME	=	A1 Gypsum Board	
RHO	=	774	kg/m ³
CE	=	1100	J/(kgK)
THETA_POR	=	0.604	m ³ /m ³
THETA_EFF	=	0.604	m ³ /m ³
THETA_CAP	=	0.5	m ³ /m ³
THETA_80	=	0.01	m ³ /m ³
LAMBDA	=	0.19	W/(mK)
AW	=	0.076	kg/(m ² s ^{0.5})
MEW	=	7.9	-
KLEFF	=	1.00E-09	s
KG	=	2.20E-09	s

A1 Gypsum Board			
Theta_l	pC	Theta_l	lgKl
0.604	0	0	-21
0.603992088	0.01	0.00604	-20.2249
0.603984272	0.11	0.01208	-19.3396
0.603970881	0.21	0.01812	-18.6288
0.603956657	0.31	0.02416	-18.0158
0.603933252	0.41	0.0302	-17.4744
0.603908494	0.51	0.03624	-16.9915
0.603868902	0.61	0.04228	-16.5587
0.603827202	0.71	0.04832	-16.1703
0.603762398	0.81	0.05436	-15.8215
0.603694442	0.91	0.0604	-15.5084
0.603591817	1.01	0.06644	-15.2279
0.603484643	1.11	0.07248	-14.9768
0.603327386	1.21	0.07852	-14.7526
0.60316381	1.31	0.08456	-14.5528
0.602930654	1.41	0.0906	-14.375
0.602689054	1.51	0.09664	-14.2173
0.602354529	1.61	0.10268	-14.0777
0.602009162	1.71	0.10872	-13.9543
0.601544571	1.81	0.11476	-13.8455
0.60106662	1.91	0.1208	-13.7497
0.600441709	2.01	0.12684	-13.6654
0.599800944	2.11	0.13288	-13.5912
0.598985707	2.21	0.13892	-13.5258
0.598152193	2.31	0.14496	-13.4681
0.597117547	2.41	0.151	-13.4169
0.596062015	2.51	0.15704	-13.3712
0.594776654	2.61	0.16308	-13.3301
0.593466687	2.71	0.16912	-13.2926
0.591885934	2.81	0.17516	-13.258
0.590273719	2.91	0.1812	-13.2255
0.588315237	3.01	0.18724	-13.1944
0.586311872	3.11	0.19328	-13.1642
0.583814682	3.21	0.19932	-13.1342
0.581248129	3.31	0.20536	-13.1041
0.577918302	3.41	0.2114	-13.0733
0.574479258	3.51	0.21744	-13.0415
0.569838394	3.61	0.22348	-13.0084
0.565031653	3.71	0.22952	-12.9736
0.558399727	3.81	0.23556	-12.937
0.551533153	3.91	0.2416	-12.8984
0.542084685	4.01	0.24764	-12.8575
0.532333503	4.11	0.25368	-12.8143
0.51925151	4.21	0.25972	-12.7688
0.505819039	4.31	0.26576	-12.7208
0.488530113	4.41	0.2718	-12.6704
0.470883733	4.51	0.27784	-12.6176

A1 Gypsum Board			
Theta_l	pC	Theta_l	lgKl
0.449304227	4.61	0.28388	-12.5625
0.427414107	4.71	0.28992	-12.5051
0.402106217	4.81	0.29596	-12.4455
0.376587205	4.91	0.302	-12.3839
0.348745106	5.01	0.30804	-12.3204
0.32082796	5.11	0.31408	-12.2552
0.292085098	5.21	0.32012	-12.1884
0.263414638	5.31	0.32616	-12.1203
0.235540871	5.41	0.3322	-12.0509
0.207872471	5.51	0.33824	-11.9807
0.182463731	5.61	0.34428	-11.9096
0.157358984	5.71	0.35032	-11.8381
0.135599136	5.81	0.35636	-11.7662
0.114196498	5.91	0.3624	-11.6943
0.096724409	6.01	0.36844	-11.6225
0.079615221	6.11	0.37448	-11.551
0.066499162	6.21	0.38052	-11.4801
0.053710392	6.31	0.38656	-11.41
0.044522845	6.41	0.3926	-11.3407
0.03559892	6.51	0.39864	-11.2726
0.029575778	6.61	0.40468	-11.2057
0.0238	6.619402042	0.41072	-11.1403
0.0182	6.996444712	0.41676	-11.0763
0.0114	7.405965243	0.4228	-11.014
0.00965	7.594596241	0.42884	-10.9534
0.00825	7.912266233	0.43488	-10.8945
0.00615	8.180482849	0.44092	-10.8373
0	10	0.44696	-10.7819
		0.453	-10.7282
		0.45904	-10.6761
		0.46508	-10.6255
		0.47112	-10.5762
		0.47716	-10.528
		0.4832	-10.4808
		0.48924	-10.4341
		0.49528	-10.3877
		0.50132	-10.3412
		0.50736	-10.2941
		0.5134	-10.2459
		0.51944	-10.1961
		0.52548	-10.144
		0.53152	-10.089
		0.53756	-10.0304
		0.5436	-9.96731
		0.54964	-9.89888
		0.55568	-9.82416
		0.56172	-9.74214
		0.56776	-9.65174
		0.5738	-9.55177
		0.57984	-9.441
		0.58588	-9.31809
		0.59192	-9.18163
		0.59796	-9.03013
		0.604	-9

Lähde: Vinha et al. (2013).

NAME	=	A4 Glass wool board + weather membrane	
FLAGS	=	WATERTIGHT	
RHO	=	104	kg/m ³
CE	=	850	J/(kgK)
THETA_POR	=	0.9	m ³ /m ³
THETA_EFF	=	0.9	m ³ /m ³
THETA_CAP	=	0.003	m ³ /m ³
THETA_80	=	0.0017	m ³ /m ³
LAMBDA	=	0.031	W/(mK)
MEW	=	1.8	-
KG	=	3.00E-06	s

A4 Glass wool board + weather membrane	
Theta l	pC
0.9	0
0.899983773	3.2
0.899968932	3.3
0.899912412	3.4
0.899840259	3.5
0.899595954	3.6
0.899297577	3.7
0.898404111	3.8
0.897354756	3.9
0.8945901	4
0.891452727	4.1
0.884214414	4.2
0.876243231	4.3
0.866020794	4.4
0.843004332	4.5
0.812945367	4.6
0.781418367	4.7
0.733738005	4.8
0.68469804	4.9
0.620697843	5
0.555973281	5.1
0.483278301	5.2
0.410818383	5.3
0.340945101	5.4
0.2721582	5.5
0.215325171	5.6
0.159968034	5.7
0.120850659	5.8
0.083094102	5.9
0.060311079	6
0.038490669	6.1
0.027262278	6.2
0.016579215	6.3
0.011896515	6.4
0.007466058	6.5
0.005811111	6.6
0.005424107	6.614980203
0.004720982	6.992022873
0.001707589	7.401543405
0.001034599	7.590174403
0.000893974	7.907844394
0.000783482	8.176061011
0	10

Lähde: Vinha et al. (2013).

NAME	=	C1 Gypsum Board	
RHO	=	574	kg/m ³
CE	=	1100	J/(kgK)
THETA_POR	=	0.77	m ³ /m ³
THETA_EFF	=	0.77	m ³ /m ³
THETA_CAP	=	0.5	m ³ /m ³
THETA_80	=	0.013655	m ³ /m ³
LAMBDA	=	0.19	W/(mK)
AW	=	0.076	kg/(m ² s ^{0.5})
MEW	=	6.9	-
KLEFF	=	1.00E-09	s
KG	=	3.48E-09	s

C1 Gypsum Board			
Theta_l	pC	Theta_l	lgKl
0.77	0	0	-21
0.769989914	0.0178044	0.0077	-20.2249
0.769979949	0.114555	0.0154	-19.3396
0.769962878	0.214288	0.0231	-18.6288
0.769944745	0.312606	0.0308	-18.0158
0.769914907	0.412464	0.0385	-17.4744
0.769883345	0.51254	0.0462	-16.9915
0.769832872	0.611463	0.0539	-16.5587
0.769779711	0.71	0.0616	-16.1703
0.769697097	0.81	0.0693	-15.8215
0.769610464	0.91	0.077	-15.5084
0.769479634	1.01	0.0847	-15.2279
0.769343005	1.11	0.0924	-14.9768
0.769142529	1.21	0.1001	-14.7526
0.768933996	1.31	0.1078	-14.5528
0.768636761	1.41	0.1155	-14.375
0.768328761	1.51	0.1232	-14.2173
0.767902297	1.61	0.1309	-14.0777
0.767462011	1.71	0.1386	-13.9543
0.766869735	1.81	0.1463	-13.8455
0.766260426	1.91	0.154	-13.7497
0.765463768	2.01	0.1617	-13.6654
0.764646899	2.11	0.1694	-13.5912
0.763607607	2.21	0.1771	-13.5258
0.762545014	2.31	0.1848	-13.4681
0.761226012	2.41	0.1925	-13.4169
0.759880383	2.51	0.2002	-13.3712
0.758241761	2.61	0.2079	-13.3301
0.75657177	2.71	0.2156	-13.2926
0.754556571	2.81	0.2233	-13.258
0.752501264	2.91	0.231	-13.2255
0.750004524	3.01	0.2387	-13.1944
0.747450565	3.11	0.2464	-13.1642
0.744267061	3.21	0.2541	-13.1342
0.740995131	3.31	0.2618	-13.1041
0.736750153	3.41	0.2695	-13.0733
0.732365941	3.51	0.2772	-13.0415
0.726449608	3.61	0.2849	-13.0084
0.720321809	3.71	0.2926	-12.9736
0.711867202	3.81	0.3003	-12.937
0.703113457	3.91	0.308	-12.8984
0.691068224	4.01	0.3157	-12.8575
0.678637082	4.11	0.3234	-12.8143
0.661959706	4.21	0.3311	-12.7688
0.64483553	4.31	0.3388	-12.7208
0.622795012	4.41	0.3465	-12.6704
0.600298799	4.51	0.3542	-12.6176

C1 Gypsum Board			
Theta_l	pC	Theta_l	lgKl
0.572788501	4.61	0.3619	-12.5625
0.544882223	4.71	0.3696	-12.5051
0.512618853	4.81	0.3773	-12.4455
0.480086338	4.91	0.385	-12.3839
0.444592271	5.01	0.3927	-12.3204
0.409002532	5.11	0.4004	-12.2552
0.372360141	5.21	0.4081	-12.1884
0.335810052	5.31	0.4158	-12.1203
0.300275614	5.41	0.4235	-12.0509
0.265002985	5.51	0.4312	-11.9807
0.232611048	5.61	0.4389	-11.9096
0.200606652	5.71	0.4466	-11.8381
0.172866448	5.81	0.4543	-11.7662
0.145581628	5.91	0.462	-11.6943
0.123307608	6.01	0.4697	-11.6225
0.101496225	6.11	0.4774	-11.551
0.084775422	6.21	0.4851	-11.4801
0.068471857	6.31	0.4928	-11.41
0.056759256	6.41	0.5005	-11.3407
0.045382729	6.51	0.5082	-11.2726
0.03770422	6.61	0.5159	-11.2057
0.03034106	6.619402042	0.5236	-11.1403
0.023201987	6.996444712	0.5313	-11.0763
0.014533113	7.405965243	0.539	-11.014
0.012302152	7.594596241	0.5467	-10.9534
0.010517384	7.912266233	0.5544	-10.8945
0.007840232	8.180482849	0.5621	-10.8373
0	10	0.5698	-10.7819
		0.5775	-10.7282
		0.5852	-10.6761
		0.5929	-10.6255
		0.6006	-10.5762
		0.6083	-10.528
		0.616	-10.4808
		0.6237	-10.4341
		0.6314	-10.3877
		0.6391	-10.3412
		0.6468	-10.2941
		0.6545	-10.2459
		0.6622	-10.1961
		0.6699	-10.144
		0.6776	-10.089
		0.6853	-10.0304
		0.693	-9.96731
		0.7007	-9.89888
		0.7084	-9.82416
		0.7161	-9.74214
		0.7238	-9.65174
		0.7315	-9.55177
		0.7392	-9.441
		0.7469	-9.31809
		0.7546	-9.18163
		0.7623	-9.03013
		0.77	-9

Lähde: Vinha et al. (2013).

NAME	=	C13 Pine across grain	
RHO	=	532	kg/m ³
CE	=	2000	J/(kgK)
THETA_POR	=	0.7	m ³ /m ³
THETA_EFF	=	0.67	m ³ /m ³
THETA_CAP	=	0.55	m ³ /m ³
THETA_80	=	0.09	m ³ /m ³
LAMBDA	=	0.12	W/(mK)
AW	=	0.004	kg/(m ² s ^{0.5})
MEW	=	84	-
KLEFF	=	3.00E-13	s
KG	=	2.16E-09	s

C13 Pine across grain			
Theta_l	pC	Theta_l	lgKl
0.669997474	0	0	-22.5229
0.66996717	1.11	0.0067	-20.9486
0.669935955	1.21	0.0134	-20.2327
0.669894696	1.31	0.0201	-19.5899
0.669852345	1.41	0.0268	-19.0165
0.669798075	1.51	0.0335	-18.5082
0.669742479	1.61	0.0402	-18.0612
0.669672343	1.71	0.0469	-17.6715
0.669600633	1.81	0.0536	-17.335
0.66951159	1.91	0.0603	-17.0477
0.669420718	2.01	0.067	-16.8057
0.669309672	2.11	0.0737	-16.6049
0.669196543	2.21	0.0804	-16.4413
0.669060486	2.31	0.0871	-16.3109
0.668922117	2.41	0.0938	-16.2098
0.668758349	2.51	0.1005	-16.1338
0.668592089	2.61	0.1072	-16.0791
0.668398432	2.71	0.1139	-16.0416
0.668202169	2.81	0.1206	-16.0173
0.667977196	2.91	0.1273	-16.0022
0.667749577	3.01	0.134	-15.9923
0.667492793	3.11	0.1407	-15.9836
0.667233396	3.21	0.1474	-15.9721
0.666945195	3.31	0.1541	-15.9537
0.666654368	3.41	0.1608	-15.9246
0.666334678	3.51	0.1675	-15.8806
0.666011664	3.61	0.1742	-15.8179
0.665652122	3.71	0.1809	-15.7945
0.665285083	3.81	0.1876	-15.7712
0.664835506	3.91	0.1943	-15.7478
0.664361615	4.01	0.201	-15.7244
0.663620247	4.11	0.2077	-15.7011
0.662803048	4.21	0.2144	-15.6777
0.661151437	4.31	0.2211	-15.6544
0.659302103	4.41	0.2278	-15.631
0.655277199	4.51	0.2345	-15.6077
0.650837833	4.61	0.2412	-15.5843
0.641837977	4.71	0.2479	-15.561
0.632155841	4.81	0.2546	-15.5376
0.614966334	4.91	0.2613	-15.5143
0.596927147	5.01	0.268	-15.4909
0.569538552	5.11	0.2747	-15.4676
0.541422263	5.21	0.2814	-15.4442
0.505298851	5.31	0.2881	-15.4209
0.468907446	5.41	0.2948	-15.3975
0.429567237	5.51	0.3015	-15.3742
0.390557646	5.61	0.3082	-15.3508

C13 Pine across grain			
Theta_l	pC	Theta_l	lgKl
0.355185961	5.71	0.3149	-15.3275
0.320563095	5.81	0.3216	-15.3041
0.294179801	5.91	0.3283	-15.2808
0.268576153	6.01	0.335	-15.2574
0.251551232	6.11	0.3417	-15.2341
0.23495219	6.21	0.3484	-15.2107
0.223039181	6.31	0.3551	-15.1874
0.211102354	6.41	0.3618	-15.164
0.198903436	6.51	0.3685	-15.1407
0.186647943	6.61	0.3752	-15.1173
0.185	6.614980203	0.3819	-15.094
0.169	6.992022873	0.3886	-15.0706
0.10805	7.401543405	0.3953	-15.0473
0.0801	7.590174403	0.402	-15.0239
0.04495	7.907844394	0.4087	-14.9872
0.0323	8.176061011	0.4154	-14.9519
0	10	0.4221	-14.918
		0.4288	-14.8852
		0.4355	-14.8534
		0.4422	-14.8224
		0.4489	-14.792
		0.4556	-14.7619
		0.4623	-14.7321
		0.469	-14.7021
		0.4757	-14.6719
		0.4824	-14.6411
		0.4891	-14.6096
		0.4958	-14.577
		0.5025	-14.5431
		0.5092	-14.5077
		0.5159	-14.4705
		0.5226	-14.4311
		0.5293	-14.3894
		0.536	-14.3449
		0.5427	-14.2974
		0.5494	-14.2466
		0.5561	-14.1921
		0.5628	-14.1337
		0.5695	-14.071
		0.5762	-14.0036
		0.5829	-13.9311
		0.5896	-13.8533
		0.5963	-13.7698
		0.603	-13.6801
		0.6097	-13.584
		0.6164	-13.4809
		0.6231	-13.3706
		0.6298	-13.2525
		0.6365	-13.1264
		0.6432	-12.9917
		0.6499	-12.848
		0.6566	-12.695
		0.6633	-12.5321
		0.67	-12.5229

Lähde: Vinha et al. (2013).

NAME	=	C11 Plastic film 0.2 mm	
FLAGS	=	AIRTIGHT	WATERTIGHT
RHO	=	980	kg/m ³
CE	=	2300	J/(kgK)
THETA_POR	=	0.001	m ³ /m ³
THETA_EFF	=	0.001	m ³ /m ³
THETA_CAP	=	0.0001	m ³ /m ³
THETA_80	=	3.87E-05	m ³ /m ³
LAMBDA	=	0.15	W/(mK)
MEW	=	89000	-

C11 Plastic film 0.2 mm	
Theta_l	pC
5.77915E-06	9
3.7813E-06	9.1
1.89166E-06	9.2
1.19281E-06	9.3
5.348E-07	9.4
3.2607E-07	9.5
1.303E-07	9.6
7.707E-08	9.7
2.732E-08	9.8
1.593E-08	9.9
0	10

C11 Plastic film 0.2 mm	
Theta_l	pC
0.001	0
0.000999976	4.2
0.000999937	4.3
0.000999887	4.4
0.000999727	4.5
0.000999534	4.6
0.000998979	4.7
0.000998334	4.8
0.000996698	4.9
0.000994854	5
0.000990729	5.1
0.000986209	5.2
0.000977333	5.3
0.000967838	5.4
0.000951528	5.5
0.000934444	5.6
0.000908847	5.7
0.000882525	5.8
0.000848213	5.9
0.000813483	6
0.000774161	6.1
0.000734894	6.2
0.000696244	6.3
0.000658067	6.4
0.000625094	6.5
0.000592747	6.6
0.000567286	6.7
0.000542273	6.8
0.000522205	6.9
0.000502182	7
0.000482664	7.1
0.000462765	7.2
0.000438681	7.3
0.00041398	7.4
0.000382507	7.5
0.000350505	7.6
0.000312672	7.7
0.000274686	7.8
0.00023502	7.9
0.000195683	8
0.000159966	8.1
0.000124934	8.2
9.74297E-05	8.3
7.07095E-05	8.4
5.26159E-05	8.5
3.51829E-05	8.6
2.50176E-05	8.7
0.000015293	8.8
1.04161E-05	8.9

Lähde: Vinha et al. (2013).

NAME	=	D1 Mineral Wool	
FLAGS	=	WATERTIGHT	
RHO	=	22	kg/m ³
CE	=	850	J/(kgK)
THETA_POR	=	0.98	m ³ /m ³
THETA_EFF	=	0.98	m ³ /m ³
THETA_CAP	=	0.003	m ³ /m ³
THETA_80	=	0.001	m ³ /m ³
LAMBDA	=	0.035	W/(mK)
MEW	=	1.2	-
KG	=	2.70E-04	s

D1 Mineral Wool	
Theta_l	pC
0.98	0
0.0024	6.614889849
0.0019	6.991932519
0.0013	7.309638507
0.001	7.40145305
0.00098	7.47975559
0.00078	7.590084048
0.00066	7.765429721
0.00054	7.90775404
0.00045	8.175970656
0	10

Lähde: Vinha et al. (2013).

NAME	=	D4a Cellulose Insulation	
RHO	=	60	kg/m ³
CE	=	2000	J/(kgK)
THETA_POR	=	0.96	m ³ /m ³
THETA_EFF	=	0.96	m ³ /m ³
THETA_CAP	=	0.57	m ³ /m ³
THETA_80	=	0.008	m ³ /m ³
LAMBDA	=	0.041	W/(mK)
AW	=	0.065	kg/(m ² s ^{0.5})
MEW	=	1.7	-
KLEFF	=	1.70E-08	s
KG	=	2.88E-04	s

D4a Cellulose Insulation			
Theta_l	pC	Theta_l	lgKl
0.96	0	0	-16.7696
0.959951203	0.81	0.0031	-16.7696
0.959899882	0.91	0.004025	-16.3327
0.959677853	1.01	0.00495	-15.9472
0.959384611	1.11	0.00635	-15.7045
0.95830776	1.21	0.00775	-15.5099
0.956980166	1.31	0.01095	-15.3596
0.9528936	1.41	0.02275	-15.2396
0.948136445	1.51	0.0288	-15.1027
0.936000576	1.61	0.0384	-14.8854
0.922525862	1.71	0.048	-14.6682
0.894319248	1.81	0.0576	-14.4509
0.86418745	1.91	0.0672	-14.2337
0.81287209	2.01	0.0768	-14.0165
0.759743434	2.11	0.0864	-13.7992
0.686662349	2.21	0.096	-13.2821
0.612881021	2.31	0.1056	-12.8203
0.531394637	2.41	0.1152	-12.4088
0.450768307	2.51	0.1248	-12.0427
0.379605437	2.61	0.1344	-11.7177
0.310309699	2.71	0.144	-11.4297
0.26155873	2.81	0.1536	-11.1748
0.214670467	2.91	0.1632	-10.9496
0.188278195	3.01	0.1728	-10.7507
0.163107658	3.11	0.1824	-10.5752
0.151380298	3.21	0.192	-10.4204
0.140203286	3.31	0.2016	-10.2836
0.135082032	3.41	0.2112	-10.1627
0.130099363	3.51	0.2208	-10.0555
0.126641683	3.61	0.2304	-9.96014
0.123147062	3.71	0.24	-9.8749
0.119245978	3.81	0.2496	-9.79824
0.115262131	3.91	0.2592	-9.72882
0.110367677	4.01	0.2688	-9.66541
0.105405485	4.11	0.2784	-9.60694
0.099697997	4.21	0.288	-9.55249
0.093966979	4.31	0.2976	-9.50123
0.087977088	4.41	0.3072	-9.45249
0.082016851	4.51	0.3168	-9.40567
0.076382995	4.61	0.3264	-9.36028
0.07082305	4.71	0.336	-9.31593
0.066076234	4.81	0.3456	-9.27229
0.061426426	4.91	0.3552	-9.22912
0.057843898	5.01	0.3648	-9.18625
0.054358061	5.11	0.3744	-9.14357
0.051936106	5.21	0.384	-9.10099
0.049593715	5.31	0.3936	-9.05852

D4a Cellulose Insulation			
Theta_l	pC	Theta_l	lgKl
0.048126806	5.41	0.4032	-9.01617
0.046715318	5.51	0.4128	-8.97399
0.045913709	5.61	0.4224	-8.93207
0.045140218	5.71	0.432	-8.89052
0.044676125	5.81	0.4416	-8.84946
0.044191594	5.91	0.4512	-8.80902
0.043482192	6.01	0.4608	-8.76937
0.042655306	6.11	0.4704	-8.73064
0.040535606	6.21	0.48	-8.69299
0.038236608	6.31	0.4896	-8.65656
0.033964694	6.41	0.4992	-8.6215
0.029647517	6.51	0.5088	-8.58795
0.024832291	6.61	0.5184	-8.55601
0.0246	6.619402042	0.528	-8.52579
0.0209	6.996444712	0.5376	-8.49738
0.01095	7.405965243	0.5472	-8.47086
0.00775	7.594596241	0.5568	-8.44626
0.00495	7.912266233	0.5664	-8.42362
0.0031	8.180482849	0.576	-8.40295
0	10	0.5856	-8.38421
		0.5952	-8.36738
		0.6048	-8.35238
		0.6144	-8.33913
		0.624	-8.32751
		0.6336	-8.31738
		0.6432	-8.3086
		0.6528	-8.30098
		0.6624	-8.29434
		0.672	-8.28845
		0.6816	-8.2831
		0.6912	-8.27804
		0.7008	-8.27304
		0.7104	-8.26785
		0.72	-8.2622
		0.7296	-8.25586
		0.7392	-8.24856
		0.7488	-8.24008
		0.7584	-8.2302
		0.768	-8.21872
		0.7776	-8.20544
		0.7872	-8.19024
		0.7968	-8.17299
		0.8064	-8.15362
		0.816	-8.13212
		0.8256	-8.10851
		0.8352	-8.08289
		0.8448	-8.05541
		0.8544	-8.02633
		0.864	-7.99596
		0.8736	-7.96471
		0.8832	-7.9331
		0.8928	-7.90176
		0.9024	-7.87143
		0.912	-7.84298
		0.9216	-7.81742
		0.9312	-7.7959
		0.9408	-7.77973
		0.9504	-7.7704
		0.96	-7.76955

Lähde: Vinha et al. (2013).

NAME	=	Hygrokalvo	
FLAGS	=	AIRTIGHT	WATERTIGHT
RHO	=	83	kg/m ³
CE	=	1800	J/(kgK)
THETA_POR	=	0.11	m ³ /m ³
THETA_EFF	=	0.11	m ³ /m ³
THETA_CAP	=	0.0001	m ³ /m ³
THETA_80	=	0.0035	m ³ /m ³
LAMBDA	=	1	W/(mK)
MEW	=	5000	-

Hygrokalvo			
Theta_l	RH	mew	RH
0	0	5000	0
0.0014	0.1	5000	0.01
0.0018	0.3	5000	0.02
0.0022	0.5	5000	0.03
0.0028	0.65	5000	0.04
0.0035	0.8	5000	0.05
0.0047	0.9	5000	0.06
0.0054	0.93	5000	0.07
0.0061	0.95	5000	0.08
0.0112	0.99	5000	0.09
0.0244	0.999	5000	0.1
0.0301	0.9995	5000	0.11
0.0459	0.9999	5000	0.12
0.11	1	5000	0.13
		5000	0.14
		5000	0.15
		5000	0.16
		5000	0.17
		5000	0.18
		5000	0.19
		5000	0.2
		5000	0.21
		4990	0.22
		4990	0.23
		4990	0.24
		4980	0.25
		4980	0.26
		4980	0.27
		4970	0.28
		4970	0.29
		4970	0.3
		4933	0.31
		4921	0.32
		4876	0.33
		4825	0.34
		4768	0.35
		4706	0.36
		4638	0.37
		4563	0.38
		4481	0.39
		4392	0.4
		4296	0.41
		4192	0.42
		4080	0.43
		3961	0.44
		3834	0.45
		3701	0.46
		3560	0.47
		3414	0.48

Hygrokalvo		
	mew	RH
	3262	0.49
	3106	0.5
	2947	0.51
	2786	0.52
	2624	0.53
	2462	0.54
	2302	0.55
	2144	0.56
	1990	0.57
	1841	0.58
	1697	0.59
	1560	0.6
	1430	0.61
	1306	0.62
	1191	0.63
	1082	0.64
	982	0.65
	889	0.66
	804	0.67
	725	0.68
	653	0.69
	588	0.7
	529	0.71
	475	0.72
	426	0.73
	383	0.74
	343	0.75
	308	0.76
	276	0.77
	248	0.78
	223	0.79
	200	0.8
	200	0.81
	200	0.82
	200	0.83
	200	0.84
	200	0.85
	200	0.86
	200	0.87
	200	0.88
	200	0.89
	200	0.9
	200	0.91
	200	0.92
	200	0.93
	200	0.94
	200	0.95
	200	0.96
	200	0.97
	200	0.98
	200	0.99
	200	1

Lähteet: Vinha et al. (2013) ja Isover (2018).

NAME	=	Normal Brick	
RHO	=	1786.25	kg/m ³
CE	=	888.665	J/(kgK)
THETA_POR	=	0.353511	m ³ /m ³
THETA_EFF	=	0.319382	m ³ /m ³
THETA_CAP	=	0.27	m ³ /m ³
THETA_80	=	0.0135377	m ³ /m ³
LAMBDA	=	0.548333	W/(mK)
AW	=	0.198664	kg/(m ² s ^{0.5})
MEW	=	18.0084	-
KLEFF	=	2.04E-09	s

Veden huokosalipaine, kosteudenjohtavuuden kymmenkertaiset logaritmit sekä vesihöyrynläpäisevyys kosteuspitoisuuden funktiona Delphinin omasta materiaalikirjastosta.

Lähde: Delphin-materiaalikirjasto.

NAME	=	Polyurethane board	
FLAGS	=	AIRTIGHT	WATERTIGHT
RHO	=	35	kg/m ³
CE	=	1500	J/(kgK)
THETA_POR	=	0.949	m ³ /m ³
THETA_EFF	=	0.949	m ³ /m ³
THETA_80	=	2.00E-03	m ³ /m ³
LAMBDA	=	0.023	W/(mK)
AW	=	1.00E-07	kg/(m ² s ^{0.5})
MEW	=	4900	-

Polyurethane board	
Theta_l	pC
0.949	0
0.948967762	0.3
0.948952654	0.4
0.948929186	0.5
0.948904578	0.6
0.948867415	0.7
0.948828592	0.8
0.948771652	0.9
0.948712406	1
0.948627983	1.1
0.948540494	1.2
0.948419383	1.3
0.948294352	1.4
0.948126246	1.5
0.947953348	1.6
0.9477276	1.7
0.947496215	1.8
0.947202869	1.9
0.946903241	2
0.946534441	2.1
0.946158979	2.2
0.945710329	2.3
0.945255066	2.4
0.944726995	2.5
0.944192812	2.6
0.943591402	2.7
0.942984887	2.8
0.942322181	2.9
0.941655812	3
0.940949225	3.1
0.940240768	3.2
0.939511765	3.3
0.938782819	3.4
0.938054547	3.5
0.937327983	3.6
0.936620257	3.7
0.93591423	3.8
0.935227021	3.9
0.934534754	4
0.933786875	4.1
0.933004225	4.2
0.93183911	4.3
0.930547407	4.4
0.9278628	4.5
0.924832083	4.6
0.917993076	4.7
0.910406951	4.8
0.894600046	4.9
0.877520086	5

Polyurethane board	
Theta_l	pC
0.846432365	5.1
0.813675115	5.2
0.762547313	5.3
0.709849466	5.4
0.639875644	5.5
0.569101881	5.6
0.489525992	5.7
0.41031802	5.8
0.335158254	5.9
0.261348878	6
0.202398317	6.1
0.145159923	6.2
0.106761067	6.3
0.069829973	6.4
0.049049207	6.5
0.029220014	6.6
0.019861441	6.7
0.010988547	6.8
0.007459757	6.9
0.004129754	7
0.002987148	7.1
0.001910384	7.2
0.001558201	7.3
0.001223773	7.4
0.001084735	7.5
0.00094974	7.6
0.000859187	7.7
0.000769705	7.8
0.000691925	7.9
0.000614857	8
0.000545571	8.1
0.000477081	8.2
0.000417418	8.3
0.000358637	8.4
0.000309611	8.5
0.000261468	8.6
0.0002231	8.7
0.000185548	8.8
0.000156955	8.9
0.000129064	9
0.000108784	9.1
8.90542E-05	9.2
7.53601E-05	9.3
0	10

Polyuretaanilevy oli alumiinilaminaattipintainen.

Lähteet: Delphin-materiaalikirjasto ja RIL-255-1-2014.

NAME	=	Air gap 3mm	
FLAGS	=	AIR	WATERTIGHT
RHO	=	1.3	kg/m ³
CE	=	1050	J/(kgK)
THETA_POR	=	1	m ³ /m ³
THETA_EFF	=	1	m ³ /m ³
THETA_80	=	1.00E-05	m ³ /m ³
LAMBDA	=	0.03	W/(mK)
AW	=	1.00E-07	kg/(m ² s ^{0.5})
MEW	=	1	-
KG	=	0.1	s

NAME	=	Air gap 25mm	
FLAGS	=	AIR	WATERTIGHT
RHO	=	1.3	kg/m ³
CE	=	1050	J/(kgK)
THETA_POR	=	1	m ³ /m ³
THETA_EFF	=	1	m ³ /m ³
THETA_80	=	1.00E-05	m ³ /m ³
LAMBDA	=	0.138	W/(mK)
AW	=	1.00E-07	kg/(m ² s ^{0.5})
MEW	=	0.4	-
KG	=	0.1	s

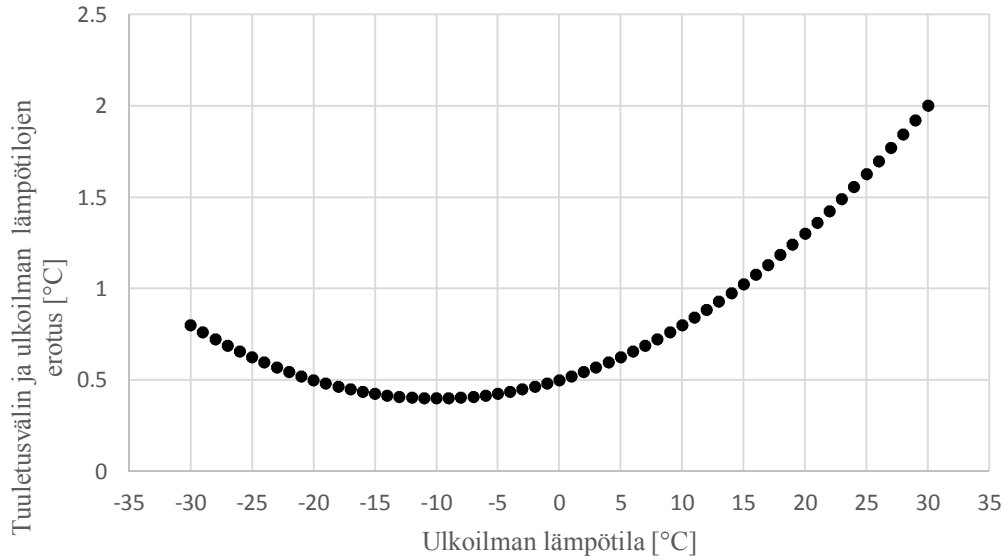
NAME	=	Air gap 40mm	
FLAGS	=	AIR	WATERTIGHT
RHO	=	1.3	kg/m ³
CE	=	1050	J/(kgK)
THETA_POR	=	1	m ³ /m ³
THETA_EFF	=	1	m ³ /m ³
THETA_80	=	1.00E-05	m ³ /m ³
LAMBDA	=	0.222	W/(mK)
AW	=	1.00E-07	kg/(m ² s ^{0.5})
MEW	=	0.25	-
KG	=	0.1	s

NAME	=	Air gap 50mm	
FLAGS	=	AIR	WATERTIGHT
RHO	=	1.3	kg/m ³
CE	=	1050	J/(kgK)
THETA_POR	=	1	m ³ /m ³
THETA_EFF	=	1	m ³ /m ³
THETA_80	=	1.00E-05	m ³ /m ³
LAMBDA	=	0.278	W/(mK)
AW	=	1.00E-07	kg/(m ² s ^{0.5})
MEW	=	0.2	-
KG	=	0.1	s

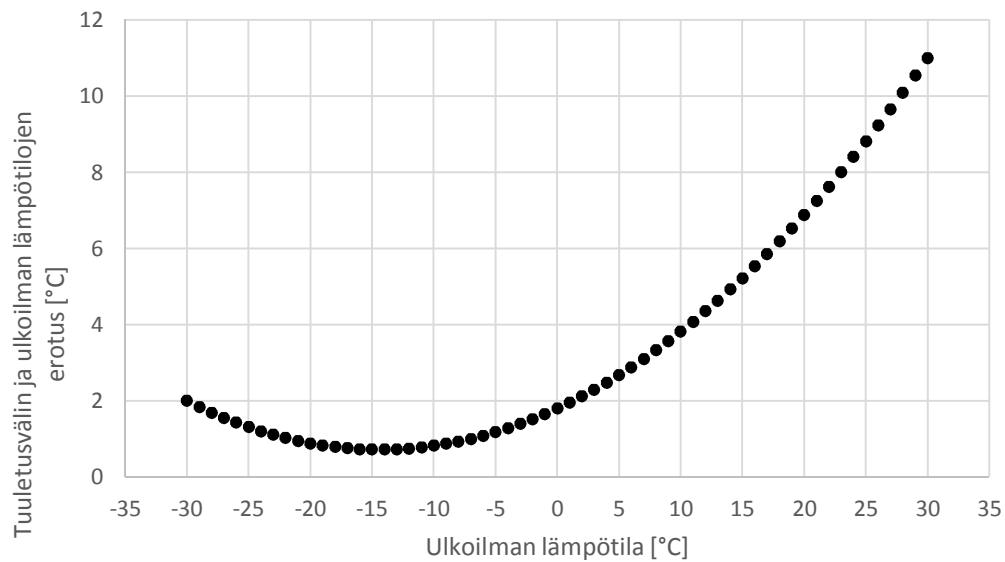
NAME	=	Air gap 80mm	
FLAGS	=	AIR	WATERTIGHT
RHO	=	1.3	kg/m ³
CE	=	1050	J/(kgK)
THETA_POR	=	1	m ³ /m ³
THETA_EFF	=	1	m ³ /m ³
THETA_80	=	1.00E-05	m ³ /m ³
LAMBDA	=	0.435	W/(mK)
AW	=	1.00E-07	kg/(m ² s ^{0.5})
MEW	=	0.125	-
KG	=	0.1	s

Lähde: Delphin-materiaalikirjasto.

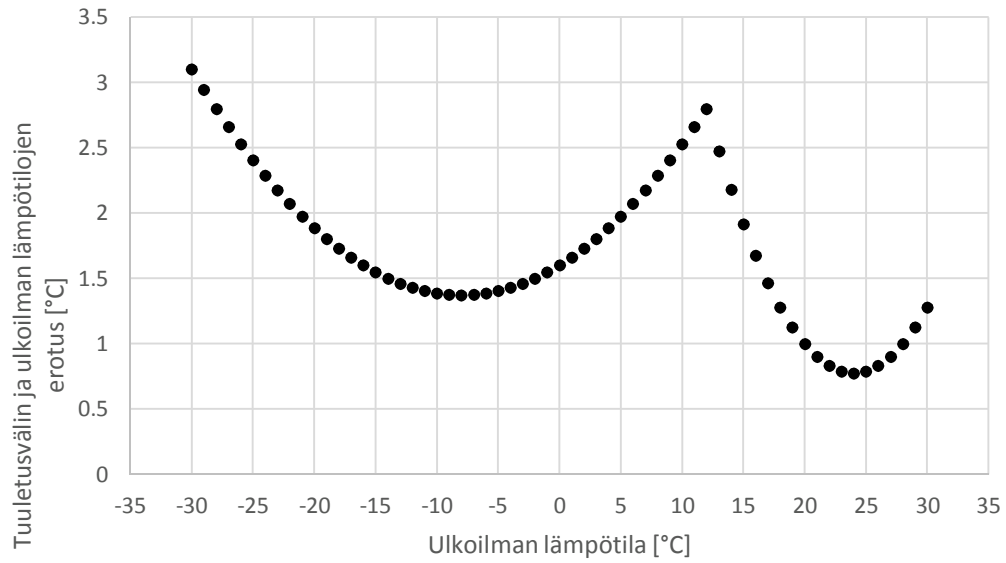
Tuuletusvälin lämpötiloja käytettiin ainoastaan ilmanvaihtuvuuden laskennassa, joka suoritettiin ennen varsinaisia rakenteiden simulointitarkasteluja. Tuuletusvälin lämpötilat on sovitettu seuraaviin käyriin lähteessä Vinha (2007) esitettyjen kuvaajien perusteella.



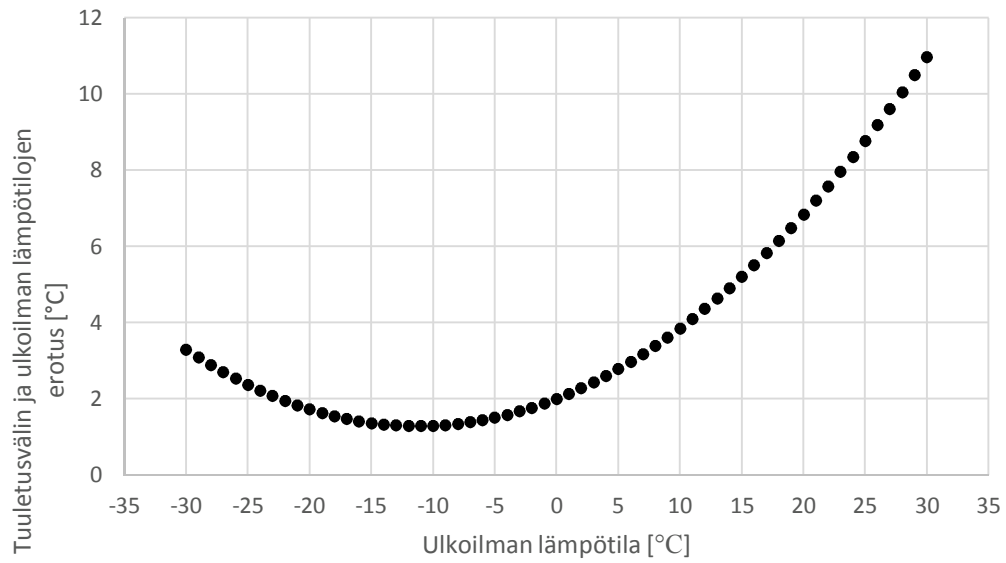
Kuva 1. Tuuletusvälin ja ulkoilman lämpötilojen erotus ulkoilman lämpötilan funktiona. Puuverhottu pohjoisseinä.



Kuva 2. Tuuletusvälin ja ulkoilman lämpötilojen erotus ulkoilman lämpötilan funktiona. Puuverhottu eteläseinä.



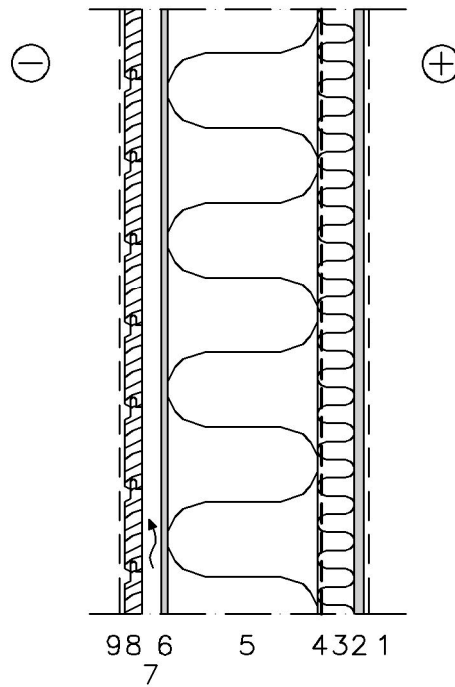
Kuva 3. Tuuletusvälin ja ulkoilman lämpötilojen erotus ulkoilman lämpötilan funktiona. Tiiliverhottu pohjoisseinä.



Kuva 4. Tuuletusvälin ja ulkoilman lämpötilojen erotus ulkoilman lämpötilan funktiona. Tiiliverhottu eteläseinä.

USP1

1:10



- | | |
|--------|--|
| | 1 PINTAKÄSITTELY |
| 13 mm | 2 SISÄVERHOUSLEVY, KIPSILEVY (C1) |
| 48 mm | 3 LÄMMÖNERISTE, MINERAALIVILLA (D1), $\lambda = 0.035$,
PYSTYKOOLAUS (C13), 48x48 mm, k600 |
| 0.2 mm | 4 HÖYRYNSULKUMUOVI (C11) |
| 198 mm | 5 LÄMMÖNERISTE, MINERAALIVILLA (D1), $\lambda = 0.035$,
KANTAVA RUNKO (C13), 48x198 mm, k600 |
| 9 mm | 6 TUULENSUOJALEVY, KIPSILEVY (A1) |
| 25 mm | 7 TUULETUSVÄLI, PYSTYKOOLAUS (C13), 25x100 mm, k600 |
| 23 mm | 8 JULKISIVUPANEELI (C13) |
| | 9 PINTAKÄSITTELY |

U-arvo 0.16 W/(m²K)

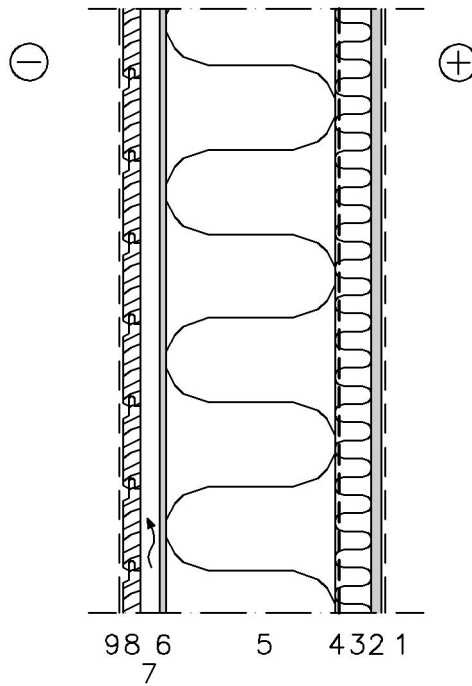
LÄMMÖNERISTEKERROKSEN PAKSUUS/
RUNKOTOLPAN LEVEYS

U-arvo

198 mm	0,16 W/(m ² K)
270 mm	0,13 W/(m ² K)
315 mm	0,11 W/(m ² K)
360 mm	0,10 W/(m ² K)

USP2

1:10



	1 PINTAKÄSITTELY
13 mm	2 SISÄVERHOUSLEVY, KIPSILEVY (C1)
48 mm	3 LÄMMÖNERISTE, PUUKUITUERISTE (D4a), $\lambda = 0.041$, PYSTYKOOLAUS (C13), 48x48 mm, k600
0.2 mm	4 HÖYRYNSULKUMUOVI (C11)
223 mm	5 LÄMMÖNERISTE, PUUKUITUERISTE (D4a), $\lambda = 0.041$, KANTAVA RUNKO (C13), 48x223 mm, k600
9 mm	6 TUULENSUOJALEVY, KIPSILEVY (A1)
25 mm	7 TUULETUSVÄLI, PYSTYKOOLAUS (C13), 25x100 mm, k600
23 mm	8 JULKISIVUPANEELI (C13)
	9 PINTAKÄSITTELY

U-arvo

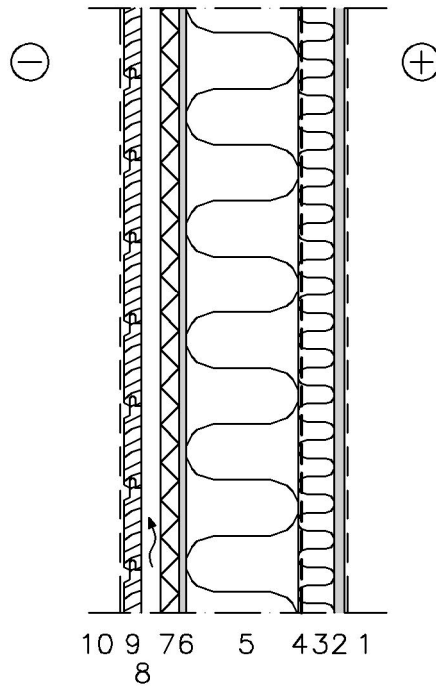
0.17 W/(m²K)LÄMMÖNERISTEKERROKSEN PAKSUUS/
RUNKOTOLPAN LEVEYS

U-arvo

223 mm
270 mm
360 mm0,17 W/(m²K)
0,14 W/(m²K)
0,12 W/(m²K)

USP3

1:10



- | | |
|--------|--|
| | 1 PINTAKÄSITTELY |
| 13 mm | 2 SISÄVERHOUSLEVY, KIPSILEVY (C1) |
| 48 mm | 3 LÄMMÖNERISTE, MINERAALIVILLA (D1), $\lambda = 0.035$,
PYSTYKOOLAUS (C13), 48x48 mm, k600 |
| 0.2 mm | 4 HÖYRYNSULKUMUOVI (C11) |
| 148 mm | 5 LÄMMÖNERISTE, MINERAALIVILLA (D1), $\lambda = 0.035$,
KANTAVA RUNKO (C13), 48x148 mm, k600 |
| 9 mm | 6 TUULENSUOJALEVY, KIPSILEVY (A1) |
| 25 mm | 7 TUULENSUOJAMINERAALIVILLA (A4), $\lambda = 0.031$ |
| 25 mm | 8 TUULETUSVÄLI, PYSTYKOOLAUS (C13), 25x100 mm, k600 |
| 23 mm | 9 JULKISIVUPANEELI (C13) |
| | 10 PINTAKÄSITTELY |

U-arvo 0.17 W/(m²K)

LÄMMÖNERISTEKERROKSEN PAKSUUS/
RUNKOTOLPAN LEVEYS

U-arvo

TUULENSUOJAMINERAALIVILLA, 25 mm:

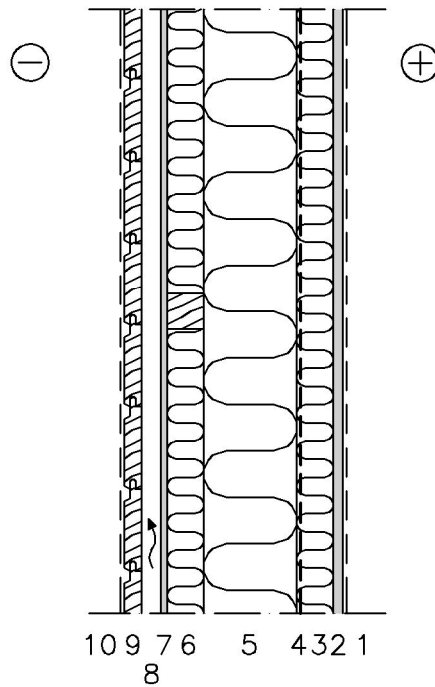
148 mm	0,17 W/(m ² K)
198 mm	0,14 W/(m ² K)
270 mm	0,12 W/(m ² K)
315 mm	0,10 W/(m ² K)

TUULENSUOJAMINERAALIVILLA, 50 mm:

198 mm	0,13 W/(m ² K)
--------	---------------------------

USP4

1:10



	1 PINTAKÄSITTELY
13 mm	2 SISÄVERHOUSLEVY, KIPSILEVY (C1)
48 mm	3 LÄMMÖNERISTE, MINERAALIVILLA (D1), $\lambda = 0.035$, PYSTYKOOLAUS (C13), 48x48 mm, k600
0.2 mm	4 HÖYRYNSULKUMUOVI (C11)
123 mm	5 LÄMMÖNERISTE, MINERAALIVILLA (D1), $\lambda = 0.035$, KANTAVA RUNKO (C13), 48x123 mm, k600
48 mm	6 LÄMMÖNERISTE, MINERAALIVILLA (D1), $\lambda = 0.035$, VAAKAKOOLAUS (C13), 48x48 mm, k600
9 mm	7 TUULENSUOJALEVY, KIPSILEVY (A1)
25 mm	8 TUULETUSVÄLI, PYSTYKOOLAUS (C13), 25x100 mm, k600
23 mm	9 JULKISIVUPANEELI (C13)
	10 PINTAKÄSITTELY

U-arvo

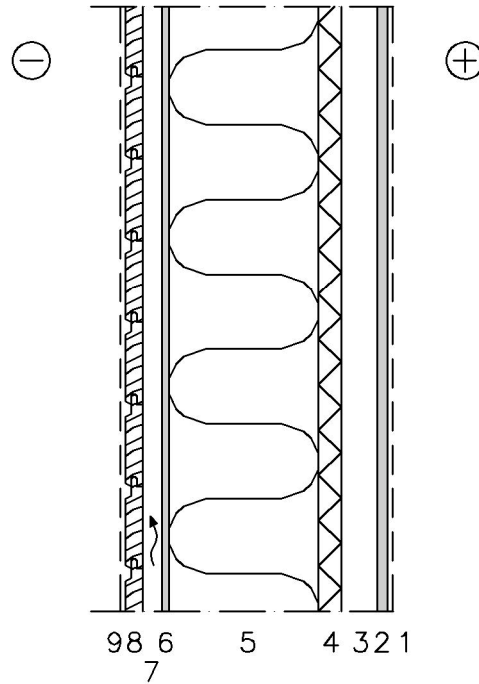
0.17 W/(m²K)LÄMMÖNERISTEKERROKSEN PAKSUUS/
RUNKOTOLPAN LEVEYS

U-arvo

123 mm
198 mm
315 mm0,17 W/(m²K)
0,13 W/(m²K)
0,10 W/(m²K)

USP5

1:10



- | | |
|--------|--|
| | 1 PINTAKÄSITTELY |
| 13 mm | 2 SISÄVERHOUSLEVY, KIPSILEVY (C1) |
| 48 mm | 3 PYSTYKOOLAUS (C13), 48x48 mm, k600 |
| 30 mm | 4 POLYURETAANILEVY (Polyurethane board) |
| 198 mm | 5 LÄMMÖNERISTE, MINERAALIVILLA (D1), $\lambda = 0.035$,
KANTAVA RUNKO (C13), 48x198 mm, k600 |
| 9 mm | 6 TUULENSUOJALEVY, KIPSILEVY (A1) |
| 25 mm | 7 TUULETUSVÄLI, PYSTYKOOLAUS (C13), 25x100 mm, k600 |
| 23 mm | 8 JULKISIVUPANEELI (C13) |
| | 9 PINTAKÄSITTELY |

U-arvo 0.16 W/(m²K)

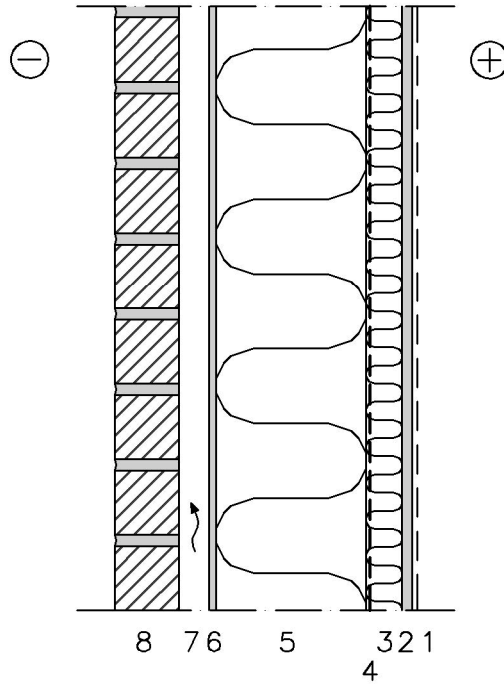
LÄMMÖNERISTEKERROKSEN PAKSUUS/
RUNKOTOLPAN LEVEYS

U-arvo

198 mm	0,16 W/(m ² K)
270 mm	0,13 W/(m ² K)
315 mm	0,11 W/(m ² K)

UST1

1:10

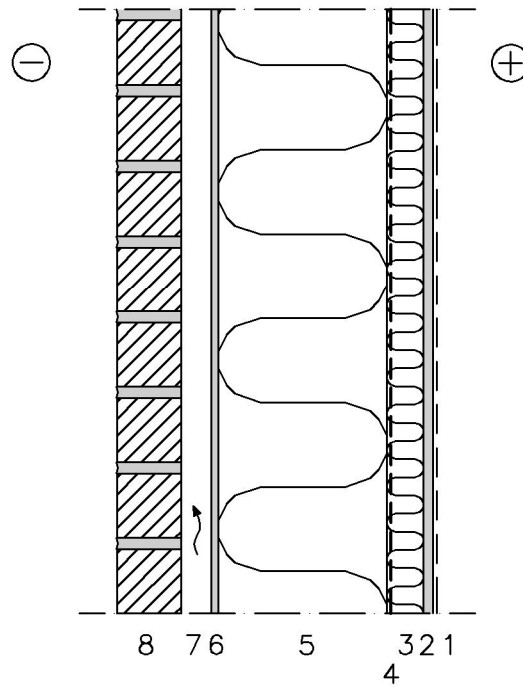


- | | |
|--------|--|
| 13 mm | 1 PINTAKÄSITTELY |
| 48 mm | 2 SISÄVERHOUSLEVY, KIPSILEVY (C1) |
| 0.2 mm | 3 LÄMMÖNERISTE, MINERAALIVILLA (D1), $\lambda = 0.035$,
PYSTYKOOLAUS (C13), 48x48 mm, k600 |
| 198 mm | 4 HÖYRYNSULKUMUOVI (C11) |
| 9 mm | 5 LÄMMÖNERISTE, MINERAALIVILLA (D1), $\lambda = 0.035$,
KANTAVA RUNKO (C13), 48x198 mm, k600 |
| 40 mm | 6 TUULENSUOJALEVY, KIPSILEVY (A1) |
| 85 mm | 7 TUULETUSVÄLI |
| | 8 TIILIVERHOUS (Normal Brick) |

U-arvo $0.16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

UST2

1:10

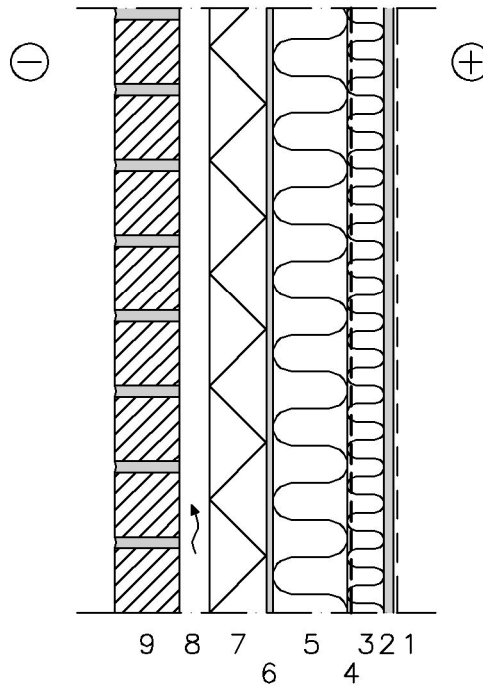


- | | |
|--------|---|
| 13 mm | 1 PINTAKÄSITTELY |
| 48 mm | 2 SISÄVERHOUSLEVY, KIPSILEVY (C1) |
| 0.2 mm | 3 LÄMMÖNERISTE, PUUKUITUERISTE (D4a), $\lambda = 0.041$,
PYSTYKOOLAUS (C13), 48x48 mm, k600 |
| 223 mm | 4 HÖYRYNSULKUMUOVI (C11) |
| 9 mm | 5 LÄMMÖNERISTE, PUUKUITUERISTE (D4a), $\lambda = 0.041$,
KANTAVA RUNKO (C13), 48x223 mm, k600 |
| 40 mm | 6 TUULENSUOJALEVY, KIPSILEVY (A1) |
| 85 mm | 7 TUULETUSVÄLI |
| | 8 TIILIVERHOUS (Normal Brick) |

U-arvo 0.17 W/(m²K)

UST3

1:10



	1 PINTAKÄSITTELY
13 mm	2 SISÄVERHOUSLEVY, KIPSILEVY (C1)
48 mm	3 LÄMMÖNERISTE, MINERAALIVILLA (D1), $\lambda = 0.035$, PYSTYKOOLAUS (C13), 48x48 mm, k600
0.2 mm	4 HÖYRYNSULKUMUOVI (C11)
98 mm	5 LÄMMÖNERISTE, MINERAALIVILLA (D1), $\lambda = 0.035$, KANTAVA RUNKO (C13), 48x98 mm, k600
9 mm	6 TUULENSUOJALEVY, KIPSILEVY (A1)
75 mm	7 TUULENSUOJAMINERAALIVILLA (A4), $\lambda = 0.031$
40 mm	8 TUULETUSVÄLI
85 mm	9 TIILIVERHOUS (Normal Brick)

U-arvo $0.16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

LÄMMÖNERISTEKERROKSEN PAKSUUS/
RUNKOTOLPAN LEVEYS

U-arvo

TUULENSUOJAMINERAALIVILLA, 75 mm:

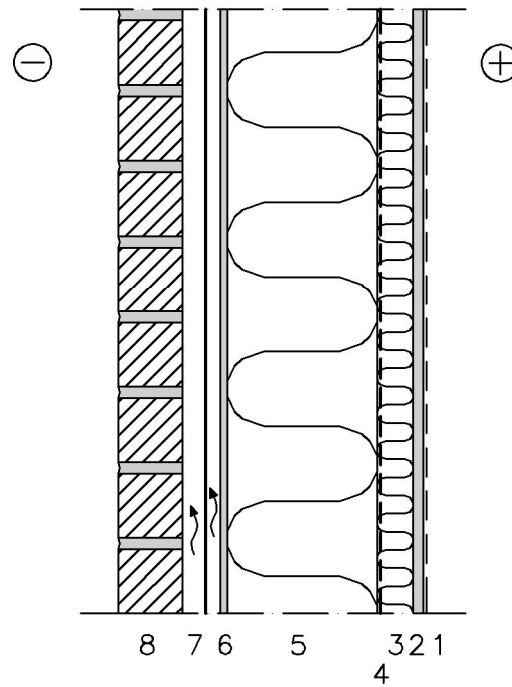
98 mm	$0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
148 mm	$0,13 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
198 mm	$0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

TUULENSUOJAMINERAALIVILLA, 100 mm:

98 mm	$0,14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
148 mm	$0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
198 mm	$0,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

UST4

1:10



- | | |
|----------|--|
| | 1 PINTAKÄSITTELY |
| 13 mm | 2 SISÄVERHOUSLEVY, KIPSILEVY (C1) |
| 48 mm | 3 LÄMMÖNERISTE, MINERAALIVILLA (D1), $\lambda = 0.035$,
PYSTYKOOLAUS (C13), 48x48 mm, k600 |
| 0.2 mm | 4 HÖYRYNSULKUMUOVI (C11) |
| 198 mm | 5 LÄMMÖNERISTE, MINERAALIVILLA (D1), $\lambda = 0.035$,
KANTAVA RUNKO (C13), 48x198 mm, k600 |
| 9 mm | 6 TUULENSUOJALEVY, KIPSILEVY (A1) |
| 20+30 mm | 7 TUULETUSVÄLI + SADEAKKIPELTI |
| 85 mm | 8 TIILIVERHOUS (Normal Brick) |

U-arvo 0.16 W/(m²K)

LÄMMÖNERISTEKERROKSEN PAKSUUS/
RUNKOTOLPAN LEVEYS

U-arvo

198 mm	0,16 W/(m ² K)
270 mm	0,13 W/(m ² K)
315 mm	0,11 W/(m ² K)
360 mm	0,10 W/(m ² K)