

Topi Moisio

# PUURANKARUNKOISTEN ULKOSEINIEN LIITOSTEN LÄMPÖ- JA KOSTEUSTEKNINEN TOIMINTA

Rakennetun ympäristön tiedekunta  
Diplomityö  
Toukokuu 2020

## TIIVISTELMÄ

**TOPI MOISIO:** Puurankarunkoisten ulkoseinien liitosten lämpö- ja kosteustekninen toiminta

Tampereen yliopisto

Diplomityö, 178 sivua, 27 liitesivua

Toukokuu 2020

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastajat: professori Juha Vinha, diplomi-insinööri Anssi Laukkarinen

Avainsanat: Alapohjaliitos, Delphin, ilmanpaine-ero, ilmavuoto, lämpö- ja kosteustekninen toiminta, puurunkoinen ulkoseinä, rakennusfysiikka, ulkoseinäliitos

Tämän diplomityön tavoitteena oli selvittää puurankarunkoisten pientalojen ulkoseinien alapohja-, ulkonurkka- ja sisänurkkaliitosten lämpö- ja kosteusteknistä toimivuutta laskennallisilla tarkasteluilla. Tutkimuksessa tarkasteltiin puu- ja tiiliverhottujen seinärakenteiden toimintaa yhdessä tuulensuojakipsilevyn kanssa. Tarkasteluissa noudatettiin TTY:llä kehitettyä rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmää ja rakenteiden toimintakriteerinä käytettiin homehtumisriskiä.

Tarkasteluissa rakenneliitokset mallinnettiin aluksi ideaalisesti toteutettuina. Rakenteissa esiintyy kuitenkin lähes aina rakennus- ja suunnitteluvirheistä johtuen sade- ja ilmavuotoja, joten rakenneliitosten toimintaa tarkasteltiin lisäksi vikatilanteissa. Tarkasteluissa rakennusvirheiden vaikutuksia mallinnettiin ilmavuotojen avulla. Ilmavuotojen mallintamista varten tutkimuksessa selvitettiin kirjallisuudesta, miten rakennusfysiikallisilla laskentaohjelmilla voidaan mallintaa ilmavuotoja tai niiden vaikutuksia ja miten ilmavuotoja aiheuttavat ilmanpaine-erot muodostuvat rakennuksen ulkovaipan yli.

Puurankarunkoisten ulkoseinä rakenteiden liitosten rakennusfysiikallista toimintaa ei ole aikaisemmin juurikaan tutkittu, joten laskentatarkastelujen tuloksia ei voitu suoraan verrata aikaisempiin tutkimustuloksiin. Ulkoseinien rakenneliitosten laskentatuloksia vertailtiin vastaavien seinärakenteiden rakennetyyppien tutkimuksiin, jotta varmistuttiin siitä, että tulokset käyttäytyvät samalla tavalla kuin aikaisemmissa rakennetyyppien tutkimuksissa saadut tulokset. Laskentatarkasteluiden alussa selvitettiin myös rakenneliitosten kriittisiä kohtia sijoittamalla tarkastelupisteitä lähes kaikkiin materiaalirajapintoihin.

Alapohjaliitosten tarkasteluissa selvitettiin alaohjauspuun rakennusaikaisen kosteuden ja alaohjauspuun eristämisen vaikutuksia alaohjauspuun kosteustekniseen toimintaan. Jo hyvin ohuilla lämmöneristekerroksilla alaohjauspuun ympärillä havaittiin olevan positiivinen vaikutus liitoksen kosteustekniseen toimintaan. Seinäelementille tyypillisen alajuoksun lisääminen alaohjauspuun päälle heikensi merkittävästi liitoksen kuivumiskykyä.

Nurkkaliitoksissa puuverhotut seinärakenteet toimivat tiiliverhottuja ulkoseinä rakenteita paremmin. Sisänurkkaliitoksien rakenneosien olosuhteet olivat suoraan seinään verrattuna paremmat ja ulkonurkkaliitoksissa heikommat. Ulkoseinien nurkkaliitosten tarkasteluissa havaittiin homehtumisriski sisäkoolauksen ulkopinnassa, mutta riski saatiin hallintaan höyrynsulkukerroksen muutoksilla.

## ABSTRACT

**TOPI MOISIO:** Hygrothermal performance of timber-framed external wall junctions

Tampere University

Master of Science Thesis, 178 pages, 27 Appendix pages

May 2020

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Structural Engineering

Examiners: Professor Juha Vinha, Anssi Laukkarinen (Master of Science)

**Keywords:** Air leakage, air pressure difference, building physics, Delphin, external wall junction, hygrothermal performance, timber-framed wall, structures

The current study examines hygrothermal performance of timber-frame external wall (EW) junctions by combined heat, air and moisture (HAM) simulations. The study evaluates wood and brick cladded timber-framed external wall structures combined with gypsum board as the exterior air barrier layer. The evaluations were performed according to the moisture analysis method developed in Tampere University of technology. The risk of mould growth was used as the performance criterion.

At first, structures were modelled as if they were ideally constructed. However, construction defects are common in detached houses due to poor workmanship, so the structures' hygrothermal performance was also studied with air leakages being considered as defects. To perform simulations with air leakage, a literature review was made to determine the air pressure difference across the building envelope and to investigate methods to model air leakage and the effect of air leakage in HAM-simulations.

Only a few past studies have evaluated the hygrothermal performance of timber-framed EW junctions. Therefore, simulations had to be performed in the beginning of this study to obtain the critical points of the studied structures. And because the results of this study could not be compared to the results of past studies of junctions, they were verified by comparing them to the results in the simulations of straight walls.

The study focused on evaluating the effects that building moisture of the wood bottom wall plate and the different thermal insulation methods of wood bottom wall plate have on EW-floor junctions' hygrothermal performance. Even very thin thermal insulation layer appeared to have a positive effect on the hygrothermal performance of the wood bottom wall plate. Adding another wood plate above the wood bottom wall plate decreased its drying potential significantly.

Junctions of wood cladded EW performed generally better in the simulations than junctions of brick cladded EW. The conditions of the components of inside corners of EW-EW were found to be better than of the components of straight walls, while the conditions of the components of outside corners of EW-EW junctions were found to be worse. Consequently, there was a risk of mould growth in the inside studs of outside corners. This risk can be avoided by changes in the vapor barrier layer.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on toteutettu Tampereen yliopiston rakennustekniikan laitoksella rakennusfysiikan tutkimusryhmässä osana tuulensuojakipsilevyllisten ulkoseinärakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan tutkimusta. Työtä ovat ohjanneet ja työn ovat tarkastaneet Anssi Laukkarinen ja professori Juha Vinha. Diplomityö on rahoitettu Tampereen teknillisen yliopiston tukisäätiön apurahalla.

Haluan kiittää Anssi Laukkarista ja Juha Vinhaa työni ohjauksesta, kommentoinnista ja tarkastuksesta. Teemu Jokela teki rakennusfysiikan tutkimusryhmässä samaan tutkimukseen liittyvää diplomityötään ja haluankin kiittää häntä laskentatulosten vertailuista sekä diplomityössäni käytetyistä pitkäaaltoisen säteilyn ja tuuletusraon ilmanvaihtuvuuden laskennan lähtötiedoista. Kiitos myös Knauf Oy:n Max Tollanderille ja Sweco Rakennustekniikka Oy:n työntekijöille mielenkiinnosta diplomityötäni kohtaan.

Kiitos läheisilleni ja ystävilleni, jotka ovat tukeneet minua opintojeni aikana sekä pelikaivereille, jotka ovat huolehtineet vapaa-ajan tehokkaasta ajankäytöstä. Erityiskiitos vaimolleni Estefanialle, joka positiivisuudellaan ja välittämisellään on kannustanut minua opiskelujeni aikana.

Tampereella, 25.5.2020

Topi Moisio

# SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
1.1	Tutkimuksen tausta .....	1
1.2	Tutkimuksen tavoitteet ja sisältö .....	2
1.3	Tutkimusmenetelmät .....	2
1.4	Tutkimuksen rajaukset .....	3
2.	TEORIA .....	4
2.1	Kosteus ja kosteuden siirtyminen .....	4
2.1.1	Kosteuslähteet .....	5
2.1.2	Ilmankosteus .....	6
2.1.3	Materiaalin kosteuspitoisuus ja hygroskooppisuus .....	8
2.1.4	Kosteuden siirtyminen .....	13
2.2	Ilman siirtyminen .....	23
2.3	Lämpö ja lämmön siirtyminen .....	26
2.3.1	Johtuminen .....	28
2.3.2	Konvektiivinen lämmön siirtyminen .....	30
2.3.3	Säteily .....	33
2.4	Tasapainoyhtälöt .....	41
2.4.1	Ilman tasapainoyhtälö .....	43
2.4.2	Energian tasapainoyhtälö .....	44
2.4.3	Kosteuden tasapainoyhtälö .....	45
3.	LASKENTATARKASTELUJEN TOTEUTUS .....	47
3.1	Laskentatehtävän ja tarkasteluperiaatteiden määrittely .....	47
3.1.1	Rakennus ja tarkasteltavat rakenteet .....	48
3.1.2	Rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointi .....	56
3.2	Toimintakriteerit ja niihin liittyvät raja-arvot .....	57
3.2.1	Suomalainen homemalli .....	58
3.3	Sisä- ja ulkoympäristön olosuhteet .....	63
3.3.1	Sisäilman olosuhteet .....	64
3.3.2	Ulkoilman olosuhteet .....	66
3.3.3	Paine-erojen muodostuminen .....	68
3.3.4	Viistosade .....	93
3.4	Laskentaohjelma .....	97
3.5	Materiaaliominaisuudet .....	98
3.6	Tarkasteltavien rakenteiden mallintaminen .....	100
3.6.1	Ilmavuotojen mallinnus .....	102
3.6.2	Laskentatarkastelujen lähtötiedot .....	108
3.6.3	Tarkastelupisteet .....	113
4.	LASKENTATARKASTELUJEN TULOKSET .....	115
4.1	Puuverhotut seinärakenteet .....	115
4.1.1	Rakennetyyppien ja liitososien vertailu .....	116

4.1.2	Alapohjaliitos .....	120
4.1.3	Ulkonurkkaliitos.....	131
4.1.4	Sisänurkkaliitos .....	140
4.2	Tiiliverhotut seinärakenteet.....	144
4.2.1	Rakennetyyppien ja liitososien vertailu .....	144
4.2.2	Alapohjaliitos .....	146
4.2.3	Ulkonurkkaliitos.....	153
4.2.4	Sisänurkkaliitos .....	162
4.3	Virhearviointi .....	165
5.	YHTEENVETO .....	166
5.1	Puuverhotut seinärakenteet .....	168
5.2	Tiiliverhotut seinärakenteet.....	169
	LÄHTEET.....	171
	LIITEET .....	178

LIITE 1: RAKENNUSFYSIKAALISET TESTIVUODET

LIITE 2: MATERIAALIOMINAISUUDET

LIITE 3: TARKASTELTAVAT SEINÄRAKENTEET

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

$\alpha$	absorptiokerroin	-
$\alpha_{sw}$	lyhytaaltoisen säteilyn absorptiokerroin	-
$\beta_v$	pinnan kosteudensiirtokerroin vesihöyrypitoisuuden suhteen	m/s
$\beta_{v,p}$	pinnan kosteudensiirtokerroin vesihöyryn osapaineen suhteen	kg/(m <sup>2</sup> ·s·Pa)
$\delta_v$	vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuden suhteen	m <sup>2</sup> /s
$\delta_{v,0}$	kuivan materiaalin vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuden suhteen	m <sup>2</sup> /s
$\delta_{v,a}$	paikallaan olevan ilman vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuden suhteen	m <sup>2</sup> /s
$\delta_p$	vesihöyrynläpäisevyys vesihöyryn osapaineen suhteen	kg/(m·s·Pa)
$\delta_{p,a}$	paikallaan olevan ilman vesihöyrynläpäisevyys vesihöyryn osapaineen suhteen	kg/(m·s·Pa)
$\varepsilon$	emissiviteetti	-
$\eta_a$	ilman dynaaminen viskositeetti	≈ 17,5·10 <sup>-6</sup> Pa·s
$\theta$	aineen pitoisuus	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$k$	permeabiliteetti	m <sup>2</sup>
$\lambda$	lämmönjohtavuus	W/(m·K)
$\mu$	diffuusiovastuskerroin	-
$\nu$	vesihöyrypitoisuus	kg/m <sup>3</sup>
$\nu_{sat}$	vesihöyryn kyllästyspitoisuus	kg/m <sup>3</sup>
$\xi_\varphi$	ominaiskosteuskapasiteetti hygrooskooppisella alueella	kg/m <sup>3</sup>
$\xi_s$	ominaiskosteuskapasiteetti kapillaarisella alueella	kg/(m <sup>3</sup> ·Pa)
$\rho_{albedo}$	maan pinnan heijastuskerroin	-
$\rho$	tiheys	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_0$	kuivatiheys	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_a$	ilman tiheys	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_w$	veden tiheys	kg/m <sup>3</sup>
$\rho^E$	tilasuuren tiheys	kg/m <sup>3</sup> , J/m <sup>3</sup>
$\rho^U$	sisäenergian tiheys	J/m <sup>3</sup>
$\sigma$	Stefan-Boltzmannin vakio	5,67·10 <sup>-8</sup> W/(m <sup>2</sup> ·K <sup>4</sup> )
$\sigma_w$	veden pintajännitys	0,073 N/m
$\sigma^{m_a,dry}$	ilmanielu/ilmalähde	kg/s
$\sigma^{m_w+v+i}$	kosteusnielu/kosteuslähde	kg/s
$\sigma^U$	lämpönielu/lämpölähde	W
$\varphi$	suhteellinen kosteus	% RH, -
$\Phi$	lämpövirta	W
$a$	terminen diffusiviteetti	m <sup>2</sup> /s
$c$	valon nopeus tyhjiössä	2,997925·10 <sup>8</sup> m/s
$c_p$	ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa	J/(kg·K)

$c_v$	ominaislämpökapasiteetti vakiotilavuudessa	J/(kg·K)
$d$	paksuus	m
$e$	Neperinluku	2,718
$g$	putoamiskiihtyvyys	9,81 m/s <sup>2</sup>
$g$	fluidivirran tiheys (kosteus, ilma)	kg/(m <sup>2</sup> ·s)
$g_{cap}$	kapillaarisen kosteusvirran tiheys	kg/(m <sup>2</sup> ·s)
$g_{conv,v}$	konvektiivisen kosteusvirran tiheys	kg/(m <sup>2</sup> ·s)
$g_{conv,a}$	ilmavirran tiheys	kg/(m <sup>2</sup> ·s)
$g_{conv,a,dry}$	kuivan ilmavirran tiheys	kg/(m <sup>2</sup> ·s)
$g_{diff}$	diffuusiovirran tiheys	kg/(m <sup>2</sup> ·s)
$g_{surf,v}$	kosteusvirta pinnan ja ilman välillä	kg/(m <sup>2</sup> ·s)
$h$	(ominais)entalpia	J/kg
$h$	lämmönsiirtokerroin	W/(m <sup>2</sup> ·K)
$h_{conv}$	pinnan konvektiivinen lämmönsiirtokerroin	W/(m <sup>2</sup> ·K)
$h_{rad}$	säteilyn lämmönsiirtokerroin	W/(m <sup>2</sup> ·K)
$h_v$	vesihöyryn ominaisentalpia	J/kg
$h_v^{evap}$	veden höyrystymislämpö	J/kg
$k$	Boltzmannin vakio	1,318·10 <sup>-23</sup> J/K
$k_a$	ilmanläpäisevyys	kg/(m·s·Pa), s
$k_w$	kosteudenjohtavuus	kg/(m·s·Pa), s
$\dot{m}$	massavirta	kg/s
$m_{a,dry}$	kuivan ilman massa	kg
$m_d$	kuivamassa	kg
$m_w$	veden massa	kg
$m_{w+v+i}$	kosteuden massa	kg
$n$	ainemäärä	mol
$n$	ilman virtausekspONENTTI	-
$p$	paine	Pa
$p_v$	vesihöyryn osapaine	Pa
$p_a$	kuivan ilman osapaine	Pa
$p_{v,sat}$	vesihöyryn kyllästysosapaine	Pa
$q_{cd}$	johtumalla siirtyvän lämpövirran tiheys	W/m <sup>2</sup>
$q_{conv}$	konvektiivisen lämpövirran tiheys	W/m <sup>2</sup>
$q_{rad}$	nettosäteilyn lämpövirran tiheys	W/m <sup>2</sup>
$r$	säde	m
$s$	huokosalipaine	Pa
$s_d$	suhteellinen diffuusiovastus	m
$t$	aika	s, h, d, a
$q_{50}$	ilmanvuotoluku	m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·h)
$u$	kosteuspitoisuus	kg/kg
$w$	kosteuspitoisuus	kg/m <sup>3</sup>
$w_{cap}$	kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus	kg/m <sup>3</sup>
$w_{crit}$	kriittinen kosteuspitoisuus	kg/m <sup>3</sup>
$w_{hygr}$	hygroskooppinen kyllästyskosteuspitoisuus	kg/m <sup>3</sup>
$w_{max}$	maksimi kosteuspitoisuus	kg/m <sup>3</sup>
$A$	pinta-ala	m <sup>2</sup>
$C$	ilman virtauskerroin	m <sup>3</sup> /(h·Pa <sup>n</sup> )



$D_\phi$	vedenjohtavuuskerroin	kg/(m·s)
$D_w$	kosteusdiffusiviteetti	m <sup>2</sup> /s
$D_{w,s}$	kapillaarinen kosteusdiffusiviteetti	m <sup>2</sup> /s
$I_{sw}$	lyhytaaltoisen säteilyn intensiteetti	W/m <sup>2</sup>
$I_{lw}$	pitkäaaltoisen säteilyn intensiteetti	W/m <sup>2</sup>
$I_{WDR}$	viistosateen intensiteetti	mm/h
$K$	ilmanläpäisykerroin	kg/(m <sup>2</sup> ·s·Pa), s/m
$M_a$	ilman moolimassa	28,96 kg/kmol
$M_w$	veden moolimassa	18,02 kg/kmol
$Nu$	Nusseltin luku	-
$P_{T,W,V}$	paine (lämpötilasta, tuulesta, ilmanvaihdosta)	Pa
$P_n$	normaali ilmanpaine	101325 Pa
$R$	lämmönvastus	(m <sup>2</sup> ·K)/W
$R$	yleinen kaasuvakio	8314,5 J/(kmol·K)
$R_v$	vesihöyryn ominaiskaasuvakio	461,4 J/(kg·K)
$R_a$	ilman (kuiva) ominaiskaasuvakio	287,1 J/(kg·K)
$R_a$	ilmavirta raon tai reiän läpi	kg/s
$R_T$	rakenteen kokonaislämmönvastus	(m <sup>2</sup> ·K)/W
$T$	lämpötila	K, °C
$T_0$	referenssilämpötila	0 K
$U$	lämmönläpäisykerroin	W/(m <sup>2</sup> ·K)
$U$	sisäenergia	J
$V$	tilavuus	m <sup>3</sup>
$V_d$	kuivatilavuus	m <sup>3</sup>
$W_v$	vesihöyrynläpäisevyyskerroin vesihöyrypitoisuuden suhteen	m/s
$W_p$	vesihöyrynläpäisevyyskerroin vesihöyryn osapaineen suhteen	kg/(m <sup>2</sup> ·s·Pa)
$Z_v$	vesihöyrynvastus vesihöyrypitoisuuden suhteen	s/m
$Z_p$	vesihöyrynvastus vesihöyryn osapaineen suhteen	(m <sup>2</sup> ·s·Pa)/kg

<i>AIVC</i>	Air Infiltration and Ventilation Centre
<i>ASHRAE</i>	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
<i>FINVAC</i>	The Finnish Association of HVAC Societies
<i>FRAME</i>	Future Envelope Assemblies and HVAC solutions
<i>HVAC</i>	Heating, Ventilation and Air Conditioning
<i>IEA</i>	International Energy Agency
<i>RH</i>	Relative Humidity
<i>REV</i>	Reference Volume
<i>SLURM</i>	Simple Linux Utility for Resource Management
<i>SRMK</i>	Suomen rakentamismääräyskokoelma
<i>TCSC</i>	Tampere Center for Scientific Computing
<i>TTY</i>	Tampereen teknillinen yliopisto
<i>TKK</i>	Teknillinen korkeakoulu (nyk. Aalto-yliopisto)
<i>YMa</i>	Ympäristöministeriön asetus
<i>VTT</i>	Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

## TERMIT JA MÄÄRITELMÄT

Diffuusio	Seoksen molekyylien liikettä, joka pyrkii tasoittamaan seoksessa vallitsevat pitoisuuserot.
Homeindeksi	Kuvaa tarkasteltavan materiaalin pinnalla esiintyvien homeiden peittämää pinta-alaa suhteessa pinnan koko alaan näköhavaintoihin perustuen.
Ilmanvuotoluku	Ilmoittaa rakennuksen vaipan keskimääräisen vuotoilmavirran tunnissa 50 Pa paine-erolla. Ilmanvuotoluku voidaan laskea rakennuksen kokonaissämmittojen mukaan laskettua rakennuksen vaipan pinta-alaa ( $q_{50}$ ) tai sisätilavuutta ( $n_{50}$ ) kohden.
Johtuminen	Ilmiö, jossa molekyylien sisäinen liike-energia eli lämpöenergia siirtyy molekyylistä toiseen ilman molekyylien keskinäisen sijainnin muuttumista.
Kapillaarisuus	Materiaalin kyky siirtää vettä huokosverkostossa kapillaarivoimien seurauksena huokosputkien täytyttyä vedellä.
Konvektio	Konvektiolla tarkoitetaan fluidin virtausta, joka syntyy luonnollisten tai ulkopuolisten voimien seurauksena.
Mikroilmasto	Mikroilmastolla tarkoitetaan ilmasto-olosuhteita rakennuksen välittömässä läheisyydessä.
Suomalainen homemalli	Matemaattinen malli homeenkasvun arviointiin rakennusmateriaalien pinnoilla muuttuvissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa.
Säteily	Lämpösäteilyllä tarkoitetaan lämpöenergian siirtymistä sähkömagneettisen aaltoliikkeen välityksellä.
Taivaan tehollinen lämpötila	Vastaa taivaalla olevan kuvitteellisen pinnan lämpötilaa, jonka lähettämän pitkäaaltoisen säteilyn määrä vastaa taivaasta alaspäin tulevan pitkäaaltoisen lämpösäteilyn määrää.
Toimintakriteeri	Rakenteen tai rakennuksen toimintaan liittyvä ilmiö, joka vaikuttaa rakenteen/rakennuksen turvallisuuteen, terveellisuuteen, ekologisuuteen, esteettisyyteen tai taloudellisuuteen. Toimintakriteereille määritetään mitattavat tai laskennallisesti määritettävät suureet, joita verrataan toimintakriteerien raja-arvoihin.

# 1. JOHDANTO

## 1.1 Tutkimuksen tausta

Rakennusten energiankulutus vastaa suurta osaa Suomen kokonaiskulutuksesta. Valtaosa rakennusten käyttämästä energiasta kuluu lämmitykseen, joka aiheuttaa suuren osan Suomen kasvihuonepäästöistä. Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi ja kestävä kehityksen edistämiseksi rakennusten lämmitysenergiankulutusta tulee vähentää ja ympäristöystävällisen energiantuotannon määrää lisätä. Rakennusten energiatehokkuudella on merkittävä vaikutus näiden tavoitteiden toteutumiseen.

Rakennusten energiatehokkuus ja kosteudenhallinta liittyvät kiinteästi toisiinsa. Rakennusten energiatehokkuusvaatimusten kiristymisen seurauksena lämmöneristekerrosten paksuudet ovat kasvaneet, mikä aiheuttaa muutoksia rakenteiden kosteustekniseen toimintaan. Erinäiset rakennusten kosteus- ja homeongelmat ovat rakentamisen ja kiinteistönpidon suurimpia laatuongelmia, koska ne ovat teknisten ja taloudellisten ongelmien lisäksi ihmisten terveydelle vaarallisia. Uudet rakenteet ja toteutustavat johtavat uudensuunittelun tilanteisiin, joita pystytään kuitenkin ennakoimaan rakennusfysikaalisen suunnittelun avulla.

Rakennusten kosteusteknisestä toimivuutta koskevan ympäristöministeriön asetuksen (YMa 782/2017) mukaan rakennuksen, rakenteiden ja rakennusosien on oltava sisäiset ja ulkoiset kosteusrasitukset huomioon ottaen kosteusteknisesti toimiva niiden suunnitellun teknisen käyttöajan ajan. Rakenteiden teknisen käyttöajan aikana etenkin rakenteiden ulkoiset rasitukset muuttuvat tulevaisuudessa ilmastonmuutoksen seurauksena, mikä tulee ottaa huomioon rakenteiden suunnittelussa. Rakenteiden energiatehokkuuden parantamisen ja ilmastonmuutoksen vaikutuksia vaipparakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan on tutkittu laaja-alaisessa kansallisessa FRAME-projektissa (Future Envelope Assemblies and HVAC Solutions) (Vinha et al. 2013). Tässä tutkimuksessa on hyödynnetty FRAME-projektin tutkimustuloksia ja projektissa määritettyjä rakennusfysikaalisia testivuosia.

Suorien rakenneosien rakennusfysikaalista toimivuutta on tutkittu laskennallisesti useissa rakennetyyppien tutkimuksissa, kuten FRAME-projektissa. Rakenteiden toiminnan kannalta rakenteiden liitoskohdat ovat kuitenkin usein suoraa rakenneosia kriittisempiä. Rakenneliitosten toimintaa ei ole kuitenkaan aikaisemmin tutkittu lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan näkökulmasta, joten tutkimustulokset tältä alueelta ovat tarpeellisia.

## 1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja sisältö

Diplomityön päätavoitteena on tuottaa tietoa tyypillisten puurankarunkoisten pientalojen rakentamisessa käytettävien rakenneliitosten lämpö- ja kosteusteknisestä toimivuudesta sekä selvittää eri tekijöiden vaikutuksia liitososien rakennusfysikaaliseen toimivuuteen. Tarkasteltavia liitoksia ovat puu- ja tiiliverhottujen ulkoseinien alapohja-, ulkonurkka- ja sisänurkkaliitokset.

Tutkimuksessa keskityttiin tuulensuojakipsilevyllisiin ulkoseinärakenteisiin. Tuulensuojakipsilevy on pientalorakentamisessa laajalti käytetty tuulensuojalevy sen hyvien jäykistävien ominaisuuksien takia. Tuulensuojakipsilevyn käyttöön liittyy kuitenkin riskejä sen heikon lämmöneristävyyden sekä homeutumisherkkyyden takia. Tutkimuksessa on tavoite tuottaa tietoa rakenneliitosten rakennusfysikaalisesta toimivuudesta, kun tuulensuojana käytetään tuulensuojakipsilevyä.

Puurankarunkoisten ulkoseinien alapohjaliitoksissa on havaittu ongelmia, jotka liittyvät pääasiassa seinän perustuksiin liittävään alaohjauspuuhun. Perusmuuri viilentää alaohjauspuun olosuhteita, mikä taas altistaa sen homeenkasvulle otollisille olosuhteille. Alaohjauspuun rakennusaikainen kosteuspiitoisuus saattaa myös olla korkea, mikäli se asennetaan suojaamatta perustuksiin ennen seinärakenteiden asentamista. Ulkoseinien alapohjaliitosten tarkasteluissa tutkittiin erilaisten alaohjauspuun eristysvaihtoehtojen vaikutuksia alaohjauspuun lämpö- ja kosteusolosuhteisiin sekä selvitettiin alaohjauspuun rakennusaikaisen kosteuden vaikutusta liitosratkaisujen toimivuuteen.

Risteävien seinien liitoksissa on yleensä enemmän runkotolppia suoriin seiniin verrattuna johtuen risteävien seinien kiinnityksestä. Runkotolpat aiheuttavat nurkkiin kylmäsilan, joka muuttaa nurkan olosuhteita verrattuna suoraan seinään. Ulkoseinien ulko- ja sisänurkkaliitosten tarkasteluissa tutkittiin lämmöneristysten ja erilaisten höyrynsulku- ratkaisujen vaikutuksia nurkan osien lämpö- ja kosteusolosuhteisiin. Ulkoseinien nurkkaliitosten tarkasteluja tehtiin sekä ideaalisille rakenteille että ilmavuotoja sisältäville rakenteille.

## 1.3 Tutkimusmenetelmät

Rakenneliitosten lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa tutkittiin laskentatarkasteluiden avulla. Rakennusfysikaalisissa laskentatarkasteluissa mallinnetaan lämmön, kosteuden ja ilman siirtymiseen liittyviä ilmiöitä ja arvioidaan niiden vaikutuksia rakennusten ja rakenteiden toimintaan. Tämän tutkimuksen laskentatarkastelut suoritettiin Delphin-laskentaohjelman versiolla 5.8.3.

Tutkimuksen laskentatarkastelujen toteutus perustuu Tampereen teknillisessä yliopistossa (TTY) kehitettyyn rakenteiden kosteusteknisestä toiminnan analysointimenetelmään (Vinha et al. 2013). Analysointimenetelmän mukaan toteutetuissa laskentatarkasteluissa

rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa tarkastellaan mitoittavissa sisä- ja ulkoilman olosuhteissa. Laskenta suoritetaan tapaukseen sopivalla laskentaohjelmalla ja tuloksia arvioidaan rakenteeseen liittyvien toimintakriteerien avulla.

## **1.4 Tutkimuksen rajaukset**

Tutkimuksessa käytettiin suomalaisissa pientaloissa esiintyviä olosuhteita ja tutkimuksen tarkastelut tehtiin kuivien tilojen rakenteille. Tutkimuksessa käytetyssä laskentaohjelmassa on tehty lämmön, kosteuden ja ilman siirtymis- ja varastoitumisilmiöihin liittyviä oletuksia, mikä aiheuttaa mitattujen ja laskennallisten tulosten välille eroja. Laskentaohjelman oletusten lisäksi tutkimuksessa on jätetty huomioimatta sisäisen konvektion vaikutus sekä jäätyminen vaikutus, vaikka se laskentaohjelman puolesta olisikin ollut mahdollista.

## 2. TEORIA

Rakennusfysiikka on soveltava tieteenala, joka tutkii lämmön, kosteuden ja ilman sekä akustisten ja valoon liittyvien ominaisuuksien vaikutuksia rakenneosien ja rakennusten toimintaan. Rakennusfysiikan päänäkökulmia ovat käyttäjien terveys ja lämpöviihtyvyys sekä akustiset ja visuaalisesti viihtyisät olosuhteet. Lisäksi rakennusfysiikassa tulee ottaa huomioon arkkitehtoniset, materiaaleihin liittyvät, taloudelliset sekä ekologiset näkökulmat. (Hens 2007)

Rakenteiden ja rakennusten kosteusteknistä toimivuutta voidaan tarkastella rakenteiden laboratoriomittausten, koerakennusmittausten, kenttämittausten tai laskennallisten tarkastelujen avulla. Laskennalliset tarkastelut ovat kasvaneet merkittävään rooliin rakennusfysikaalisessa suunnittelussa, koska niillä rakenteiden ja rakennusten toimintaa pystytään arvioimaan kokeellisia menetelmiä nopeammin ja taloudellisemmin. Laskentatarkastelut eivät kuitenkaan korvaa kokeellisia menetelmiä, sillä laskentaohjelmat sisältävät vielä useita yksinkertaistuksia ja puutteita. (RIL 255-1-2014 2014)

Tässä luvussa esitellään lämpö- ja kosteusteknisten laskentatarkastelujen taustalla olevaa rakennusfysiikan teoriaa. Rakenteiden eri puolilla vallitsevat olosuhde-erot saavat aikaan lämmön, kosteuden ja ilman siirtymistä. Kokeellisilla tutkimuksilla on pystytty määrittämään lämmön ja massan siirtymistä sekä varastoitumista kuvaavia matemaattisia kaavoja ja materiaaliominaisuuksia. Lämpö- ja kosteusteknisten tarkastelujen perusta saadaan, kun yhdistetään siirtymisilmiöitä kuvaavat kaavat klassisen fysiikan säilymlakeihin. Muuttuvat olosuhteet johtavat monimutkaisiin matemaattisiin ongelmiin, joita pystytään kuitenkin ratkaisemaan numeerisilla menetelmillä. (Hagentoft 2001)

Luvussa 2.1 on käsitelty kosteutta ja kosteuden siirtymistä. Luvussa 2.2 on esitelty ilman siirtymiseen liittyvää teoriaa tämän diplomityön kannalta tarpeellisella laajuudella. Lämmön siirtymistä rakenteiden ja ympäristön välillä sekä rakenteiden sisällä on käsitelty luvussa 2.3. Edellä mainituissa luvuissa käsitellyt lämmön ja massan siirtymisen sekä varastoitumisen teoria on koottu tasapainoyhtälöiksi teorian viimeisessä luvussa.

### 2.1 Kosteus ja kosteuden siirtyminen

Vettä esiintyy luonnossa kolmessa eri olomuodossa: vesihöyrynä, nesteinä ja jäänä. Rakennusten sisä- ja ulkopuoliset olosuhteet mahdollistavat kaikkien veden olomuotojen esiintymisen rakenteissa. Rakennuksissa kosteus voi esiintyä näkyvässä muodossa, vetenä tai jäänä sekä näkymättömässä muodossa vesihöyrynä tai rakenteisiin sitoutuneena rakennekosteutena. Vesi on elämän edellytys, mutta se tuo mukanaan myös haitallisia vaikutuksia. Liiallinen ja pitkäaikainen kosteus edesauttavat materiaalien vaurioitumista ja mahdollistavat erilaisten bakteerien ja homeiden kasvua. (Siikanen 2014)

Kosteus tarkoittaa kemiallisesti sitoutumatonta vettä (Siikanen 2014). Rakenteiden kosteusteknistä toimintaa tarkasteltaessa tulee ottaa huomioon rakenteisiin vaikuttavat kosteusrasitukset ja kosteuden siirtymismuodot. Ympäristö, laitteet sekä ihmisten toiminta aiheuttavat rakenteille kosteusrasituksia niin rakennusten sisä- kuin ulkopuolelta. Tässä luvussa on esitelty rakennusten mahdollisia kosteusrasituksia ja myöhemmin alaluvuissa 3.3.1 ja 3.3.2 on käsitelty tämän tutkimuksen laskentatarkasteluissa huomioitua kosteusrasitukset.

### 2.1.1 Kosteuslähteet

Rakennusten kosteuslähteet voidaan jakaa rakennusten ulkopuolisiin ja rakennusten sisäpuolisiin kosteuslähteisiin. Ulkopuolelta rakennuksia ja rakenteita rasittavat ulkoilman kosteus, sade ja maaperän kosteus. Rakennusten sisäpuolisia kosteuslähteitä ovat sisäilmankosteus, roiskevedet ja rakennekosteus. Lisäksi rakennuksia voivat rasittaa erilaiset kosteusvuodot sekä sisä- että ulkopuolelta. (RIL 255-1-2014)

Rakennusten ulkopuoliset kosteusrasitukset ovat vahvasti riippuvaisia ulkoilman olosuhteisiin. Ulkoilman kosteus riippuu ympäristöstä ja vaikuttaa rakenteisiin ulkopinnan lisäksi tuuletusrakojen välityksellä. Ulkopuolen kosteusrasituksista näkyvin on sade, joka vaikuttaa vaakarakenteiden lisäksi pystyrakenteiden pintoihin viistosateena tuulen myötävaikutuksella. Sadevedet voivat vaikuttaa rakenteisiin myös valuvina pintavesinä.

Maaperässä kosteutta esiintyy pohjavetenä, pintavetenä, vajovetenä, kapillaarivetenä sekä huokosissa vesihöyrynä (Björkholtz 1997). Maaperän nestemäisen kosteuden vaikutusta rakenteisiin pyritään hallitsemaan rakennuspohjan muotoilulla, salaojituksella, vedeneristyksellä, kapillaarikatkolla ja oikealla lämmöneristyksellä (RIL 107-2012). Pohjaveden pinnan läheisyyden ja maaperän pienen lämpötilavaihtelun seurauksena laskentatarkasteluissa maaperän huokostilan ilman suhteelliseksi kosteudeksi oletetaan tyypillisesti 100 % RH. (RIL 255-1-2014)

Rakennusten sisäilma on tavanomaisesti ulkoilmaa kosteampaa. Sisäilman kosteuspitoisuutta lisäävät normaalit sisätilojen toiminnot kuten ruoanlaitto, pyykin kuivaus, siivoaminen, peseytyminen ja ilmanvaihto. Roiskevesiä esiintyy märkätilojen lisäksi keittiössä ja wc-tiloissa. Rakennusmateriaalit saattavat sisältää rakennusvaiheessa suuremman määrän kosteutta kuin myöhemmin käytön aikana. Betoni ja puu ovat esimerkkejä tällaisista materiaaleista. Rakennusmateriaalien ylimääräinen kosteus poistuu yleensä ensimmäisten käyttökuukausien tai -vuosien aikana. (Hagentoft 2001)

Rakenteisiin kohdistuvat kosteusvuodot aiheuttavat yleensä paikallisia, mahdollisesti suuria kosteusrasituksia, jotka voivat johtaa vakaviin kosteusvaurioihin (Hagentoft 2001). Kosteusvuotoja esiintyy rakennuksissa yleensä virheellisen suunnittelun tai puutteellisen toteutuksen seurauksena. Esimerkkejä kosteusvuotojen aiheuttajista ovat rikkou-

tuneet putket, vedeneristyksen virheet ja vauriot sekä virheelliset rakennedetaljit. (Siikainen 2014) Kosteusvuotojen todellista määrää ja laajuutta rakenteissa on vaikeaa arvioida, mutta kosteusvuotoihin voidaan varautua rakenteilla, joilla on kuivumispotentiaalia.

## 2.1.2 Ilmankosteus

Vedenpinnan alapuolisia rakenteita lukuun ottamatta kaikki rakenteet ovat kosketuksissa ilman kanssa. Ilma on kaasuseos ja sisältää aina jonkin verran kosteutta. Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa ilman oletetaan toimivan ideaalikaasun tavoin, jolloin se noudattaa ideaalikaasun tilanyhtälöä

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (2.1)$$

missä

$p$  = paine [Pa]

$V$  = kaasun tilavuus [m<sup>3</sup>]

$n$  = ainemäärä [mol]

$R$  = yleinen kaasuvakio (8314,5 J/(kmol·K))

$T$  = lämpötila [K].

Ilma voi sisältää enintään tietyn määrän vesihöyryä, johtuen veden neste-kaasu-tasapainosta (Hagentoft 2001). Vesihöyryn määrää, jonka ilma voi enintään sisältää, kutsutaan vesihöyryn kyllästyspitoisuudeksi  $v_{sat}$  [kg/m<sup>3</sup>] (RIL 255-1-2014). Kyllästyskosteuspitoisuutta vastaavaa vesihöyryn osapainetta kutsutaan vesihöyryn kyllästysosapaineeksi  $p_{v,sat}$  [Pa]. Vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuuden ylittyessä ilman vesihöyryä tiivistyy vedeksi tai härmistyy jääksi.

Vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuudelle on esitetty useita erilaisia korrelaatiokaavoja. Vesihöyryn kyllästyskosteus vaihtelee riippuen, tarkastellaanko tilannetta nestemäisen veden vai jään pinnan yläpuolella. Nollan alapuolisissa lämpötiloissa vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuus on alhaisempi, kun tilannetta tarkastellaan jään yläpuolella verrattuna nestemäisen veden yläpuoliseen tilanteeseen. (Vinha 2007) Tilanne ei ole aina yksiselitteinen ja rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa on päädytty käyttämään jään yläpuolisia vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuuksia. Tämän diplomityön laskentatarkasteluissa vesihöyryn kyllästysosapaineelle on käytetty standardissa SFS-EN ISO 13788 (2012) esitettyä kaavaa (2.2), jossa vesihöyryn kyllästysosapaine on määritetty jään yläpuolella.

$$p_{v,sat} = \begin{cases} 610,5 \cdot e^{\frac{17,269 \cdot T}{237,3+T}} & T \geq 0 \text{ °C} \\ 610,5 \cdot e^{\frac{21,875 \cdot T}{265,5+T}} & T < 0 \text{ °C} \end{cases} \quad (2.2)$$

missä

$p_{v,sat}$  = vesihöyryn kyllästysosapaine [Pa]

$T$  = lämpötila [°C].



Ilman sisältämän vesihöyryn määrä esitetään vesihöyrypitoisuutena  $\nu$  [kg/m<sup>3</sup>] tai vesihöyryn osapaineena  $p_\nu$  [Pa]. Kaavasta (2.1) vesihöyrypitoisuuden  $\nu$  ja vesihöyryn osapaineen  $p_\nu$  välille saadaan yhteys.

$$\nu = \frac{M_w}{R \cdot T} \cdot p_\nu \quad (2.3)$$

missä

- $\nu$  = vesihöyrypitoisuus [kg/m<sup>3</sup>]
- $M_w$  = veden moolimassa (18,02 kg/kmol)
- $R$  = yleinen kaasuvakio (8314,5 J/(kmol·K))
- $T$  = lämpötila [K]
- $p_\nu$  = vesihöyryn osapaine [Pa].

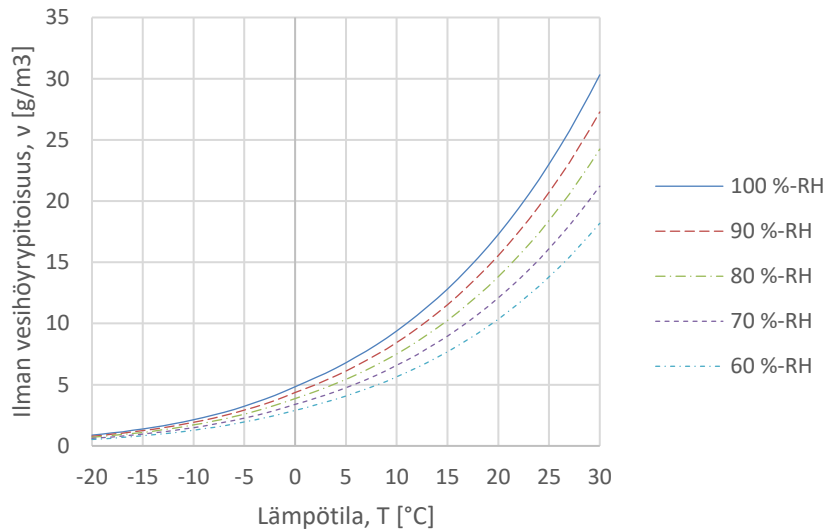
Ilman kosteuspitoisuutta kuvataan rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa suhteellisella kosteudella  $\varphi$  [-] (engl. relative humidity, RH). Suhteellinen kosteus kertoo, kuinka paljon ilmassa on vesihöyryä suhteessa vesihöyryn kyllästyspitoisuuteen. Suhteellinen kosteus esitetään tyypillisesti prosentteina ja se määritetään kaavalla

$$\varphi = \frac{\nu}{\nu_{sat}} \quad , \quad \varphi = \frac{p_\nu}{p_{\nu,sat}} \quad (2.4)$$

missä

- $\varphi$  = suhteellinen kosteus [-]
- $\nu$  = vesihöyrypitoisuus [kg/m<sup>3</sup>]
- $\nu_{sat}$  = vesihöyryn kyllästyspitoisuus [kg/m<sup>3</sup>]
- $p_\nu$  = vesihöyryn osapaine [Pa]
- $p_{\nu,sat}$  = vesihöyryn kyllästysosapaine [Pa].

Kuvassa 2.1 on esitetty ilman vesihöyrypitoisuus lämpötilan funktiona eri suhteellisen kosteuden arvoilla.



**Kuva 2.1.** Ilman vesihöyrypitoisuus lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona.

Kuvasta 2.1 nähdään, että ilman vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuus (100 % RH) riippuu voimakkaasti ilman lämpötilasta.

### 2.1.3 Materiaalin kosteuspitoisuus ja hygroskooppisuus

Ilman kanssa kosketuksissa olevat materiaalit pyrkivät tasapainokosteuteen ympäröivän ilman kanssa. Tasapainokosteudella tarkoitetaan tietyssä lämpötilassa olevalle materiaalille ominaista, ympäröivän ilman suhteellista kosteutta vastaavaa kosteuspitoisuutta. Tasapainokosteuden saavuttaminen voi vaatia pitkän ajanjakson, riippuen materiaalin ominaisuuksista ja ainepaksuudesta (Siikanen 2014). Materiaalin kosteuspitoisuus voidaan esittää kosteuspitoisuutena kuivan materiaalin tilavuutta  $w$  [kg/m<sup>3</sup>] tai massaa kohden  $u$  [kg/kg].

$$w = \frac{m_w}{V_d} \quad , \quad u = \frac{m_w}{m_d} \quad (2.5)$$

missä

$w$  = kosteuspitoisuus [kg/m<sup>3</sup>]

$u$  = kosteuspitoisuus [kg/kg]

$m_w$  = materiaaliin sitoutuneen kosteuden massa [kg]

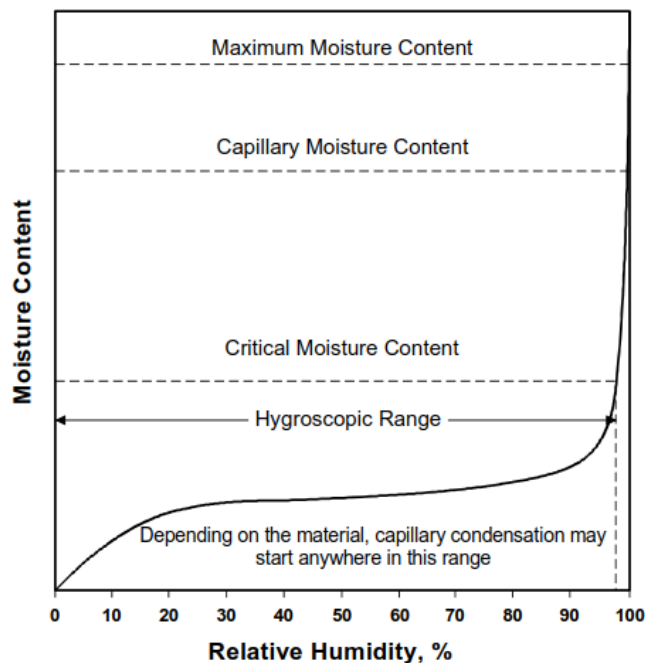
$V_d$  = materiaalin kuivatilavuus [m<sup>3</sup>]

$m_d$  = materiaalin massa kuivana [kg].

Materiaaleja, jotka pystyvät sitomaan ja luovuttamaan kosteutta kutsutaan hygroskooppisiksi materiaaleiksi. Kun materiaalia ympäröivän ilman suhteellinen kosteus kasvaa, hygroskooppisen materiaalin huokosten pintaan sitoutuu kosteutta (adsorptio), jolloin materiaalin kosteuspitoisuus kasvaa. Päinvastoin, ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden

laskiessa, hygroskooppinen materiaali luovuttaa kosteutta (desorptio), jolloin materiaalin kosteuspitoisuus laskee. (ASHRAE Handbook 2017) Materiaalin hygroskooppisuuteen vaikuttavat merkittävästi materiaalin huokosrakenne, huokostilavuus sekä huokosjakauma.

Materiaalien tasapainokosteus esitetään tyypillisesti suhteellisen kosteuden tai huokosalipaineen funktiona sorptioisotermeillä. Koska tasapainokosteus on riippuvainen materiaalin lämpötilasta, jokaista lämpötilaa vastaa erilainen sorptioisotermi. (Vinha 2007) Matalammassa lämpötilassa olevan materiaalin tasapainokosteus on suurempi kuin korkeammassa lämpötilassa olevan materiaalin. Lämpötilan merkitys tasapainokosteuteen on kuitenkin melko pieni ja se voidaan yleensä jättää huomioimatta (Hagentoft 2001). Kuvassa 2.2 on esitetty huokoisen materiaalin tyypillinen sorptioisotermi.



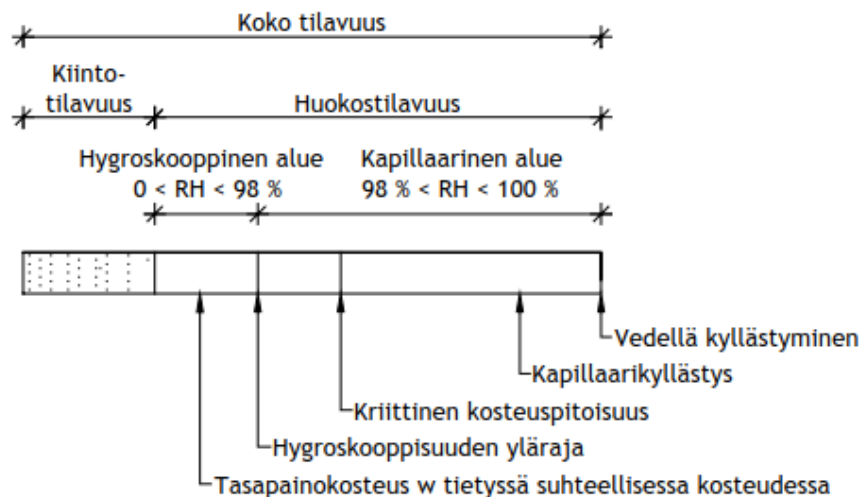
**Kuva 2.2.** Tyypillinen huokoisen materiaalin sorptioisotermi. (Kumaran 2001)

Sorptioisotermi jaetaan kahteen alueeseen, hygroskooppiseen ja kapillaariseen alueeseen. Sorptioisotermin hygroskooppisen ja kapillaarisen alueen erottaa hygroskooppinen kylästyskosteuspitoisuus  $w_{hygr}$ , joka kertoo materiaaliin sitoutuvan veden määrän, kun sitä ympäröi ilma, jonka suhteellinen kosteus on 100 % RH (käytännössä voidaan saavuttaa noin 98 % suhteellinen kosteus) (Björkholtz 1997).

Hygroskooppisella alueella kosteus sitoutuu huokosten seinämiin muodostaen aluksi yhden molekyylin paksuisen vesikerroksen huokosen pinnalle eli tapahtuu kapillaarikondenssi. Kun ympäröivän ilman suhteellinen kosteus kasvaa, vesimolekyylit alkavat sitoutua huokosten pinnoille useamman molekyylin paksuisiin kerroksiin. Ympäröivän ilman

suhteellisen kosteuden edelleen kasvaessa, materiaalin pienimmät huokokset alkavat täyttyä vedellä, jolloin vesi alkaa liikkua niissä kapillaarisesti ja se havaitaan sorptioisotermin kulmakertoimen kasvuna. (Hagentoft 2001)

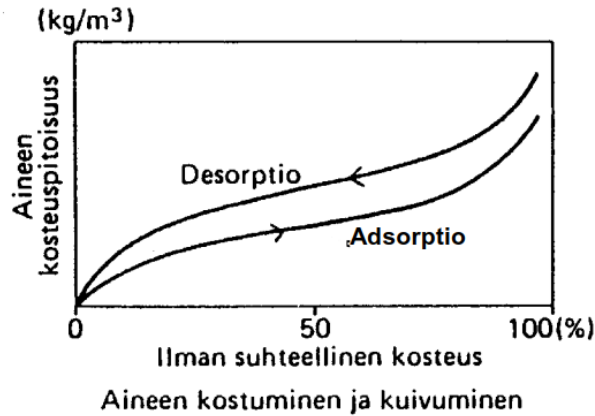
Hygroskooppista kyllästyskosteuspitoisuutta  $w_{hygr}$  suuremmat tasapainokosteudet saavutetaan, kun materiaali on kontaktissa nestemäisen veden kanssa. Kriittinen kosteuspitoisuus  $w_{crit}$  määritetään tasapainokosteutena, jossa materiaaliin syntyy yhtenäinen vedellä täyttynyt huokosverkosto. Kriittisen kosteuspitoisuuden yläpuolella kosteus siirtyy materiaalin huokosverkostossa nesteinä. Kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus  $w_{cap}$  saavutetaan joko vesikontaktissa tai vesiupotuksessa riippuen määrittelytavasta. Materiaalin maksimikosteuspitoisuuden  $w_{max}$  saavuttamiseksi materiaali on asetettava tyhjiöön huokosiin jääneen ilman poistamiseksi. (Björkholtz 1997, Delphin 5 2006) Kuvassa 2.3 on esitetty huokoisen materiaalin kostumisen vaiheet ja kosteuspitoisuuksien nimitykset.



**Kuva 2.3.** Huokoisen materiaalin kosteuspitoisuuden nimitykset kostumisen eri vaiheissa. (Björkholtz 1997)

Kuvasta 2.3 havaitaan, että suurin osa materiaalin huokostilavuudesta täyttyy vasta, kun materiaali on kosketuksissa nestemäisen veden kanssa.

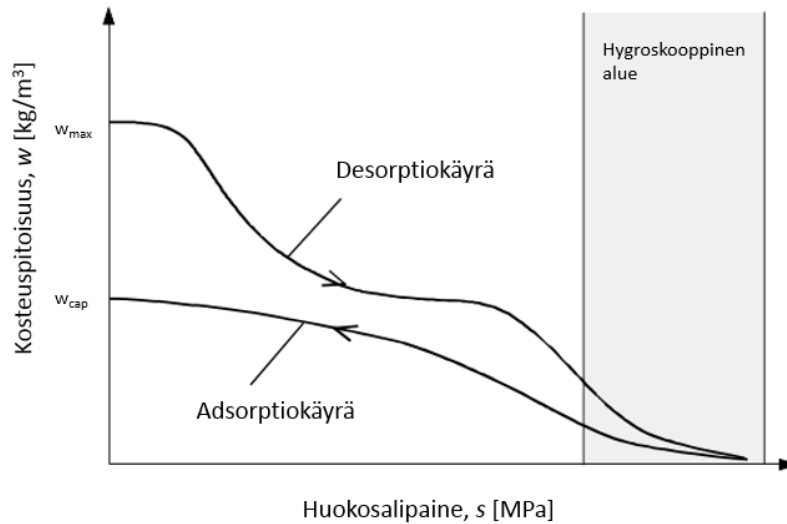
Materiaalin kosteushistoria vaikuttaa materiaalin tasapainokosteuteen. Kosteushistorian huomioon ottamiseksi sorptioisotermi jaetaan adsorptio- ja desorptioisotermeihin. Adsorptioisotermi kuvaa materiaalin tasapainokosteuspitoisuutta, kun ympäröivän ilman suhteellinen kosteus kasvaa. Desorptioisotermi kuvaa taas materiaalin tasapainokosteuspitoisuutta, kun suhteellinen kosteus pienenee. (Vinha 2007) Kuvassa 2.4 on esitetty tyyppillisen huokoisen materiaalin adsorptio- ja desorptioisotermit.



**Kuva 2.4.** Esimerkki sorptioisotermistä, jossa adsorptio ja desorptio on eritelty. (Björkholtz 1997)

Desorptiossa materiaalin tasapainokosteus on suurempi kuin adsorptiossa. Ilmiötä kutsutaan hystereesiksi ja sen katsotaan johtuvan ns. mustepulloilmiöstä. Materiaalin huokosverkostossa on aina suurempia huokosia, joissa ei synny kapillaarikondenssia eli huokokset eivät täyty täysin vedellä tietyissä olosuhteissa. Mikäli kosteammissa olosuhteissa ollut kappale tuodaan kuivempiin olosuhteisiin, sen suuremmat huokokset ovat jo täyttyneet vedellä. Suuremmissa huukosissa oleva vesi ei pääse poistumaan materiaalista ennen kuin vesi on poistunut niihin yhteydessä olevista pienemmistä huukosista. Veden poistuminen pienemmistä huukosista taas edellyttää suhteellisen kosteuden alhaisempaa tasoa, minkä seurauksena vesi jää suurempiin huukosiin. Todellisuudessa tasapainokosteus on adsorptio- ja desorptioisotermien välissä olosuhteiden vaihdeltaessa. (Vinha 2007)

Kuvasta 2.2 nähdään, että kapillaarisella alueella huukosien materiaalin tasapainokosteuden kuvaaminen sorptioisotermillä ei ole havainnollista, koska kapillaarisella alueella pieni suhteellisen kosteuden muutos vastaa suurta kosteuspitoisuuden muutosta. Tämän takia kapillaarisella alueella materiaalin kosteuspitoisuutta onkin järkevämpi kuvata kapillaarisella tasapainokosteuskäyrällä. Kapillaarisessa tasapainokosteuskäyrässä kosteuspitoisuus esitetään keskimääräisen huukosalipaineen  $s$  [Pa] tai huukosputken säteen  $r$  [m] funktiona. (Vinha 2007) Suhteellisen kosteuden, huukosalipaineen ja huukosputken säteen välinen yhteys on esitetty alaluvussa 2.1.4. Kuvassa 2.5 on esitetty tyypillinen kapillaarinen tasapainokosteuskäyrä.



**Kuva 2.5.** Kapillaarinen tasapainokosteuskäyrä. (Muokattu lähteestä (Pedersen 1990))

Kapillaarinen tasapainokosteuskäyrä muodostuu sorptiokäyrän tavoin adsorptio- ja desorptiokäyrästä. Kapillaarisen tasapainokosteuskäyrän loppuosa (huokosalipaine  $s \geq 2,65$  MPa, mikä vastaa noin 98 % huokosilman suhteellista kosteutta) vastaa kyseisen materiaalin sorptiokäyrää hygroσκοoppisella alueella. Kapillaarinen adsorptiokäyrä päättyy kapillaariseen kyllästyskosteuspitoisuuteen  $w_{cap}$  ja kapillaarinen desorptiokäyrä alkaa maksimikosteuspitoisuudesta  $w_{max}$ . (Vinha 2007)

Tasapainokosteuskäyristä voidaan määrittää materiaalin kosteudentomiskykyä kuvaavat ominaiskosteuskapasiteetit  $\xi_{\varphi}$  [kg/m<sup>3</sup>] ja  $\xi_s$  [kg/(m<sup>3</sup>·Pa)]. Ominaiskosteuskapasiteetit määritetään tasapainokosteuskäyrien kulmakertoimina erikseen hygroσκοoppisella ja kapillaarisella alueella. (Vinha 2007)

$$\xi_{\varphi} = \frac{\partial w}{\partial \varphi} \quad , \quad \xi_s = \frac{\partial w}{\partial s} \quad (2.6)$$

missä

$\xi_{\varphi}$  = materiaalin ominaiskosteuskapasiteetti hygroσκοoppisella alueella [kg/m<sup>3</sup>]

$w$  = materiaalin kosteuspitoisuus [kg/m<sup>3</sup>]

$\varphi$  = suhteellinen kosteus [-]

$\xi_s$  = materiaalin ominaiskosteuskapasiteetti kapillaarisella alueella [kg/(m<sup>3</sup>·Pa)]

$s$  = huokosalipaine [Pa].

Materiaalin ominaiskosteuskapasiteetti on analoginen termi lämmönsiirron yhteydessä esitetylle materiaalin ominaislämpökapasiteetille  $c$  [J/(kg·K)] (ks. alaluku 2.3).

## 2.1.4 Kosteuden siirtyminen

Kosteuden siirtyminen rakenteissa on mahdollista veden kaikissa olomuodoissa. Ilmavirtaus voi kuljettaa mukanaan kaikkia olomuotoja (Vinha 2007). Nestemäinen vesi voi siirtyä lisäksi kapillaari-imun, painovoiman, ulkopuolisen paineen, nestediffuusion tai termodiffuusion vaikutuksesta. Vesihöyryn siirtymismuotoja ovat konvektion lisäksi kaasudiffuusio, pintadiffuusio ja termodiffuusio (Künzel 1995, Kumaran, Mavinkal 2009). Jokaisen kosteudensiirtymismuodon tarkka kuvaaminen ei ole mahdollista eikä rakennusfysikaalisten tarkastelujen kannalta oleellista, joten kosteuden siirtymistä käsitellään ilmiöinä käyttäen potentiaaleja ja niitä vastaavia siirtokertoimia (Hens 2007).

Tässä alaluvussa käsitellään kosteuden siirtymismuodoista rakennusfysiikan ja tässä diplomityössä tarkasteltavien rakenteiden kannalta merkittävimmät kosteuden siirtymismuodot: vesihöyryn diffuusio (kaasudiffuusio), kosteuden kapillaarinen siirtyminen sekä kosteuden konvektio. Pintadiffuusiota ei tarkastella laskennassa erillisenä kosteuden siirtymismuotona, vaan sen ajatellaan sisältyvän kosteuden kapillaariseen siirtymiseen.

Painovoiman vaikutuksesta vesi pääsee siirtymään rakenteisiin rakojen kautta tai materiaalien pintoja pitkin valumalla. Tässä diplomityössä painovoimaista veden siirtymistä rakenteisiin ei ole huomioitu, koska sen aiheuttamat kosteusrasitukset ovat yleensä niin suuria, että ne tulee kaikin tavoin estää.

### Vesihöyryn diffuusio (kaasudiffuusio)

Diffuusio on seoksen molekyylien liikettä, joka pyrkii tasoittamaan seoksessa vallitsevat pitoisuuserot. Diffuusion vaikutuksesta väkevämmässä pitoisuudessa olevat molekyylit pyrkivät siirtymään laimeamman pitoisuuden suuntaan. Nesteseoksissa pitoisuutta kuvataan yleensä konsentraatiolla  $c$  ( $[\text{kg}/\text{m}^3]$  tai  $[\text{mol}/\text{m}^3]$ ) ja kaasuseoksissa osapaineen  $p_v$  [Pa] avulla.

Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa ollaan kiinnostuneita erityisesti vesihöyryn diffuusiosta. Ulko- ja sisäilman välillä vallitsee tyypillisesti vesihöyryn pitoisuusero, jolloin diffuusion vaikutuksesta vesihöyry pyrkii siirtymään rakenteen läpi. Diffuusiolla siirtyvän kosteusvirran tiheys  $\mathbf{g}_{diff}$  [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ] homogeenisen ainekerroksen läpi lasketaan Fickin lailla (Hagentoft 2001)

$$\mathbf{g}_{diff} = -\delta_v \cdot \nabla v = -\left(\delta_v \frac{\partial v}{\partial x}, \delta_v \frac{\partial v}{\partial y}, \delta_v \frac{\partial v}{\partial z}\right) \quad (2.7)$$

tai

$$\mathbf{g}_{diff} = -\delta_p \cdot \nabla p_v = -\left(\delta_p \frac{\partial p_v}{\partial x}, \delta_p \frac{\partial p_v}{\partial y}, \delta_p \frac{\partial p_v}{\partial z}\right) \quad (2.8)$$

missä

$g_{diff}$  = diffuusiolla siirtyvän kosteusvirran tiheys [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]

$\nabla$  = del-operaattoria kuvaava nabra-symboli

$\delta_v$  = materiaalin vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuseron avulla ilmoitettuna [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$v$  = vesihöyrypitoisuus [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$\delta_p$  = materiaalin vesihöyrynläpäisevyys vesihöyryn osapaine-eron avulla ilmoitettuna [ $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ ]

$p_v$  = vesihöyryn osapaine [Pa].

Del-operaattorin avulla määritetään skalaarikentän gradientin, joka on vektorikenttä, joka kuvaa potentiaalın muutoksen suuntaa ja suuruutta tarkastelupisteissä. Fickin laissa potentiaalina voidaan käyttää vesihöyrypitoisuuden gradienttia  $\nabla v$  tai vesihöyryn osapaineen gradienttia  $\nabla p_v$ . Diffuusio pyrkii tasoittamaan seoksen pitoisuuserot, joten diffuusiolla siirtyvän kosteusvirran suunta on ajavalle potentiaalille vastakkainen, minkä seurauksena Fickin laissa on negatiivinen etumerkki.

Materiaalien vesihöyrynläpäisevyys vaihtelee lämpötilan ja huokosilman suhteellisen kosteuden mukaan. Kosteus liikkuu kuitenkin huokoisissa materiaaleissa puhtaan kaasudiffuusion lisäksi myös pintadiffuusion ja kapillaarikondenssin seurauksena. Kuppiko-keella mitattuna kosteusvirta materiaalin läpi tyypillisesti kasvaa huokosilman suhteellisen kosteuden noustessa, mutta kasvu johtuu pääosin pintadiffuusion ja kapillaarikondenssin kasvusta. Hygroskooppisella alueella puhtaasti diffuusiolla siirtyvän kosteuden määrä pysyy lähes vakiona ja kapillaarisella alueella se pienenee merkittävästi. (Vinha 2007)

Pintadiffuusion ja kapillaarikondenssin ajavana potentiaalina toimii puhtaasta diffuusiosta poiketen kosteuspitoisuus  $w$ . Tämän seurauksena puhdas diffuusio erotellaan laskennassa ja vesihöyryn läpäisevyydelle käytetään kuivien olosuhteiden arvoa. Pintadiffuusio ja kapillaarikondenssi huomioidaan kapillaarisen kosteudenjohtavuuden arvossa. (Vinha 2007)

Vesihöyrypitoisuuseron  $\delta_v$  ja vesihöyryn osapaine-eron  $\delta_p$  avulla ilmoitetuille vesihöyrynläpäisevyyksille voidaan johtaa yhteys kosteusvirran tiheyden (kaavat (2.7) ja (2.8)) ja ideaalikaasun tilanyhtälön (kaava (2.1)) avulla (vrt. kaava (2.3)).

$$\delta_v = \frac{R \cdot T}{M_w} \cdot \delta_p \quad (2.9)$$

missä

$\delta_v$  = materiaalin vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuseron avulla ilmoitettuna [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$R$  = yleinen kaasuvakio (8314,5 J/(kmol·K))



$T$  = lämpötila [K]  
 $M_w$  = veden moolimassa (18,02 kg/kmol)  
 $\delta_p$  = materiaalin vesihöyrynläpäisevyys vesihöyryn osapaine-eron avulla ilmoitettuna [kg/(m·s·Pa)].

Materiaalin vesihöyrynläpäisevyys voidaan esittää lisäksi diffuusioivastuskertoimen  $\mu$  [-] tai suhteellisen diffuusioivastuksen  $s_d$  [m] avulla. Diffuusioivastuskertoimella  $\mu$  ilmoitetaan paikallaan olevan ilman vesihöyrynläpäisevyyden  $\delta_{v,a}$  [m<sup>2</sup>/s] ja materiaalin vesihöyrynläpäisevyyden  $\delta_v$  suhde. (Hagentoft 2001) Diffuusioivastuskerroin lasketaan kaavalla

$$\mu = \frac{\delta_{v,a}}{\delta_v} = \frac{\delta_{p,a}}{\delta_p} \quad (2.10)$$

missä

$\mu$  = materiaalin diffuusioivastuskerroin [-]  
 $\delta_{v,a}$  = paikallaan olevan ilman vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuden avulla ilmoitettuna [m<sup>2</sup>/s]  
 $\delta_v$  = materiaalin vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuseron avulla ilmoitettuna [m<sup>2</sup>/s]  
 $\delta_{p,a}$  = paikallaan olevan ilman vesihöyrynläpäisevyys vesihöyryn osapaine-eron avulla ilmoitettuna [kg/(m·s·Pa)]  
 $\delta_p$  = materiaalin vesihöyrynläpäisevyys vesihöyryn osapaine-eron avulla ilmoitettuna [kg/(m·s·Pa)].

Suhteellinen diffuusioivastus  $s_d$  ilmoittaa, kuinka paksua paikallaan olevaa ilmakerrosta materiaalikerros vastaa vesihöyrynläpäisevyydeltään.

$$s_d = \mu \cdot d \quad (2.11)$$

missä

$s_d$  = materiaalin suhteellinen diffuusioivastus [m]  
 $\mu$  = materiaalin diffuusioivastuskerroin [-]  
 $d$  = materiaalikerroksen paksuus [m].

Paikallaan olevan ilman vesihöyrynläpäisevyys  $\delta_{v,a}$  riippuu ilman lämpötilasta ja vallitsevasta ilmanpaineesta. Paikallaan olevan ilman vesihöyrynläpäisevyydelle on olemassa useita korrelaatiokaavoja. Yleisesti käytetty on ns. Schirmerin yhtälö (RIL 255-1-2014)

$$\delta_{v,a} = 2,305 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{T}{273,15}\right)^{1,81} \cdot \left(\frac{101323}{P_n}\right) \quad (2.12)$$

missä

$\delta_{v,a}$  = paikallaan olevan ilman vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuden avulla ilmoitettuna [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$T$  = ilman lämpötila [K]

$P_n$  = normaali ilmanpaine [Pa].

Materiaalin vesihöyrynläpäisevyyden määrittämiseksi tulee pystyä mittaamaan materiaalikerroksen paksuus  $d$ . Ohuiden kalvojen ja maalien paksuutta ei pystytä luotettavasti mittaamaan, joten niiden vesihöyrynläpäisevyys esitetään vesihöyrynläpäisevyyskerrotimeksi, joka ei riipu materiaalikerroksen paksuudesta. Vesihöyrynläpäisevyyskerroin voidaan ilmoittaa joko vesihöyrypitoisuuseron avulla  $W_v$  [m/s] tai vesihöyryn osapaine-eron avulla  $W_p$  [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ ]. Ohuiden materiaalien vesihöyrynläpäisevyys voidaan esittää myös vesihöyrynläpäisykerrotimeksi käänteislukuna, vesihöyrynvastuksena  $Z_v$  [s/m] tai  $Z_p$  [ $(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})/\text{kg}$ ]. (Vinha 2007)

Vesihöyry ei pääse siirtymään vapaasti ympäröivän ilman ja materiaalin pinnan välillä. Vesihöyry siirtyy pinnan läheiseen, laminaariseen ilmakerrokseen pääasiassa konvektiolla ympäröivästä ilmasta. Pinnan läheisessä ilmakerroksessa vesihöyry siirtyy diffuusiolla. Kosteusvirran tiheys ympäröivän ilman ja rakenteen pinnan välillä  $g_{surf,v}$  [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ] lasketaan kaavalla (2.13). Ajavana potentiaalina voidaan käyttää materiaalin pinnan ja ympäröivän ilman välistä vesihöyrypitoisuuseroa  $\Delta v$  tai vesihöyryn osapaine-eroa  $\Delta p_v$ . (Hens 2007)

$$g_{surf} = \beta_v \cdot \Delta v, \quad g_{surf} = \beta_{v,p} \cdot \Delta p_v \quad (2.13)$$

missä

$g_{surf,v}$  = kosteusvirran tiheys ympäröivän ilman ja pinnan välillä [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]

$\beta_v$  = pinnan kosteudensiirtokerroin vesihöyrypitoisuuseron avulla ilmoitettuna [m/s]

$\Delta v$  = vesihöyrypitoisuusero ympäröivän ilman ja pinnan välillä [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$\beta_{v,p}$  = pinnan kosteudensiirtokerroin vesihöyryn osapaine-eron avulla ilmoitettuna [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ ]

$\Delta p_v$  = vesihöyryn osapaine-ero ympäröivän ilman ja pinnan välillä [Pa].

Pinnan kosteudensiirtokerrotimeksi on esitetty kirjallisuudessa vakioarvoja ja laskentakaavoja riippuen pinnan suunnasta ja ilmapirtauksesta pinnan lähellä (Hagentoft 2001, Delphin 5 (2006), Hens 2007). Pinnan kosteudensiirtokerrotimeksi  $\beta_v$  [m/s] tai  $\beta_{v,p}$  [s/m] arvo voidaan laskea esimerkiksi kaavalla (Hagentoft 2001)

$$\beta_v = \frac{h_{conv}}{\rho_a \cdot c_{p,a}}, \quad \beta_{v,p} = \frac{h_{conv}}{\frac{R}{M_w} \cdot T \cdot \rho_a \cdot c_{p,a}} \quad (2.14)$$

missä

$\beta_v$  = pinnan kosteudensiirtokerroin vesihöyrypitoisuuseron avulla ilmoitettuna [m/s]

$\beta_{v,p}$  = pinnan kosteudensiirtokerroin vesihöyryn osapaine-eron avulla ilmoitettuna [kg/(m<sup>2</sup>·s·Pa), s/m]

$h_{conv}$  = pinnan lämmönsiirtokerroin [W/(m<sup>2</sup>·K)]

$\rho_a$  = ilman tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

$c_{p,a}$  = ilman ominaislämpökapasiteetti [J/(kg·K)]

$R$  = yleinen kaasuvakio (8314,3 J/(kmol·K))

$M_w$  = veden moolimassa (18,02 kg/kmol)

$T$  = ilman lämpötila [K].

Kaavassa (2.14) esitetty pinnan lämmönsiirtokertoimen  $h_{conv}$  (ks. alaluku 2.3.2) ja pinnan kosteudensiirtokertoimen  $\beta_v$  välinen yhteys perustuu Lewisin lukuun. Lewisin luku kuvaa lämpöenergian ja massan (tässä tapauksessa vesihöyryn) etenemisen suhdetta systeemissä (tässä tapauksessa rajapinnan ilmakerroksessa). Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa ilmanpaineen vaihtelut ovat vähäisiä ja ilmavirran nopeudet pintojen lähettyvillä alhaisia, joten Lewisin luvuksi voidaan olettaa 1, jolloin päädytään kaavan (2.14) mukaiseen yhteyteen. (ASHRAE Handbook 2017)

### Kosteuden kapillaarinen siirtyminen

Kosteuden kapillaarisella siirtymisellä tarkoitetaan nestemäisen veden siirtymistä materiaalin huokosissa kapillaarisen imun seurauksena. Kapillaarisen imun aiheuttaa vesimolekyylien ja huokosen seinämien välinen vetovoima sekä veden pintajännitys. Kapillaarisen imun voimakkuutta kuvataan huokosalipaineella  $s$  [Pa], joka lasketaan kaavalla (ASHRAE Handbook 2017)

$$s = \frac{2 \cdot \sigma_w}{r} \cdot \cos(\theta) \approx \frac{2 \cdot \sigma_w}{r} \quad (2.15)$$

missä

$s$  = huokosalipaine [Pa]

$\sigma_w$  = veden pinnan pintajännitys (0,073 N/m)

$r$  = huokosputken säde [m]

$\theta$  = reunakulma meniskuksen ja putken seinämän välillä [°].

Rakennusmateriaaleilla reunakulma  $\theta$  [°] on likimain nolla, joten kaavasta (2.15) voidaan jättää huomioimatta reunakulman osuus (Vinha 2007). Kaavasta (2.15) huomataan, että huokosalipaine kasvaa huokosputken säteen pienentyessä. Lämpötilan kasvaessa veden pintajännitys pienenee, minkä seurauksena huokosalipaine pienenee. Lämpötilan vaikutus huokosalipaineeseen on kuitenkin pieni verrattuna huokosputken säteen vaikutukseen

(ASHRAE Handbook 2017). Kun huokosputken säde on riittävän pieni, huokosalipai-  
neen kasvu laskee veden jäätymislämpötilaa, mikä mahdollistaa veden kapillaarisen siir-  
tymisen myös nolaa alhaisemmissa lämpötiloissa (Vinha 2007).

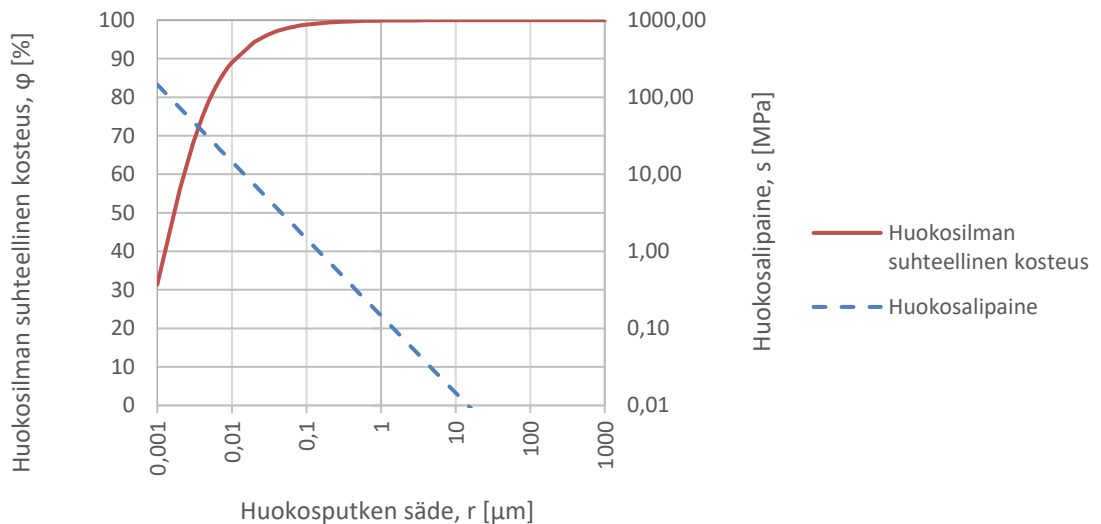
Huokosilman suhteellisen kosteuden  $\varphi$  ja huokosalipai-  
neen  $s$  välillä on kaavan (2.16)  
mukainen yhteys. Kaavaa kutsutaan Kelvinin laiksi. (ASHRAE Handbook 2017)

$$\varphi = \exp \left( -s \cdot \frac{M_w}{\rho_w RT} \right) \quad (2.16)$$

missä

- $\varphi$  = suhteellinen kosteus [-]  
 $s$  = huokosalipaine [Pa]  
 $M_w$  = veden moolimassa [kg/kmol]  
 $\rho_w$  = veden tiheys [kg/m<sup>3</sup>]  
 $R$  = yleinen kaasuvakio [J/(kmol·K)]  
 $T$  = ilman lämpötila [K].

Kuvassa 2.6 on esitetty huokosilman suhteellinen kosteus  $\varphi$  ja huokosalipaine  $s$  huokos-  
putken säteen  $r$  funktiona.



**Kuva 2.6.** Huokosilman suhteellinen kosteus ja huokosalipaine huokosputken säteen funktiona.

Kaavojen (2.15) ja (2.16) tulokset pätevät tarkasti vain pyöreille huokosputkille. Tuloksia voidaan kuitenkin käyttää huokoisten materiaalien kapillaarisuuden arviointiin. (Hagen-toft 2001)

Kapillaarisen kosteusvirran tiheyden määrittämisessä voidaan käyttää ajavana potentiaalina huokosalipainetta  $s$ , huokosilman suhteellista kosteutta  $\varphi$  tai materiaalin kosteuspitoisuutta  $w$ . Kun ajavana potentiaalina käytetään huokosalipainetta, kapillaarisen kosteusvirran tiheys  $\mathbf{g}_{cap}$  [kg/(m<sup>2</sup>·s)] materiaalikerroksen läpi lasketaan kaavalla (2.17), jota kutsutaan Darcyn laiksi.

$$\mathbf{g}_{cap} = k_w \cdot \nabla s \quad (2.17)$$

missä

- $\mathbf{g}_{cap}$  = kapillaarisen kosteusvirran tiheys [kg/(m<sup>2</sup>·s)]  
 $k_w$  = materiaalin kosteudenjohtavuus [kg/(m·s·Pa)] tai [s]  
 $s$  = huokosalipaine [Pa].

Darcyn laissa esiintyvä materiaalin kosteudenjohtavuus  $k_w$  on materiaaliominaisuus, joka huomioi kosteuden siirtymismuodot vesihöyryn diffuusiota lukuun ottamatta. Mikäli laskennassa käytetään kosteudenjohtavuutta, tulee vesihöyryn diffuusio ottaa huomioon vesihöyrynläpäisevyyden avulla. Kapillaarinen kosteudenjohtavuus voidaan määrittää myös hygroskooppisella alueella oleville materiaaleille, jos niissä tapahtuu kapillaarista kosteuden siirtymistä. (Vinha 2007)

Kosteusvirran ajavana potentiaalina voidaan käyttää vaihtoehtoisesti huokosilman suhteellista kosteutta, koska huokosilman suhteellisen kosteuden ja huokosalipaineen välinen yhteys voidaan määrittää Kelvinin lailla (kaava (2.16)). Tällöin kaikki kosteuden siirtymismuodot sisältävä kosteusvirran tiheys  $\mathbf{g}$  lasketaan kaavalla

$$\mathbf{g} = -D_\varphi \cdot \nabla \varphi \quad (2.18)$$

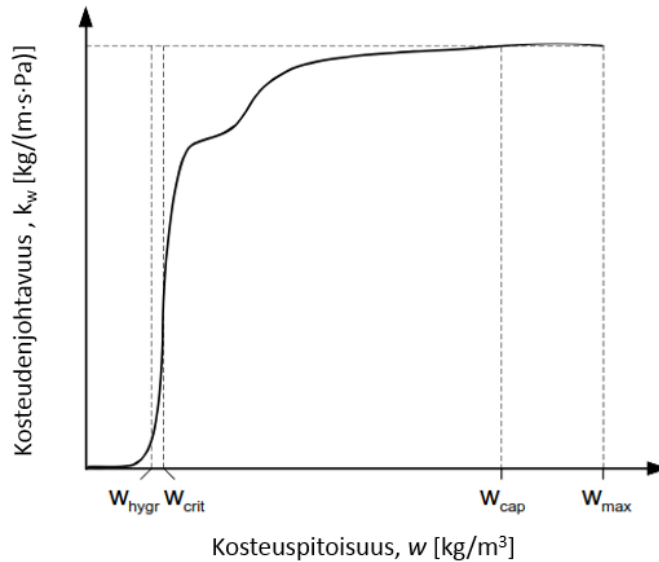
missä

- $\mathbf{g}$  = kosteusvirran tiheys [kg/(m<sup>2</sup>·s)]  
 $D_\varphi$  = materiaalin vedenjohtavuuskerroin [kg/(m·s)]  
 $\varphi$  = huokosilman suhteellinen kosteus [-].

Kuten edellä todettiin, huokosalipaine on kääntäen verrannollinen huokosputken säteeseen. Kapillaarivirtaukseen vaikuttaa huokosalipaineen lisäksi myös huokosputken virtausvastus, joka on kääntäen verrannollinen huokosputken säteen neljänteen potenssiin. Tästä syystä suurten huokosten kosteudensiirtokapasiteetti on suurempi kuin pienten. Koska suuret huokokset voivat täyttyä vasta, kun pienemmät huokokset ovat täyttyneet, kosteudensiirtokapasiteetti on riippuvainen materiaalin kosteuspitoisuudesta. Tämän seurauksena myös kosteudenjohtavuus  $k_w$  ja kosteudenjohtavuuskerroin  $D_\varphi$  ovat riippuvaisia materiaalin kosteuspitoisuudesta. (ASHRAE Handbook 2017)

Kuvassa 2.7 on esitetty huokoisen materiaalin kosteudenjohtavuus kosteuspitoisuuden funktiona. Kuvasta havaitaan, että kosteudenjohtavuus riippuu voimakkaasti materiaalin

kosteuspitoisuudesta. Kosteudenjohtavuus kasvaa huomattavasti, kun materiaalin huokosiin syntyy yhtenäinen vedellä täytynyt verkosto eli se saavuttaa kriittisen kyllästyskosteuspitoisuuden  $w_{crit}$ . Kapillaarisella alueella kosteudenjohtavuuden kasvu hidastuu. Kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden  $w_{cap}$  ja maksimikosteuspitoisuuden  $w_{max}$  välillä kosteudenjohtavuus pysyy käytännössä vakiona. (Vinha 2007)



**Kuva 2.7.** Huokoisen materiaalin kosteudenjohtavuus kosteuspitoisuuden funktiona (muokattu lähteestä (Vinha 2007)).

Kosteudenjohtavuuden  $k_w$  ja vedenjohtavuuskertoimen  $D_\varphi$  määrittäminen on vaikeaa, koska se edellyttää huokosalipaineen mittaamista huokosilman suhteellisen kosteuden jakautumisen suhteen muuttuvissa olosuhteissa. Sitä vastoin, materiaalin kosteuspitoisuuden jakautuminen pystytään taas määrittämään tarkasti nykyaikaisilla mittalaitteilla. Kosteuspitoisuuden mittausten avulla materiaaleille pystytään määrittämään kosteusdiffusiviteetti  $D_w$  [ $m^2/s$ ]. Kosteusvirran tiheys voidaan nyt laskea käyttämällä ajavana potentiaalina materiaalin kosteuspitoisuutta kaavalla (ASHRAE Handbook 2017)

$$\mathbf{g} = -D_w \cdot \nabla w \quad (2.19)$$

missä

$\mathbf{g}$  = kosteusvirran tiheys [ $kg/(m^2 \cdot s)$ ]

$D_w$  = materiaalin kosteusdiffusiviteetti [ $m^2/s$ ]

$w$  = materiaalin kosteuspitoisuus [ $kg/m^3$ ].

Kosteusdiffusiviteetti  $D_w$  kuvaa kuinka nopeasti kosteuspitoisuuden muutokset tapahtuvat materiaalissa. Mitä suurempi materiaalin kosteusdiffusiviteetti, sitä nopeammin se saavuttaa ympäröivän ilman suhteellista kosteutta vastaavan kosteuspitoisuuden. Kosteusdiffusiviteetti on analoginen termi lämmönsiirron yhteydessä esitetyn termisen diffusiviteetin  $a$  [ $m^2/s$ ] kanssa (ks. alaluku 2.3.1). (Vinha 2007)

Hygrooskoopisella alueella kosteus siirtyy materiaaleissa pääosin vesihöyryinä, joten hygrooskoopisen alueen kosteusdiffusiviteetti voidaan määrittää materiaalin vesihöyrynläpäisevyydestä kaavalla (Hagentoft 2001)

$$D_w = \delta_v \cdot v_{sat} \cdot \frac{d\varphi}{dw} = \frac{\delta_v \cdot v_{sat}}{\xi_\varphi} \quad (2.20)$$

missä

- $D_w$  = materiaalin kosteusdiffusiviteetti [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]  
 $\delta_v$  = materiaalin vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuseron avulla ilmoitettuna [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]  
 $v_{sat}$  = vesihöyryn kyllästyspitoisuus [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]  
 $\varphi$  = suhteellinen kosteus [-]  
 $w$  = materiaalin kosteuspitoisuus [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]  
 $\xi_\varphi$  = materiaalin ominaiskosteuskapasiteetti hygrooskoopisella alueella [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]  
 (ks. kaava **Error! Reference source not found.**).

Kapillaarinen kosteusdiffusiviteetti  $D_{w,s}$  saadaan vähentämällä kosteusdiffusiviteetista vesihöyrynläpäisevyyden osuus (Hagentoft 2001). Kapillaarinen kosteusdiffusiviteetti sisältää kosteuden siirtymisen kapillaarivirtauksena, painovoimasta johtuvana virtauksena sekä pintadiffusiona. (Vinha 2007)

$$D_{w,s} = D_w - \frac{\delta_{v,0} \cdot v_{sat}}{\xi_\varphi} = \frac{(\delta_v - \delta_{v,0}) \cdot v_{sat}}{\xi_\varphi} \quad (2.21)$$

missä

- $D_{w,s}$  = materiaalin kapillaarinen kosteusdiffusiviteetti [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]  
 $D_w$  = materiaalin kosteusdiffusiviteetti [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]  
 $\delta_v$  = materiaalin vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuseron avulla ilmoitettuna [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]  
 $\delta_{v,0}$  = kuivan materiaalin vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuseron avulla ilmoitettuna [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] ( $\varphi < 50\%$ )  
 $v_{sat}$  = vesihöyryn kyllästyspitoisuus [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]  
 $\xi_\varphi$  = materiaalin ominaiskosteuskapasiteetti hygrooskoopisella alueella [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].

Kaavan (2.19) käyttöä ei suositella kosteuden kapillaarisen siirtymisen laskentatarkasteissa. Materiaalin kosteuspitoisuus ei ole jatkuva potentiaali useista materiaaleista koostuvissa rakenteissa, toisin kuin suhteellinen kosteus tai huokosalipaine. (ASHRAE Handbook 2017) Kosteusdiffusiviteetin ja kosteuspitoisuuden avulla ei pystytä huomioimaan kaikkia kosteuden siirtymiseen vaikuttavia tekijöitä johtuen siitä, että se ei ole todellinen kapillaarisen virtauksen potentiaali. (Vinha 2007)

Materiaaleille pystytään kuitenkin mittaamaan kosteusdiffusiviteetin arvoja. Kaavojen (2.22) ja (2.23) avulla kosteusdiffusiviteetti pystytään muuttamaan kosteudenjohtavuuskertoimeksi  $D_\varphi$  tai kosteudenjohtavuudeksi  $k_w$ . Materiaalin kosteusdiffusiviteetin ja vedenjohtavuuskertoimen välinen yhteys lasketaan kaavalla

$$D_\varphi = D_w \cdot \xi_\varphi \quad (2.22)$$

missä

$D_\varphi$  = materiaalin vedenjohtavuuskerroin [kg/(m·s)]

$D_w$  = materiaalin kosteusdiffusiviteetti [m<sup>2</sup>/s]

$\xi_\varphi$  = materiaalin ominaiskosteuskapasiteetti hygroskooppisella alueella [kg/m<sup>3</sup>].

Materiaalin kapillaarisen kosteusdiffusiviteetin ja kosteudenjohtavuuden välillä pätee

$$k_w = D_{w,s} \cdot \xi_s \quad (2.23)$$

missä

$k_w$  = materiaalin kosteudenjohtavuus [kg/(m·s·Pa)] tai [s]

$D_{w,s}$  = materiaalin kapillaarinen kosteusdiffusiviteetti [m<sup>2</sup>/s]

$\xi_s$  = materiaalin ominaiskosteuskapasiteetti kapillaarisella alueella [kg/(m<sup>3</sup>·Pa)].

Kuten edellä esitetystä havaitaan, nestemäisen kosteuden siirtyminen huokoisissa materiaaleissa voidaan esittää useammalla tavalla. Osa tutkijoista olettaa, että hygroskooppisella alueella esiintyy nestemäisen kosteuden siirtymistä pintadiffuusiolla, kun taas joidenkin tutkijoiden mielestä kosteuden siirtyminen nesteenä alkaa vasta kriittistä kosteuspitoisuutta korkeammissa kosteuspitoisuuksissa. Etenkin hygroskooppisella alueella kapillaarisen kosteuden siirtyminen sekoitetaan vesihöyryn diffuusioon. (ASHRAE Handbook 2017)

### Kosteuden konvektio

Kosteuden konvektio tarkoittaa ilman sisältämän kosteuden siirtymistä ilman virtausten mukana. Kosteus voi liikkua ilman mukana vesihöyrynä, nestepisaroina tai lumena (Vinha 2007). Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa kosteus on vesihöyryä ja ilma siirtyy rakenteissa huokoisten materiaalien läpi tai rakojen ja reikien kautta. Ilman virtausta rakenteissa on käsitelty alaluvussa 2.2.

Kun ilmapirran tiheys  $\mathbf{g}_{conv,a}$  [kg/(m<sup>2</sup>·s)] tunnetaan, konvektiivisen kosteusvirran tiheys  $\mathbf{g}_{conv,v}$  [kg/(m<sup>2</sup>·s)] voidaan laskea kaavalla (Delphin 5 2006)

$$\mathbf{g}_{conv,v} = \mathbf{g}_{conv,a} \cdot \left( \frac{p_v}{p_a + p_v} \cdot \frac{R_a}{R_v} \right) \quad (2.24)$$



missä

$g_{conv,v}$  = konvektiivisen kosteusvirran tiheys [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]

$g_{conv,a}$  = ilmavirran tiheys [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]

$p_v$  = vesihöyryn osapaine [Pa]

$p_a$  = kuivan ilman osapaine [Pa]

$R_a$  = kuivan ilman ominaiskaasuvakio (287,1 J/(kg·K))

$R_v$  = vesihöyryn ominaiskaasuvakio (461,4 J/(kg·K)).

Tiiviydeltään hyvissä rakenteissa kosteuden konvektiolla ei ole suurta merkitystä rakenteiden toimintaan. Vastaavasti rakoja tai reikiä sisältävä ilmansulku- tai höyrynsulkukerros voi altistaa rakenteen suurillekin paikallisille kosteuskuormille. Konvektiovirtausten kuljettamat kosteusmäärät saattavat olla huomattavasti suurempia diffuusiolla siirtyviin kosteusvirtoihin verrattuna. (RIL 255-1-2014)

Kosteus voi siirtyä rakenteiden sisällä pakotetun konvektion lisäksi myös luonnollisen konvektion seurauksena (ks. alaluku 2.3.2). Suljetun ilmavälin lämmintä pintaa pitkin nouseva ilma lämpenee, jolloin se pystyy sitomaan itseensä kosteutta. Kun ilma kohtaa ilmavälin kylmän pinnan, ilman lämpötila alkaa laskea ja se luovuttaa kosteutta ympäröiviin rakenteisiin. Suljetussa ilmavälissä kosteutta siirtyy luonnollisen konvektion seurauksena lämpimän puolen rakenteista kylmän puolen rakenteisiin. Seinärakenteissa sisäisen konvektion vaikutus havaitaan lisääntyneenä kosteutena rakenteiden yläosissa, tuulensuojan sisäpinnassa.

## 2.2 Ilman siirtyminen

Ilma voi siirtyä rakenteissa huokoisten materiaalien läpi tai rakenteissa olevien rakojen ja reikien kautta. Virtaus voi olla tyypiltään laminaarista, turbulenttista tai niiden välimuotoa (Hens 2007). Ilman virtaus on seurausta ilmanpaine-erosta, joka rakenteille aiheutuu tyypillisesti ilman tiheyserosta, tuulesta ja ilmanvaihdosta. (Hagentoft 2001) Ilmanpaineerojen muodostumista on käsitelty tarkemmin alaluvussa 3.3.3.

Fluidin virtauksesta käytetään nimitystä konvektio. Ilman virtaus jaetaan luonnolliseen konvektioon ja pakotettuun konvektioon. Luonnollinen konvektio on seurausta ilman tiheyserosta, jonka aiheuttaa ilman lämpötila- ja/tai kosteuspitoisuusero. Pakotetussa konvektiossa virtaus tapahtuu ulkoisen voiman, kuten tuulen, puhaltimen tai pumpun vaikutuksesta. Pakotetussa konvektiossa virtauksen suunta ei ole riippuvainen ilman lämpötilasta tai kosteuspitoisuudesta. (Hens 2007)

Ilmavirran tiheys  $g_{conv,a}$  [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ] huokoisen materiaalin läpi voidaan laskea Darcyn lain avulla (kaava (2.25)). Ilmavirran siirtyminen huokoisen materiaalin läpi on analoginen prosessi kosteuden kapillaariselle siirtymiselle (vrt. kaava (2.17)).

$$\mathbf{g}_{conv,a} = -k_a \cdot \nabla p \quad (2.25)$$

missä

$\mathbf{g}_{conv,a}$  = ilmavirran tiheys [kg/(m<sup>2</sup>·s)]

$k_a$  = materiaalin ilmanläpäisevyys [kg/(m·s·Pa)] tai [s]

$p$  = ilmanpaine [Pa].

Tiiveydeltään hyvissä rakenteissa vain hyvin pieni määrä ilmaa läpäisee rakennuksen vai-  
pan. Yleensä ollaan kiinnostuneempia rakojen ja reikien läpi tapahtuvasta ilman siirtymi-  
sestä. Raon tai reiän läpi siirtyvän ilman määrään vaikuttaa virtausvastus, jonka arvo riip-  
puu esimerkiksi rakojen tai reikien koosta, muodosta ja karheudesta. Raon tai reiän läpi  
siirtyvälle ilmavirralle  $R_a$  [kg/s] voidaan kirjoittaa kaava

$$R_a = \frac{\Delta p}{S} \quad (2.26)$$

missä

$R_a$  = ilmavirta raon tai reiän läpi [kg/s]

$\Delta p$  = paine-ero raon tai reiän yli [Pa]

$S$  = raon tai reiän virtausvastus [(s·Pa)/kg].

Kirjallisuudessa on esitetty likimääräisiä kaavoja rakojen ja reikien virtausvastuksien las-  
kentaan (Mills 1999, Hagentoft 2001). Ilman virtauksen tarkka mallintaminen edellyttäisi  
numeerisen virtausdynamiikan (engl. Computational Fluid Dynamics, CFD) käyttöä.  
Tässä diplomityössä käytetty laskentaohjelma oletti ilman virtauksen laminaariseksi, jol-  
loin rakojen ja reikien virtausvastuksia ei ole otettu huomioon (Delphin 5 2006). Kaikilla  
laskentaohjelmilla edes laminaarisen virtauksen mallintaminen ei ole mahdollista, mutta  
näilläkin laskentaohjelmilla pystytään arvioimaan ilmavuotojen vaikutuksia yksinkertais-  
tetusti lähde- ja nielutermien avulla. Lähde ja -nielutermien käyttö aiheuttaa kuitenkin  
virtauksen mallintamiseen verrattuna suurempia epätarkkuuksia tuloksiin.

Kirjallisuudessa materiaalien ilmanläpäisevyysominaisuuksia kuvataan ilmanläpäisevyyy-  
den  $k_a$  lisäksi materiaalikerroksen ilmanläpäisevyyskertoimella  $K_a$  [kg/(m·s·Pa)] tai ma-  
teriaalin permeabiliteetillä  $k$  [m<sup>2</sup>]. Materiaaliominaisuuksien välillä pätee kaavojen (2.27)  
ja (2.28) mukaiset yhteydet.

$$k_a = \frac{k}{\eta_a} \quad (2.27)$$

missä

$k_a$  = materiaalin ilmanläpäisevyys [kg/(m·s·Pa)] tai [s]

$k$  = materiaalin permeabiliteetti [m<sup>2</sup>]

$\eta_a$  = ilman dynaaminen viskositeetti [s·Pa].

$$k_a = K_a \cdot d \quad (2.28)$$

missä

$k_a$  = materiaalin ilmanläpäisevyys [kg/(m·s·Pa)] tai [s]

$K_a$  = materiaalin ilmanläpäisykerroin [kg/(m<sup>2</sup>·s·Pa)] tai [s/m]

$d$  = materiaalikerroksen paksuus [m].

Kirjallisuudessa ilmanläpäisevyydelle käytetään myös yksikköä [m<sup>3</sup>/(m·s·Pa)] ja ilmanläpäisykerroin yksikköä [m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·s·Pa)].

Laskennallisissa tarkasteluissa ilman ja kosteuden siirtyminen erotellaan toisistaan, joten ilman siirtymisen tasapainoyhtälössä otetaan huomioon vain kuivan ilman ilmavirran tiheys  $g_{conv,a,dry}$  [kg/(m<sup>2</sup>s)] osuus ilmavirran tiheydestä  $g_{conv,a}$ . Kuivan ilman ilmavirran tiheys lasketaan kaavalla (2.29) (Delphin 5 2006). Tarkalleen ottaen kaavassa (2.29) ilmalle tulisi käyttää kostean ilman kaasuvakiota kuivan ilman kaasuvakion tilalla.

$$g_{conv,a,dry} = g_{conv,a} \cdot \left( \frac{p_a}{p_a + p_v} \cdot \frac{R_v}{R_a} \right) \quad (2.29)$$

missä

$g_{conv,a,dry}$  = kuivan ilmavirran tiheys [kg/(m<sup>2</sup>s)]

$g_{conv,a}$  = ilmavirran tiheys [kg/(m<sup>2</sup>s)]

$p_v$  = vesihöyryn osapaine [Pa]

$p_a$  = kuivan ilman osapaine [Pa]

$R_a$  = kuivan ilman ominaiskaasuvakio (287,1 J/(kg·K))

$R_v$  = vesihöyryn ominaiskaasuvakio (461,4 J/(kg·K)).

Ilmavirtaus kuljettaa mukanaan lämpöä, kosteutta ja haitallisia aineita. Tämän takia ilmavirtausten hallitsemisella on merkittävä vaikutus rakenteiden ja rakennusten toimintaan. Rakennusten energiatehokkuuden kannalta on edullista estää sisäilman siirtyminen vaipan läpi. Sisäilman laadun kannalta on tärkeää, että haitallisia aineita ei pääse kulkeutumaan sisäilmaan.

Ilman siirtymisellä on sekä positiivisia että negatiivisia vaikutuksia rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan. Tuuletusväliässä virtaava ilma lisää rakenteiden kuivumis-potentiaalia, kun julkisivun läpäissyt tai rakenteen sisälle päässyt kosteus pystyy sitoutumaan tuuletusraossa virtaavaan ilmaan. Toisaalta tuuletusrakojen kautta ulkoilma on yhteydessä rakenteen sisäosiin ja voi siten siirtää kosteutta myös rakenteen sisälle.

Tyypillisesti ulkoilmaa kosteamman sisäilman siirtyminen rakennuksen vaipan läpi pyritään estämään käyttämällä ilman- ja höyrynsulkukerroksia. Kuten jo kosteuden konvektion yhteydessä todettiin, höyrynsulkukerrosten raot ja reiät aiheuttavat rakenteisiin paikallisia kosteusrasituksia, mutta lisäksi ne kasvattavat lämpövirtaa rakenteiden läpi.

## 2.3 Lämpö ja lämmön siirtyminen

Termodynamiikassa maailma jaetaan systeemeihin ja ympäristöihin. Systeemi voi olla esimerkiksi materiaalikappale, rakenneosat, rakennus tai lämmitysjärjestelmä ja ympäristö siihen vaikuttavat tekijät. Lämpö osoittaa, kuinka energiaa liikkuu systeemin ja sen ympäristön välillä. Partikkelitasolla lämpö voidaan käsittää atomien tai molekyylien liike-energiaksi, joka kasvaa lämpötilan noustessa. (Hens 2007)

Lämmön siirtymisellä tarkoitetaan ilmiötä, jossa lämpöenergiaa siirtyy lämpötilaeron vaikutuksesta. Lämmön siirtyminen jaetaan kolmeen siirtymistapaan: johtumiseen, konvektioon ja säteilyyn. (Mills 1999)

Termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön eli energian säilymislain mukaan systeemiin tuotu energia voi muuttua toiseksi energiamuodoksi, mutta energian kokonaismäärä systeemissä ei muutu. Avoimelle systeemille termodynamiikan ensimmäinen pääsääntö voidaan kirjoittaa kaavan (2.30) muotoon, kun kineettisen energian ja potentiaalienergian muutoksia ei oteta huomioon ja oletetaan, että systeemi ei tee työtä. (Mills 1999)

$$\Delta U = \Phi + \dot{m} \cdot \Delta h + \sigma^U \quad (2.30)$$

missä

$\Delta U$	= systeemin sisäenergian muutos [J/s]
$\Phi$	= systeemin ja ympäristön välinen lämpövirta [W]
$\dot{m}$	= systeemin ja ympäristön välinen massavirta [kg/s]
$\Delta h$	= virtaavan aineen ominaisentalpian muutos [J/kg]
$\sigma^U$	= systeemin lämpöhäviö/lämmöntuotto [W].

Lämpö- ja kosteusteknisissä tarkasteluissa systeemin muodostavat rakenneosat ja ympäristöä kuvaavat reunaehdot. Rakenteiden pinnoilta rakenteisiin siirtyy ja rakenteista poistuu lämpöenergiaa sekä kosteutta ja ilmaa, mitkä kuljettavat mukanaan lämpöenergiaa. Rakennusosien sisäistä lämmöntuottoa voivat aiheuttaa esimerkiksi vesijohdot ja lämpöhäviöitä esimerkiksi rakennusmateriaaleissa tapahtuvat kemialliset reaktiot.

Entalpialla  $h$  [J] tarkoitetaan systeemin tai aineen energiasisältöä. Entalpia koostuu systeemin luomiseen vaadittavasta energiasta  $U$  (sisäenergia) sekä työstä, joka vaaditaan ympäristön syrjäyttämiseen. Entalpien määritelmä voidaan kirjoittaa kaavaksi

$$h = U + p \cdot V \quad (2.31)$$

missä

$h$	= entalpia [J]
$U$	= systeemin sisäenergia [J]
$p$	= systeemin paine [Pa]
$V$	= systeemin tilavuus [m <sup>3</sup> ].

Ympäristön syrjäyttämiseksi tehtävä työ voidaan olettaa rakennusfysiikan tarkasteluissa nolllaksi, koska tilavuuden muutokset voivat tapahtua vapaasti. Entalpian muutos oletetaan siis yhtä suureksi kuin systeemin sisäenergian muutos. Kaavoista (2.30) ja (2.31) havaitaan, että suljetun systeemin entalpian muutos on yhtä suuri kuin systeemin ja ympäristön välinen lämpövirta, kun systeemissä ei tapahdu lämpöhäviöitä tai lämmöntuottoa. Tämän perusteella materiaaleille ja aineille voidaan määrittää ominaisentalpia  $h$  [J/kg].

$$h = c \cdot \Delta T \quad (2.32)$$

missä

$h$  = materiaalin ominaisentalpia [J/kg]

$c$  = materiaalin ominaislämpökapasiteetti [J/(kg·K)]

$\Delta T$  = lämpötilan muutos [K].

Ominaislämpökapasiteetilla  $c$  [J/(kg·K)] kuvataan materiaalin tai aineen kykyä varastoida lämpöenergiaa. Ominaislämpökapasiteetti riippuu lämpötilasta sekä paineesta ja sen arvo voidaan ilmoittaa vakioaineessa  $c_p$  tai vakioilavuudessa  $c_v$ . Kiinteille aineille ja nesteille voidaan olettaa  $c_p \approx c_v$ , mutta kaasuilla ominaislämpökapasiteettien välillä pätee kaavan (2.33) mukainen yhteys. Rakennusfysiikan laskentatarkasteluissa tilavuuden muutokset pääsevät tapahtumaan vapaasti, joten kaasuille käytetään ominaislämpökapasiteettia vakioaineessa  $c_p$ . (Hagentoft 2001)

$$c_v = c_p - \frac{R}{M} \quad (2.33)$$

missä

$c_v$  = materiaalin ominaislämpökapasiteetti vakioilavuudessa [J/(kg·K)]

$c_p$  = materiaalin ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa [J/(kg·K)]

$R$  = yleinen kaasuvakio (8314,5 J/(kmol·K))

$M$  = kaasun moolimassa [kg/kmol].

Sen lisäksi, että systeemin lämpötilan muuttaminen vaatii lämmön siirtymistä, myös aineen olomuodon muutokset aiheuttavat lämmön sitoutumista ja vapautumista. Olomuodonmuutokseen vaadittavaa tai olomuodonmuutoksessa vapautuvaa lämpöä kutsutaan latenttilämmöksi. Latenttilämpöjä ovat sulamislämpö, höyrystymislämpö ja sublimoitumislämpö.

Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa keskitytään veden olomuodonmuutoksiin. Veden jäätymispiste materiaalin huokosissa on vaikea määrittää, koska huokosalipaineen vaikutuksesta veden jäätymispiste voi olla alhaisempi kuin 0 °C (Vinha 2007), joten tämän diplomityön laskentatarkasteluissa veden sulamislämpöä ei ole huomioitu. Jäätymisen

huomioimisella on myös laskentaa hidastava vaikutus. Diplomityön laskentatarkaste-  
luissa latenttilämmön sisältävälle vesihöyryn ominaisentalpialle on käytetty kaavaa

$$h_v = c_{p,v} \cdot \Delta T + h_v^{evap} \quad (2.34)$$

missä

$h_v$  = vesihöyryn ominaisentalpia [J/kg]

$c_{p,v}$  = vesihöyryn ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa [J/(kg·K)]

$\Delta T$  = lämpötilan muutos [K]

$h_v^{evap}$  = veden höyrystymislämpö [J/kg].

Lämmön sitoutuminen aineeseen kytkee lämmön ja aineen siirtymisen toisiinsa. Kytkeyty  
lämmön ja kosteuden siirtyminen tulee ottaa huomioon alaluvussa 2.4 esitettävissä tasa-  
painoyhtälöissä.

Lämpö- ja kosteusteknisissä tarkasteluissa systeemit koostuvat useista aineista, kuten ra-  
kennusmateriaaleista, ilmasta ja vedestä. Systeemin sisäenergian  $U_{sys}$  [J] määrittämistä  
varten on hyödyllistä määritellä systeemin tilavuudesta riippuva aineen sisäenergian ti-  
heys  $\rho^U$  [J/m<sup>3</sup>]. Aineen sisäenergian tiheys lasketaan kaavalla

$$\rho^U = \rho \cdot \theta \cdot h \quad (2.35)$$

missä

$\rho^U$  = sisäenergian tiheys [J/m<sup>3</sup>]

$\rho$  = aineen tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

$\theta$  = aineen pitoisuus systeemissä [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]

$h$  = aineen ominaisentalpia [J/kg].

Systeemin sisäenergian tiheys  $\rho_{sys}^U$  [J/m<sup>3</sup>] saadaan sen sisältämien aineiden sisäenergioi-  
den tiheyden summana. Systeemin sisäenergia  $U_{sys}$  lasketaan systeemin sisäenergian ti-  
heyden avulla, kun tunnetaan systeemin tilavuus.

### 2.3.1 Johtuminen

Mikroskooppisella tasolla johtumisen fysikaalinen mekanismi on monimutkainen ja se  
vaihtelee riippuen tarkasteltavasta materiaalista ja faasista (Mills 1999). Rakennusten  
lämpö- ja kosteusteknisien tarkastelujen kannalta riittää, kun lämmön johtumista tarkas-  
tellaan ilmiönä. Lämmön johtumisella tarkoitetaan ilmiötä, jossa molekyylien sisäinen  
liike-energia siirtyy molekyylistä toiseen ilman molekyylien keskinäisen sijainnin muut-  
tumista (Hens 2007).

Johtumalla siirtyvän lämpövirran tiheyttä  $q_{cd}$  [W/m<sup>2</sup>] homogeenisissa ja isotrooppisissa  
materiaaleissa kuvataan Fourierin lailla

$$\mathbf{q}_{cd} = -\lambda \cdot \nabla T = -\left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}, \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}, \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad (2.36)$$

missä

$\mathbf{q}_{cd}$  = johtumalla siirtyvän lämpövirran tiheys [W/m<sup>2</sup>]

$\lambda$  = materiaalin lämmönjohtavuus [W/(m·K)]

$T$  = lämpötila [K].

Lämpötilan gradientti  $\nabla T$  kuvaa lämpötilakentän muutoksen suuntaa ja suuruutta rakenteen pisteissä. Termodynamiikan toisen pääsäännön mukaan systeemi pyrkii kohti suurinta entropiaa, minkä seurauksena lämpö siirtyy korkeammasta lämpötilasta matalampaan. Johtumalla siirtyvän lämpövirran tiheys  $\mathbf{q}_{cd}$  on siten lämpötilan gradientille vastakkainen, joten kaavassa (2.36) on negatiivinen etumerkki.

Vaikka lämmönjohtavuus  $\lambda$  on materiaaliarvo, joka liitetään yleensä lämmön johtumiseen, rakennusfysiikassa se sisältää tyypillisesti kaikki lämmön siirtymisen muodot materiaalissa. Huokoisissa materiaaleissa, kuten mineraalivillassa, konvektio ja säteily muodostavat merkittävän osan materiaalin lämmönjohtavuudesta. Lämmönjohtavuus ei ole vakio, vaan siihen vaikuttavat esimerkiksi ympäröivän ilman lämpötila ja suhteellinen kosteus sekä materiaalin ikä ja rasisitushistoria. (Vinha 2007)

Kaavalla (2.37) materiaaleille voidaan määrittää terminen diffusiviteetti  $a$  [m<sup>2</sup>/s], joka kuvaa lämpötilan muutosten etenemisnopeutta materiaalissa. Terminen diffusiviteetti on analoginen suure kosteusdiffusiviteetin  $D_w$  kanssa (ks. 2.1.4).

$$a = \frac{\lambda}{\rho_0 \cdot c} \quad (2.37)$$

missä

$a$  = materiaalin terminen diffusiviteetti [m<sup>2</sup>/s]

$\lambda$  = materiaalin lämmönjohtavuus [W/(m·K)]

$\rho_0$  = materiaalin kuivatiheys [kg/m<sup>3</sup>]

$c$  = materiaalin ominaislämpökapasiteetti [J/(kg·K)].

Materiaalikerroksen kykyä vastustaa lämmön siirtymistä kuvataan lämmönvastuksella  $R$  [(m<sup>2</sup>·K)/W]. Ohuille materiaaleille ja materiaalien pinnoille ilmoitetaan yleensä suoraan lämmönvastusarvot. Homogeeniselle materiaalikerrokselle lämmönvastus voidaan laskea kaavalla

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (2.38)$$

missä

$R$  = lämmönvastus [(m<sup>2</sup>·K)/W]

$d$  = materiaalikerroksen paksuus [m]

$\lambda$  = materiaalin lämmönjohtavuus [W/(m·K)].

Rakenteet koostuvat tyypillisesti useista materiaalikerroksista. Homogeenisista materiaalikerroksista koostuvan rakenteen kokonaislämmönvastus  $R_T$  lasketaan materiaalikerrosten lämmönvastusten summana. (SFS-EN ISO 6946 2017)

Asetuksissa ja ohjeissa rakenteiden lämmönsiirtokyky määritetään yleensä lämmönläpäisykerroimen  $U$  [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ] eli U-arvon (aiemmin k-arvo (Björkholtz 1997)) avulla. Lämmönläpäisykerroin saadaan lämmönvastuksen käänteislukuna ja useasta homogeenisestä materiaalikerroksesta koostuvan rakenteen lämmönläpäisykerroin lasketaan kaavalla

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1 + R_2 + \dots + R_n} \quad (2.39)$$

missä

$U$  = rakenteen lämmönläpäisykerroin [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ]

$R_i$  = materiaalikerroksen lämmönvastus [ $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ ].

Rakenteet eivät koostu aina homogeenisistä materiaalikerroksista. Esimerkiksi runkotolpat, koolaukset ja julkisivun kiinnikkeet aiheuttavat rakenteeseen lämmönjohtavuudeltaan erilaisia rinnakkaisia kerroksia. Epähomogeenisiä materiaalikerroksia sisältävän rakenteen lämmönläpäisykerroin voidaan määrittää numeerisesti tai yksinkertaisemmin rakenteen kokonaislämmönvastuksen ylä- ja alalikiarvon, kiinnikkeiden aiheuttaman kylmäsilta vaikutuksen ja asennustyön laadun huomioivien korjaustermien avulla. Rakenteen lämmönläpäisykerroimen laskentaa on käsitelty tarkemmin lähteissä (SFS-EN ISO 6946 2017, SFS-EN ISO 10211 2017).

### 2.3.2 Konvektiivinen lämmön siirtyminen

Konvektiivinen lämmön siirtyminen tarkoittaa lämmön siirtymistä fluidin välityksellä. Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa virtaavana fluidina toimii yleensä ilma ja joskus vesi (Vinha 2007). Fluidin virtaus voi olla luonnollista, jolloin se aiheutuu painovoimasta ja lämpötilaerojen aiheuttamasta tiheyserosta tai pakotettua, jolloin virtaus aiheutuu esimerkiksi vedenpaineesta, tuulenpaineesta tai ilmanvaihdosta. Sekä luonnollinen että pakotettu virtaus voivat olla tyypiltään laminaarista tai turbulენტista. (Mills 1999).

Fluidi voi virrata rakenteiden sisällä esimerkiksi ilmaraoissa tai materiaalien huokosissa. Kuten edellä esitettiin, aineet sitovat itseensä lämpöenergiaa, joten konvektiovirtaus kuljettaa mukanaan lämpöenergiaa. Konvektiivisen lämpövirran tiheys  $q_{conv}$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] voidaan laskea kaavalla

$$q_{conv} = g \cdot c_p \cdot (T - T_0) \quad (2.40)$$



missä

- $q_{conv}$  = konvektiivinen lämpövirran tiheys [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]  
 $g$  = fluidivirran tiheys [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]  
 $c_p$  = fluidin ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa [ $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ]  
 $T$  = fluidin lämpötila [ $\text{K}$ ]  
 $T_0$  = referenssilämpötila (0 K).

Lämpötilaeron seurauksena fluidin ja pinnan välillä siirtyy lämpöä. Pinnan konvektiiviseen lämmön siirtymiseen vaikuttavat pinnan muoto ja lämpötila, fluidin lämpötila ja nopeus sekä fluidin lämpötekniset ominaisuudet (Mills 1999). Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa ei ole tarpeellista tarkastella konvektiivista lämmönsiirtoa näin tarkasti.

Rakenteen ulkopuolisen konvektion lämpövirrantiheys  $q_{conv}$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] on suhteessa ympäröivä fluidin ja pinnan väliseen lämpötilaeroon. Suhdetta kutsutaan pinnan lämmönsiirtokertoimeksi  $h_{conv}$  [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ]. Pinnan konvektiivinen lämpövirrantiheys  $q_{conv}$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] pinnasta fluidiin lasketaan kaavalla (Mills 1999)

$$q_{conv} = h_{conv} \cdot (T_s - T_a) \quad (2.41)$$

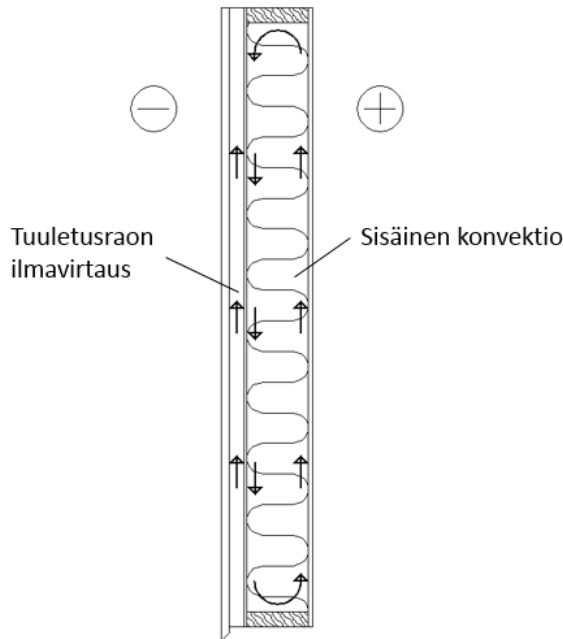
missä

- $q_{conv}$  = pinnan konvektiivinen lämpövirran tiheys [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]  
 $h_{conv}$  = pinnan konvektiivinen lämmönsiirtokerroin [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ]  
 $T_s$  = pinnan lämpötila [ $\text{K}$ ]  
 $T_a$  = ympäröivän fluidin lämpötila [ $\text{K}$ ].

Kaavaa (2.41) kutsutaan Newtonin jäähtymislaiksi. Se on kuitenkin paremminkin pinnan lämmönsiirtokertoimen määritelmä kuin fysiikan laki. Luonnollisen konvektion tapauksessa tilanne muuttuu monimutkaisemmaksi, kun konvektiivisen lämpövirran tiheys ei ole enää suoraan verrannollinen pintojen väliseen lämpötilaeroon. Pinnan lämmönsiirtokertoimen käyttöä pidetään silti lämmönsiirtotarkasteluihin sopivana. (Mills 1999) Pinnan konvektiivisen lämmönsiirtokertoimelle on esitetty likimääräisiä arvoja ja kaavoja esimerkiksi lähteissä (Mills 1999, Hagentoft 2001, Hens 2007, SFS-EN ISO 6946 2017).

Puurunkoisten ulkoseinärakenteiden julkisivuverhouksen ja tuulensuojan väliin on jätettävä avoin ilmarako rakenteen kosteusteknisen toimivuuden parantamiseksi. Tuuletusraon tulee olla ulkoilmaan avoin, jolloin ilma virtaa julkisivuverhouksen ja tuulensuojan välissä. (RIL 107-2012) Tuuletusraon ilmavirtaus on tyypillisesti tuulenpaineen pakottamaa virtausta, mutta virtauksen voimakkuuteen vaikuttaa myös tuuletusraon pintojen lämpötila sekä tuuletusraon ja ulkopuolisen ilman välinen lämpötilaero. Konvektiivisen lämmön siirtymisen vaikutus hyvin tuulettuvan tuuletusraon lämmönvastukseen on merkittävä.

Suljetussa ilmaraossa ilma liikkuu luonnollisen konvektion seurauksena, kun ilmaraon pintojen tai ilmaraon ja ulkopuolisen ilman välillä vallitsee lämpötilaero. Ilman liike aiheuttaa lämmön siirtymistä ontelon pintojen välillä. Ilmiötä kutsutaan sisäiseksi konvektioksi. Sisäistä konvektiota esiintyy myös huokoisilla lämmöneristeillä eristetyissä rakenteissa. Seinärakenteissa lämpimän pinnan vieressä oleva ilma nousee pintaa pitkin ylös ja kylmän pinnan vieressä oleva ilma laskee pintaa pitkin alas. Kuvassa 2.8 on esitetty seinärakenteen ilmavirtaus tuuletusraossa ja luonnollisen konvektion seurauksena eristetilassa.



**Kuva 2.8.** Ilmavuodottoman seinärakenteen ilmavirtaukset.

Sisäisen konvektion voimakkuus riippuu eristemateriaalin ilmanläpäisevyydestä, ontelon leveydestä, suunnasta ja ontelon pintojen välillä vallitsevasta lämpötilaerosta (SFS-EN ISO 10456 + AC 2008). Lisäksi eristeen asennuksessa eristeen ja ontelon pintojen väliin sekä runkotolppien nurkkiin jää herkästi yhtenäisiä ilmarakoja, joilla on sisäistä konvektiota lisäävä vaikutus (Vinha 2007).

Sisäisen konvektion vaikutusta rakenteen lämpövirran tiheyteen voidaan kuvata Nusseltin luvun  $Nu$  [-] avulla (kaava (2.42)). Nusseltin luku kuvaa, kuinka paljon sisäinen konvektio lisää kokonaislämpövirtaa ilmavälin tai huokoisen eristekerroksen läpi. (Hagentoft 2001)

$$Nu = \frac{q_{cd+conv}}{q_{cd}} \quad (2.42)$$

missä

$Nu$  = Nusseltin luku [-]

$q_{cd+conv}$  = johtumalla ja konvektiolla siirtyvän lämpövirran tiheys [ $W/m^2$ ]

$q_{cd}$  = johtumalla siirtyvän lämpövirran tiheys [ $W/m^2$ ].

Nusseltin lukua ja sisäisen konvektion haitallista esiintymistä voidaan arvioida modifioidun Rayleigh'n luvun  $Ra_m$  [-] avulla (Hagentoft 2001, SFS-EN ISO 10456 + AC 2008). Tässä diplomityössä ei ole huomioitu sisäisen konvektion vaikutusta.

### 2.3.3 Säteily

Lämpösäteilyllä tarkoitetaan energian siirtymistä sähkömagneettisen aaltoliikkeen välityksellä (Siikanen 2014). Lämpösäteilyn aiheuttaa kappaleen molekyyliessä tapahtuva liike, joten kaikki kappaleet, joiden lämpötila poikkeaa absoluuttisesta nollapisteestä, säteilevät eli emittoivat lämpöä. Sähkömagneettiset aallot etenevät tyhjiössä valon nopeudella  $c$  ( $2,998 \cdot 10^8$  m/s) eivätkä tarvitse edetäkseen väliainetta. Väliaine hidastaa sähkömagneettisten aaltojen etenemistä. (Mills 1999)

Tyhjiössä sähkömagneettisen säteilyn aallonpituuden  $\lambda$  [m] ja taajuuden  $f$  [Hz] välillä on kaavan (2.43) mukainen yhteys.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.43)$$

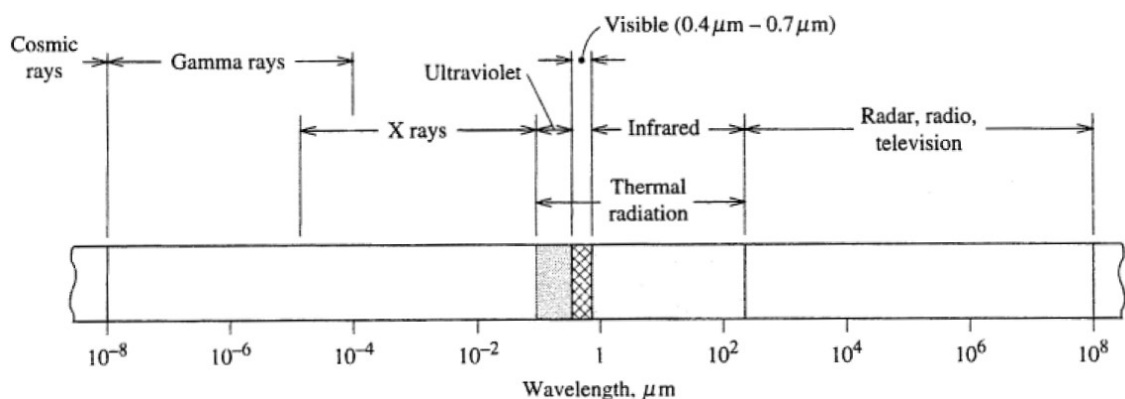
missä

$\lambda$  = säteilyn aallonpituus [m]

$c$  = valon nopeus tyhjiössä ( $2,997925 \cdot 10^8$  m/s)

$f$  = säteilyn taajuus [Hz].

Sähkömagneettinen spektri kattaa kaikki aallonpituusalueet, jotka toteuttavat yhtälön (2.43). Lämpösäteilyyn yhdistetään sähkömagneettisen spektrin aallonpituusalue  $0.1 - 100 \mu\text{m}$ . Näkyvän valon aallonpituusalue ( $\sim 0.4 - 0.7 \mu\text{m}$ ) on vain pieni osa sähkömagneettisen spektrin aallonpituusalueesta. Sähkömagneettinen spektri ja aallonpituusalueiden nimitykset on esitetty kuvassa 2.9. (Mills 1999)



**Kuva 2.9.** Sähkömagneettinen spektri ja aallonpituusalueiden nimitykset. (Mills 1999)

Lämpösäteilyn aallonpituusalue jaetaan kahteen osaan, lyhyt- ja pitkäaaltoiseen lämpösäteilyyn (Mills 1999). Lyhytaaltoiseksi lämpösäteilyksi määritellään säteily, jonka

aallonpituus on  $0,2 - 3 \mu\text{m}$  ja pitkäaaltoiseksi lämpösäteilyksi aallonpituusalue  $3 - 40 \mu\text{m}$ . Rakennusfysiikassa lyhytaaltoista lämpösäteilyä ovat auringon suora- sekä diffuusi säteily ja pitkäaaltoista säteilyä taas rakenteiden sekä ympäristön välinen lämpösäteily.

Mustaksi kappaleeksi kutsutaan kappaletta, joka imee eli absorboi kaiken siihen kohdistuvan säteilyn riippumatta säteilyn aallonpituudesta tai suunnasta. Ideaalinen musta kappale ei heijasta lainkaan siihen osuvaa säteilyä, minkä seurauksena kaikki mustasta kappaleesta lähtevä säteily on kappaleen emittoimaa säteilyä. Mustan kappaleen määritelmästä johtuen mikään todellinen kappale ei voi lähettää säteilyä suuremmalla teholla kuin musta kappale. Ideaalisen mustan kappaleen emittoima spektrinen säteilyteho  $E_{b,\lambda}$  [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{m})$ ] aallonpituuden  $\lambda$  [m] ja pinnan lämpötilan  $T$  [K] funktiona lasketaan Planckin lailla (Mills 1999)

$$E_{b,\lambda} = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\left(e^{h \cdot c / \lambda \cdot k \cdot T} - 1\right)} \quad (2.44)$$

missä

$E_{b,\lambda}$  = mustan kappaleen emittoima säteilyintensiiteetti [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{m})$ ]

$h$  = Planckin vakio ( $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ )

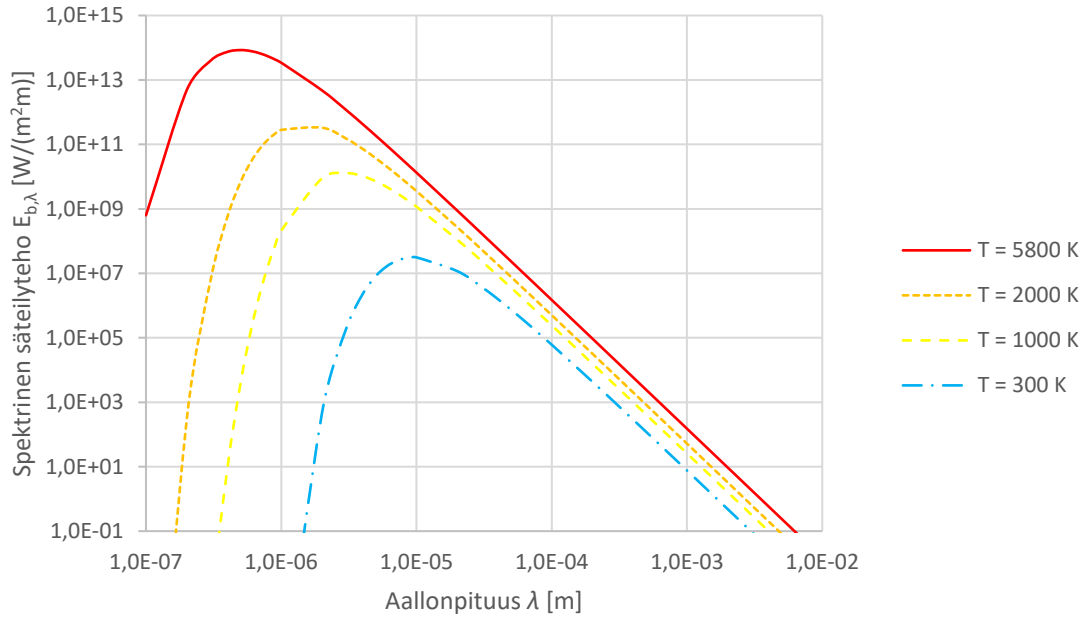
$c$  = valon nopeus tyhjiössä ( $2,997925 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ )

$\lambda$  = säteilyn aallonpituus [m]

$k$  = Boltzmannin vakio ( $1,318 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ )

$T$  = pinnan lämpötila [K].

Kuvassa 2.10 on esitetty mustan kappaleen spektrinen säteilyteho  $E_{b,\lambda}$  neljässä eri pintalämpötilassa. Kuvasta 2.10 havaitaan, että lämpötilan noustessa pinnan säteilyteho kasvaa ja pienten aallonpituuksien osuus kasvaa.



**Kuva 2.10.** Mustan kappaleen säteilyintensiteetin jakauma aallonpituuden funktiona eri pintalämpötiloissa.

Kun mustan kappaleen emittoima säteilyintensiteetti integroidaan kaikkien aallonpituuksien yli, saadaan laskettua mustan kappaleen emittoima kokonaissäteilyteho  $E_b$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]. Yhdistämällä integroidun lausekkeen vakiot saadaan kerroin, jota kutsutaan Stefan-Boltzmannin vakioksi  $\sigma$  ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ). Kaavaa (2.45) kutsutaan Stefan-Boltzmannin laiksi. (Mills 1999)

$$E_b = \int_0^{\infty} E_{b,\lambda} d\lambda = \frac{2 \cdot \pi^5 \cdot k^4}{15 \cdot c^2 \cdot h^3} \cdot T^4 = \sigma \cdot T^4 \quad (2.45)$$

missä

- $E_b$  = mustan kappaleen kokonaissäteilyteho [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]  
 $\sigma$  = Stefan-Boltzmannin vakio ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ )  
 $T_s$  = pinnan lämpötila [K].

Todellisten materiaalien pintojen käyttäytyminen poikkeaa mustan kappaleen käyttäytymisestä. Todelliset kappaleet jaetaan läpinäkyviin ja läpinäkymättömiin kappaleisiin. Suurin osa rakennusmateriaaleista, lasia ja muovia lukuun ottamatta, ovat läpinäkymättömiä. Kun säteily osuu läpinäkymättömän kappaleen pintaan, osa säteilystä absorboituu ja osa heijastuu. Läpinäkyvän kappaleen tapauksessa osa säteilystä läpäisee materiaalin. Säteilykomponenttien osuutta kokonaissäteilystä kuvataan absorptiokertoimella  $\alpha$  [-], heijastuskertoimella  $\rho$  [-] ja läpäisykertoimella  $\tau$  [-]. Pinnan kertoimille voidaan kirjoittaa yhtälö (Hagentoft 2001)

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.46)$$

missä

- $\alpha$  = absorptiokerroin [-]  
 $\rho$  = heijastuskerroin [-]  
 $\tau$  = läpäisykerroin [-].

Läpinäkymättömään pintaan osuvan säteilyn absorptio- ja heijastuskerroin riippuvat pinnan ominaisuuksista, säteilyn aallonpituudesta ja kulmasta, jossa säteily osuu pintaan. Myös pinnan lämpötilalla on vaikutusta kertoimiin. Rakennusfysiikassa päästään riittävän tarkkoihin tuloksiin käyttämällä pintojen kertoimille keskimääräisiä arvoja. (Mills 1999)

Läpinäkymättömien materiaalien säteilyominaisuuksia kuvataan harmaalla kappaleella. Harmaan kappaleen määritelmän mukaan, harmaa kappale absorboi vakio osuuden mustan kappaleen emittoimasta säteilystä, säteilyn aallonpituudesta ja suunnasta riippumatta. Mustan kappaleen säteilyteho  $E_b$  on pinnan emittoiman säteilyn yläraja. Todellisten pintojen eli harmaiden kappaleiden säteilyteho  $E$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] on pienempi kuin mustan pinnan säteilyteho  $E_b$ . Mustan pinnan ja todellisen pinnan säteilytehojen suhdetta kuvataan emissiviteetillä  $\varepsilon$  [-]. (Mills 1999)

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} \quad (2.47)$$

missä

- $\varepsilon$  = pinnan emissiviteetti [-]  
 $E_b$  = mustan kappaleen kokonaissäteilyteho [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]  
 $E$  = todellisen pinnan kokonaissäteilyteho [ $\text{W}/\text{m}^2$ ].

Kun säteilytehojen suhde sijoitetaan Stefan-Boltzmannin lakiin (kaava (2.45)), saadaan todellisen pinnan emittoimalle kokonaissäteilyteholle lauseke

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (2.48)$$

missä

- $E$  = todellisen pinnan emittoima kokonaissäteilyteho [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]  
 $\varepsilon$  = pinnan emissiviteetti [-]  
 $\sigma$  = Stefan-Boltzmannin vakio ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ )  
 $T_s$  = pinnan lämpötila [K].

Tarkasteltaessa tiettyä aallonpituusalueita ja pintoja, joiden lämpötilat ovat lähellä toisiinsa, voidaan käyttää kaavan (2.49) mukaista yksinkertaistusta. (Mills 1999)

$$\varepsilon = \alpha \quad (2.49)$$

Rakennusfysiikassa on tehty jaottelu lyhyt- ja pitkäaaltoisen lämpösäteilyn välille, jotta kaavassa (2.49) esitettyä yksinkertaistusta voidaan käyttää. Lyhytaaltoisen säteilyn absorptiokerroin  $\alpha_{sw}$  voi erota merkittävästi pitkäaaltoisen säteilyn absorptiokertoimesta  $\alpha_{lw}$  (RIL 255-1-2014).

Pintojen välisen nettosäteilyn lämpövirran tiheys  $q_{rad}$  [W/m<sup>2</sup>] lasketaan kaavalla

$$q_{rad} = h_{rad} \cdot (T_1 - T_2) \quad (2.50)$$

missä

$q_{rad}$  = nettosäteilyn lämpövirran tiheys [W/m<sup>2</sup>]

$h_{rad}$  = säteilyn lämmönsiirtokerroin [W/(m<sup>2</sup>·K)]

$T_1, T_2$  = pintojen lämpötilat [K].

Kahdelle pinnalle, joiden pintojen lämpötilat ovat lähellä toisiaan, saadaan pintojen väliselle lämmönsiirtokertoimelle  $h_{rad}$  laskettua rakennusfysikaalisiin tarkasteluihin riittävän tarkka likiarvo kaavasta (Hagentoft 2001)

$$h_{rad} = 4 \cdot \varepsilon_{1,2} \cdot \sigma \cdot \bar{T}_{1,2}^3 \quad (2.51)$$

missä

$h_{rad}$  = säteilyn lämmönsiirtokerroin [W/(m<sup>2</sup>·K)]

$\varepsilon_{1,2}$  = pintojen yhdistetty emissiviteetti [-]

$\sigma$  = Stefan-Boltzmannin vakio (5,67·10<sup>-8</sup> W/(m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>))

$\bar{T}_{1,2}$  = pintojen välinen keskilämpötila [K].

Pintojen yhdistetty emissiviteetti lasketaan kaavalla

$$\varepsilon_{1,2} = \left( \frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{1,2}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \cdot \frac{A_1}{A_2} \right)^{-1} \quad (2.52)$$

missä

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$  = pintojen emissiviteetit [-]

$F_{1,2}$  = pintojen välinen näkyvyyskerroin [-]

$A_1, A_2$  = pintojen pinta-alat [m<sup>2</sup>].

Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa tarkastellaan usein kahden yhdensuuntaisen pinnan välistä tilannetta. Kahden suuren yhdensuuntaisen pinnan tapauksessa pintojen välisen näkyvyyskerroimen  $F_{1,2}$  arvo on 1,0 ja pinta-alat ovat yhtä suuret. Kaava (2.52) saadaan tällöin muotoon

$$\varepsilon_{1,2} = \left( \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)^{-1} \quad (2.53)$$

Erilaisten tilanteiden näkyvyyskertoimille on esitetty kaavoja esimerkiksi lähteessä (Mills 1999).

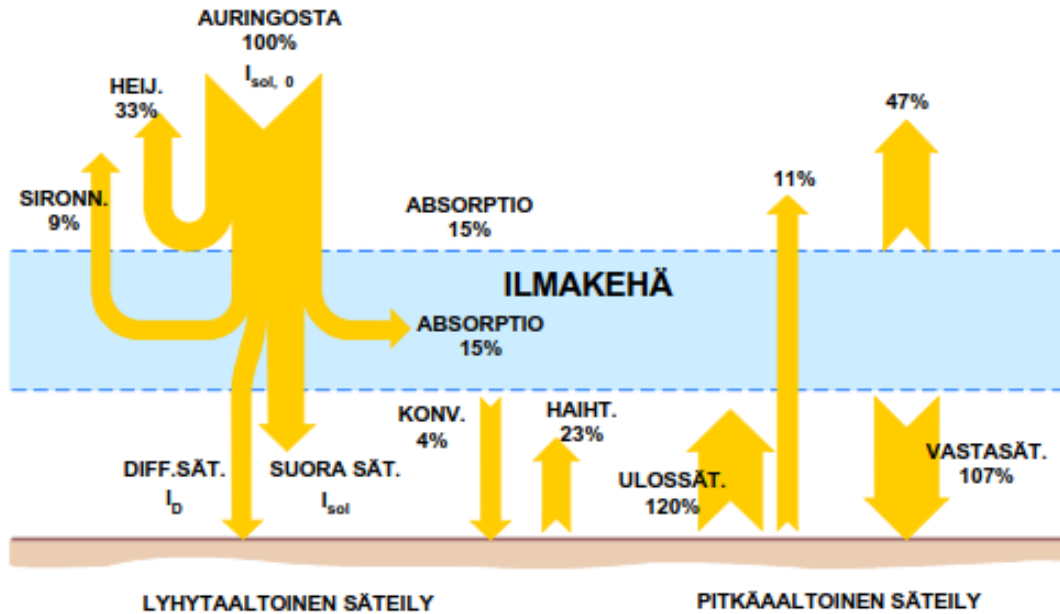
### **Auringon säteily (lyhytaaltainen säteily)**

Auringon säteilyn spektri ja kokonaisteho vastaavat mustaa kappaletta, jonka lämpötila on noin 5800 K. Ilmakehän yläosaan saapuvaa keskimääräistä suoran auringon säteilyn kokonaistehoa auringon säteilyä vastaan kohtisuoralle pinnalle kutsutaan aurinkovakioksi,  $I_{sol,0}$  [ $W/m^2$ ]. Aurinkovakio on keskimäärin noin  $1366 W/m^2$ . Jos auringon säteily levitetään tasaisesti koko ilmakehän ulkopinnalle, keskimääräiseksi säteilytehoksi saadaan  $340 W/m^2$ . (Karttunen et al. 2008) Auringon säteilyn kokonaisteho vaihtelee auringon pintaosien ilmiöiden ja maan elliptisen kiertoradan seurauksena ollen tammikuussa suurimmillaan ja kesäkuussa pienimmillään. (Mills 1999)

Kun auringon säteily kohtaa maan ilmakehän, osa säteilystä heijastuu takaisin avaruuteen, osa siroaa ilmakehän aerosoleista sekä kaasumolekyyleistä, osa absorboituu ilmakehän kaasumolekyyleihin ja osa läpäisee ilmakehän. Ilmakehän läpäissyt säteily joko absorboituu maahan tai heijastuu maasta takaisin ilmakehään. Maan pinnan heijastuskykyä kuvataan albedo kertoimella  $\rho_{albedo}$  [-]. Maan pinnalle tuleva globaali lyhytaaltainen säteily jaetaan suoraan auringonsäteilyyn sekä sironnan ja heijastumisen seurauksena diffusoituneeseen säteilyyn. (Mills 1999)

Maa säteilee pinnaltaan pitkäaaltoista säteilyä, josta osa läpäisee ilmakehän ja osa palaa ilmakehästä takaisin maan pinnalle vastasäteilyinä. Maan pinnalla höyrystynyt vesi siirtää latenttilämpöä ilmapvirtausten mukana. Tiivistyessään vesihöyry vapauttaa vesihöyryyn sitoutuneen lämpöenergian ilmakehään. (Karttunen et al. 2008) Maapallon lämpötase ja tärkeimmät lämpövirrat on esitetty kuvassa 2.11.





**Kuva 2.11.** Maapallon lämpötase ja siihen vaikuttavat tärkeimmät lämpövirrat. (Vinha 2011)

Tarkasteltavan pinnan normaalin suunnassa tuleva suoran auringonsäteilyn intensiteetti  $I_{sw,dir,n}$  [ $W/m^2$ ] voidaan laskea kaavalla (2.54), kun tunnetaan ilmakehän läpäisseen suoran auringon säteilyn intensiteetti säteitä vastaan kohtisuoralla tasolla  $I_{sw,dir,0}$  [ $W/m^2$ ] ja auringon säteilyn lankeamiskulma  $\nu$  [ $^\circ$ ]. Ilmakehän läpäisseen suoran auringon säteilyn intensiteetti määritetään yleensä vaakapinnalle vähentämällä vaakapinnalle tulevasta globaalista lyhytaaltoisesta säteilystä diffuusin säteilyn osuus.

$$I_{sw,dir,n} = I_{sw,dir,0} \cdot \cos \nu \quad (2.54)$$

missä

$I_{sw,dir,n}$  = pinnan normaalin suuntainen suoran auringon säteilyn intensiteetti [ $W/m^2$ ]

$I_{sw,dir,0}$  = ilmakehän läpäisseen suoran auringon säteilyn intensiteetti säteitä vastaan kohtisuoralla tasolla [ $W/m^2$ ]

$\nu$  = auringon säteilyn lankeamiskulma [ $^\circ$ ].

Auringon säteilyn lankeamiskulma pinnalle voidaan laskea kaavalla (Vinha 2011)

$$\cos \nu = \sin(\beta + \gamma) - \cos \beta \cdot \sin \gamma + \cos \beta \cdot \sin \gamma \cdot \cos \phi \quad (2.55)$$

missä

$\beta$  = auringon korkeuskulma [ $^\circ$ ]

$\gamma$  = tarkasteltavan pinnan ja vaakatason välinen kulma [ $^\circ$ ]

$\phi$  = aurinkoatsimuutti [ $^\circ$ ].

Tarkasteltavalle pinnalle tuleva diffuusi säteily koostuu ilmakehässä sironneesta sekä maan pinnasta heijastuneesta diffuusista säteilystä. Diffuusin säteilyn intensiteetti tarkasteltavalle pinnalle  $I_{sw,diff,n}$  [ $W/m^2$ ] voidaan laskea kaavalla (2.56), kun tunnetaan diffuusin säteilyn intensiteetti vaakapinnalle  $I_{sw,diff,h}$  ja globaalin lyhytaaltoisen säteilyn intensiteetti vaakapinnalle  $I_{sw,glob,h}$ . (Delphin 5 2006)

$$I_{sw,diff,n} = I_{sw,diff,h} \cdot \left( \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) \right)^2 + \rho_{albedo} \cdot I_{sw,glob,h} \cdot \left( \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) \right)^2 \quad (2.56)$$

missä

$I_{sw,diff,n}$	= diffuusin säteilyn intensiteetti tarkasteltavalle pinnalle [ $W/m^2$ ]
$I_{sw,diff,h}$	= diffuusin säteilyn intensiteetti vaakapinnalle [ $W/m^2$ ]
$\gamma$	= tarkasteltavan pinnan ja vaakatason välinen kulma [ $^\circ$ ]
$\rho_{albedo}$	= maan pinnan heijastuskerroin [-]
$I_{sw,glob,h}$	= globaalin säteilyn intensiteetti vaakapinnalle [ $W/m^2$ ].

Pinnan absorboiman lyhytaaltoisen säteilyn intensiteetti  $I_{sw}$  [ $W/m^2$ ] lasketaan kaavalla

$$I_{sw} = \alpha_{sw} \cdot (I_{sw,dir,n} + I_{sw,diff,n}) \quad (2.57)$$

missä

$I_{sw}$	= tarkasteltavan pinnan absorboiman lyhytaaltoisen säteilyn intensiteetti [ $W/m^2$ ]
$\alpha_{sw}$	= pinnan lyhytaaltoisen säteilyn absorptiokerroin [-]
$I_{sw,dir,n}$	= suoran säteilyn intensiteetti tarkasteltavalle pinnalle [ $W/m^2$ ]
$I_{sw,diff,n}$	= diffuusin säteilyn intensiteetti tarkasteltavalle pinnalle [ $W/m^2$ ].

### Pitkäaaltoinen säteily

Rakenteiden pintojen ja ympäristön eli taivaan ja maan välillä siirtyy lämpöä pitkäaaltoisen säteilyn välityksellä. Pitkäaaltoisen säteilyn aiheuttamaan lämmön siirtymistä kuvataan pintojen välisellä nettosäteilyllä. Maan pinnan ja tarkasteltavan pinnan välinen lämpötilaero on oletettu pieneksi, jolloin niiden välinen nettolämpösäteily on voitu jättää huomioimatta laskentatarkasteluissa. Tarkasteltavan pinnan ja taivaan väliselle pitkäaaltoiselle nettolämpösäteilylle  $I_{lw,sky}$  [ $W/m^2$ ] saadaan lauseke

$$I_{lw,sky} = \varepsilon_{lw,surf} \cdot \sigma \cdot (T_{sky}^4 - T_{surf}^4) \cdot \left( \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) \right)^2 \quad (2.58)$$

missä

$I_{lw,sky}$  = tarkasteltavan pinnan ja taivaan välinen nettolämpösäteily [ $W/m^2$ ]

$\epsilon_{lw,surf}$  = tarkasteltavan pinnan pitkäaaltoisen säteilyn emissiviteetti [-]

$\sigma$  = Stefan-Boltzmannin vakio ( $5,67 \cdot 10^{-8} W/(m^2K^4)$ )

$T_{sky}$  = taivaan tehollinen lämpötila [K]

$T_{surf}$  = tarkasteltavan pinnan lämpötila [K]

$\gamma$  = tarkasteltavan pinnan ja vaakatason välinen kulma [ $^\circ$ ].

Tarkasteltavan pinnan ja taivaan välisen nettolämpösäteilyn laskennassa taivasta kuvataan kuvitteellisella pinnalla. Kuvitteellisen pinnan lämpötilana käytetään taivaan tehollista lämpötilaa  $T_{sky}$ , joka aiheuttaisi todellisuutta vastaavan nettolämpösäteilyn tarkasteltavan pinnan ja taivaan välille. (Vinha et al. 2013) Taivaan tehollisen lämpötilan laskemiseen on esitetty kirjallisuudessa erilaisia laskentamenetelmiä. Taivaan tehollisen lämpötilan määrittämisessä voidaan ottaa huomioon esimerkiksi ulkoilman lämpötila, ulkoilman suhteellinen kosteus ja pilvisuus.

Lämmön siirtymistä pitkäaaltoisena säteilynä esiintyy myös rakenteiden sisällä. Raoissa ja huokoisissa materiaaleissa lämpö siirtyy muiden lämmön siirtymismuotojen lisäksi säteilemällä. Huokoisten materiaalien sisällä lämpösäteilyä ei pystytä helposti erottelemaan muista lämmön siirtymismuodoista, joten säteilyn osuus sisältyy lämmönjohtavuuden materiaaliarvoon (ks. alaluku 2.3.1). Ilmaraoissa lämmön siirtyminen säteilemällä otetaan huomioon käyttämällä ilmalle ilman lämmönjohtavuuden sijaan tehollista lämmönjohtavuuden arvoa, joka vastaa raon leveyttä ja suuntaa.

## 2.4 Tasapainoyhtälöt

Laskentatarkasteluja voidaan tehdä sekä stationäärisissä että epästationäärisissä olosuhteissa. Stationääritilanteessa ympäristön olosuhteet sekä lähde- ja nielutermi pysyvät muuttumattomina, jolloin myös ympäristön ja systeemin väliset lämpö- ja massavirrat ovat vakioita. Stationäärisissä olosuhteissa oleva systeemi saavuttaa ympäristönsä kanssa tasapainotilan, jolloin myös systeemin olosuhteet pysyvät muuttumattomina.

Epästationäärisissä eli muuttuvissa olosuhteissa olevan systeemin lämpö- ja massavirrat vaihtelevat riippuen ympäristön olosuhteista. Tällöin systeemi ei saavuta tasapainotilaa eikä lämpötilan tai massapitoisuuden jakaumaa pystytä määrittämään lämpö- tai kosteusvirran tiheyden funktiona. Epästationääriset laskentatarkastelut edellyttävät tasapainoyhtälöiden määrittelyä.

Rakennusfysiikan tasapainoyhtälöt perustuvat kahteen klassisen fysiikan säilymislakiin: energian säilymislakiin ja massan säilymislakiin. Tämän diplomityön laskentatarkasteluissa on käytetty energian, kosteuden ja ilman tasapainoyhtälöitä. Tasapainoyhtälön yleinen muoto voidaan esittää lausekkeella

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_{REV}^E = -\nabla[\mathbf{j}^E] + \sigma_{REV}^E \quad (2.59)$$

missä

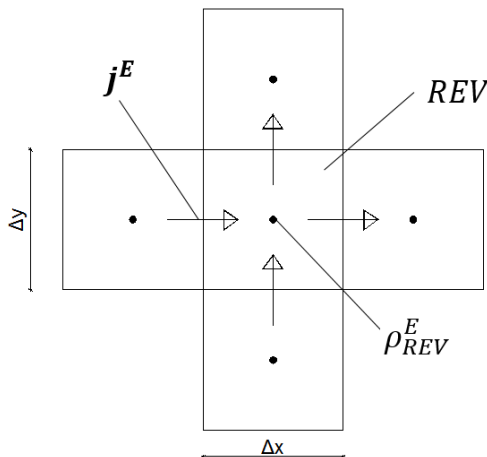
$\rho_{REV}^E$  = tarkasteltavan tilasuuren tiheys tarkastelutilavuudessa [ $1/m^3$ ]

$\mathbf{j}^E$  = tarkasteltavan tilasuuren virran tiheys [ $1/m^2$ ]

$\sigma_{REV}^E$  = tarkasteltavan suureen lähteet- ja nielut tarkastelutilavuudessa [ $J/kg$ ].

Tilasuureet, kuten lämpötila, paine, tilavuus ja sisäenergia, kuvaavat systeemin tilaa eivätkä ole riippuvaisia tavasta, jolla tila saavutettiin (Keller et al. 1993). Sanallisessa muodossa tasapainoyhtälöt voidaan esittää siten, että yhtälön vasemmalla puolella on tilasuureen varastoitumista kuvaava termi. Varastoituneen tilasuureen muutoksen tulee olla yhtä suuri, kuin systeemin tulevien ja lähtevien virtojen summa.

Lämmön varastoitumisen ja siirtymisen yhteydessä (ks. alaluku 2.3) esiteltiin käsitteet systeemi ja ympäristö. Tasapainoyhtälöiden numeerista ratkaisua varten rakenne jaetaan laskentaverkon avulla pieniin osiin, joita kutsutaan laskentaelementeiksi (kuva 2.12). Tarkasteltava rakenne on itsessään systeemi, mutta myös jokainen rakenteen laskentaelementti on systeemi, jonka tulee toteuttaa säilymislaite.



**Kuva 2.12.** Laskentaelementti.

Laskennan lähtökohtana on oletus paikallisesta tasapainotilanteesta. Paikallinen tasapainotilanne tarkoittaa sitä, että jokaisessa laskentaelementissä oletetaan vallitsevan tasapainotilanne lämpötilan ja kosteusolosuhteiden kesken. Oletus paikallisesta tasapainotilanteesta mahdollistaa stationääritilanteesta mitattujen materiaaliominaisuuksien (esimerkiksi lämmönjohtavuus, vesihöyrynläpäisevyys, tasapainokosteuskäyrä ja ilmanläpäisevyys) käytön laskentaelementin alueella. Oletuksesta seuraa myös yksiselitteinen yhteys veden neste- ja höyryfaasien tasapainolle. Vaikka laskentaelementit ovat paikallisessa tasapainotilanteessa, lämpö- ja kosteusvirrat rakenteessa ovat kuitenkin mahdollisia, koska olosuhteet vaihtelevat laskentaelementtien välillä. Useissa rakennusfysiikan

tarkasteluissa olosuhteet muuttuvat niin hitaasti, että oletus toimii kohtalaisen hyvin. (Vinha et al. 2013)

Ilmiöiden monimutkaisuus ja keskinäinen riippuvuus johtavat numeeristen menetelmien käyttöön. Rakennusfysiikassa yleisesti käytettyjä ratkaisumenetelmiä ovat esimerkiksi differenssimenetelmä (engl. Finite Difference Method, FDM), kontrollitilavuusmenetelmä (engl. Finite Volume Method, FVM) ja elementtimenetelmä (engl. Finite Element Method, FEM). (RIL 255-1-2014) Laskentatarkasteluissa käytetty Delphin-laskentaohjelma käyttää kontrollitilavuusmenetelmää (Delphin 5 2006).

Seuraavissa alaluvuissa esitellään tämän tutkimuksen laskentatarkasteluissa käytetyt tasapainoyhtälöt ja tasapainoyhtälöihin liittyvät oletukset. Tasapainoyhtälöihin liittyvät oletukset ovat laskentaohjelmasta johtuvia ja osittain käyttäjän valitsemia.

## 2.4.1 Ilman tasapainoyhtälö

Rakenteiden ilmamäärä ja ilmavirran tiheys muuttuvissa olosuhteissa pystytään laskemaan ilman tasapainoyhtälön avulla. Ilman tasapainoyhtälön määrittämiseksi laskentatarkasteluissa käytetyssä laskentaohjelmassa on tehty oletukset (Delphin 5 2006):

- Ilma on kaasuseos, joka koostuu kuivasta ilmasta ja vesihöyrystä.
- Kuiva ilma koostuu happi- ja typpimolekyyleistä sekä pienistä määristä muita kaasuja.
- Konvektiivinen ilmavirtaus käsitellään erillään lämmön- ja kosteuden siirtymisestä.
- Ilmavirtaus oletetaan laminaariseksi
- Liikkuvien faasien kineettinen energia on jätetty huomioimatta.
- Ilmalle käytetään kuivan ilman kaasuvakiota (mahdollistaa kaavojen (2.24) ja (2.29) käytön laskentatarkasteluissa)

Laskentatarkasteluissa ilman tasapainoyhtälönä on käytetty kaavaa

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_{REV}^{m_{a,dry}} = -\nabla(\mathbf{g}_{conv,a,dry}) + \sigma_{REV}^{m_{a,dry}} \quad (2.60)$$

missä

$\rho_{REV}^{m_{a,dry}}$  = kuivan ilman pitoisuus tarkastelutilavuudessa [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$\mathbf{g}_{conv,a,dry}$  = kuivan ilman ilmavirran tiheys [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]

$\sigma_{REV}^{m_{a,dry}}$  = kuivan ilman lähde- tai nielutermi tarkastelutilavuudessa [ $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ].

Kaavasta (2.60) havaitaan, että ilman tasapainoyhtälössä tarkastellaan vain kuivaa ilmaa. Ilmavirran tiheys saadaan laskettua kaavalla (2.25), josta kuivan ilman osuus erotetaan

kaavalla (2.29). Kuivan ilman lähde- ja nieluterminä laskentatarkasteluissa toimii esimerkiksi tuuletusraon ilmanvaihtuvuus.

## 2.4.2 Energian tasapainoyhtälö

Energian tasapainoyhtälöllä saadaan ratkaistua rakenteen lämpötilajakauma ja lämpövirran tiheys muuttuvissa olosuhteissa. Energian tasapainoyhtälön määrittämiseksi laskentatarkasteluissa käytetyssä laskentaohjelmassa on tehty oletukset (Delphin 5 2006):

- Kaikki laskentaelementin faasit ovat samassa lämpötilassa
- Entalpian ja sisäenergian välistä eroa ei huomioida (ks. alaluku 2.3)

Tässä diplomityössä tehdyissä laskentatarkasteluissa on käytetty energian tasapainoyhtälönä kaavaa

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_{REV}^U = -\nabla[\mathbf{q}_{cd} + \mathbf{g}_{diff} \cdot h_v + \mathbf{g}_{cap} \cdot u_w + \mathbf{g}_{conv,a} \cdot u_a] + \sigma_{REV}^U \quad (2.61)$$

missä

$\rho_{REV}^U$  = sisäenergian tiheys tarkastelutilavuudessa [ $\text{J}/\text{m}^3$ ]

$\mathbf{q}_{cd}$  = johtumalla siirtyvän lämpövirran tiheys [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

$\mathbf{g}_{diff}$  = diffuusiolla siirtyvän kosteusvirran tiheys [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]

$h_v$  = vesihöyryn ominaisentalpia [ $\text{J}/\text{kg}$ ]

$\mathbf{g}_{cap}$  = kapillaarisesti siirtyvän kosteusvirran tiheys [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]

$u_w$  = veden ominaisentalpia [ $\text{J}/\text{kg}$ ]

$\mathbf{g}_{conv,a}$  = konvektiivisen ilmavirran tiheys [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]

$u_a$  = konvektiolla siirtyvän ilman ominaisentalpia [ $\text{J}/\text{kg}$ ]

$\sigma_{REV}^U$  = energialähteet ja -nielut tarkastelutilavuudessa [ $\text{W}/\text{m}^3$ ].

Johtumalla siirtyvän lämpövirran tiheyden laskentaan käytetään kaavaa (2.36). Koska materiaalin lämmönjohtavuus sisältää kaikki lämmön siirtymisen muodot, niitä ei tarvitse ottaa erikseen huomioon tasapainoyhtälössä (Vinha 2007).

Diffuusiolla siirtyvän vesihöyryn mukanaan siirtämä lämpövirta lasketaan kaavoilla (2.8) ja (2.34) sekä vastaavasti kapillaarisesti siirtyvän kosteuden mukana siirtyvä lämpövirta kaavoilla (2.17) ja (2.32). Ilman konvektion mukana siirtyvä lämpövirta lasketaan kaavoilla (2.25), (2.32) ja (2.34).

Sisäenergian tiheys tarkastelutilavuudessa  $\rho_{REV}^U$  saadaan kiinteiden, nestemäisten ja kaasmaisten aineiden sisäenergioiden summana (ks. kaava (2.35)) (Delphin 5 2006).

$$\rho_{REV}^U = \rho_s \cdot \theta_s \cdot h_s + \rho_l \cdot \theta_l \cdot h_l + \rho_g \cdot \theta_g \cdot h_g \quad (2.62)$$

missä

$\rho_{REV}^U$  = sisäenergian tiheys [J/m<sup>3</sup>]

$\rho_i$  = faasin tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

$\theta_i$  = faasin pitoisuus tarkastelutilavuudessa [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]

$h_i$  = faasin ominaisentalpia [J/kg]

$s, l, g$  = faaseihin viittaavat alaindeksit (kiinteä, neste, kaasu)

Kun laskennassa on tehty oletus, että laskentaelementin kaikki aineet ja faasit ovat samaa lämpötilassa, laskentaelementissä vallitseva lämpötila lasketaan kaavalla

$$T_{REV} = \frac{\rho_{REV}^U - h_v \cdot \rho_{REV}^{m_v}}{\rho_s \cdot \theta_s \cdot h_s + \rho_l \cdot \theta_l \cdot h_l + \rho_g \cdot \theta_g \cdot h_g} \quad (2.63)$$

missä

$T_{REV}$  = laskentaelementin lämpötila [K]

$\rho_{REV}^U$  = sisäenergian tiheys [J/m<sup>3</sup>]

$h_v$  = veden höyrystymislämpö [J/kg]

$\rho_{REV}^{m_v}$  = vesihöyrypitoisuus tarkastelutilavuudessa [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_i$  = faasin tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

$\theta_i$  = faasin pitoisuus tarkastelutilavuudessa [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]

$h_i$  = faasin ominaisentalpia [J/kg].

Energialähteillä ja -nieluilla voidaan huomioida rakenteiden sisäistä energian siirtymistä, mitä ei pystytä huomioimaan suoraan lämmön siirtymismuotojen avulla. Energialähteenä voi toimia esimerkiksi betonin hydratoituminen, joka tuottaa lämpöä. Rakenteiden sisäiset vesijohdot tai tuuletusraon ilmanvaihtuvuus voivat toimia energialähteinä- tai nieluina, riippuen rakenteessa tarkasteltavalla ajanhetkellä vallitsevasta tilanteesta.

### 2.4.3 Kosteuden tasapainoyhtälö

Kosteuden tasapainoyhtälön avulla ratkaistaan tarkasteltavan rakenteen kosteuspitoisuus ja kosteusvirran tiheys muuttuvissa olosuhteissa. Kosteuden tasapainoyhtälön määrittämiseksi laskentatarkasteluissa käytetyssä laskentaohjelmassa on tehty oletukset (Delphin 5 2006):

- Kosteuden siirtymismuodoista on huomioitu vain vesihöyryn diffuusio ja konvektiivinen siirtyminen sekä nestemäisen veden kapillaarinen siirtyminen. Esimerkiksi neste- ja termodiffuusion vaikutus on jätetty huomioimatta.
- Veden neste- ja höyryfaasit ovat tasapainossa (johtaa huokosalipaineen käyttöön ajavana potentiaalina ja tasapainokosteuskäyrien määrittelyssä).
- Suhteellisen kosteuden ja huokosalipaineen välillä pätee Kelvinin lain mukainen yhteys (kaava (2.16))
- Kiinteän aineen vääristymiä tai kosteusmuodonmuutoksia ei ole huomioitu
- Jää ei liiku

Tässä diplomityössä on käytetty kosteuspitoisuuden tasapainoyhtälönä kaavan (2.64) mukaista yhtälöä (Delphin 5 2006).

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_{REV}^{m_{w+v+i}} = -\nabla[\mathbf{g}_{diff} + \mathbf{g}_{cap} + \mathbf{g}_{conv,v}] + \sigma_{REV}^{m_{w+v+i}} \quad (2.64)$$

missä

$\rho_{REV}^{m_{w+v+i}}$  = kosteuspitoisuus tarkastelutilavuudessa [kg/m<sup>3</sup>]

$\mathbf{g}_{diff}$  = diffuusiolla siirtyvän kosteusvirran tiheys [kg/(m<sup>2</sup>·s)]

$\mathbf{g}_{cap}$  = kapillaarisesti siirtyvän kosteusvirran tiheys [kg/(m<sup>2</sup>·s)]

$\mathbf{g}_{conv,v}$  = konvektiivisen kosteusvirran (vesihöyry) tiheys [kg/(m<sup>2</sup>·s)]

$\sigma_{REV}^{m_{w+v+i}}$  = kosteuslähteet ja -nielut tarkastelutilavuudessa [kg/(m<sup>3</sup>·s)].

Diffuusiolla siirtyvän kosteusvirran tiheys lasketaan kaavalla (2.8) ja kapillaarisesti siirtyvän kosteusvirran tiheyden laskentaan käytetään kaavaa (2.17). Ilman mukana konvektiivisesti siirtyvän vesihöyryn virtaustiheys lasketaan kaavalla (2.24).

Kosteuslähteitä ja -nieluja käytetään energialähteiden ja -nielujen tavoin mallintamaan rakenteiden sisäisiä tapahtumia, joita ei pystytä huomioimaan suoraan kosteuden siirtymismuotojen avulla. Kun lämmön yhteydessä betonin hydratoituminen toimii energialähteenä, niin kosteuden yhteydessä betonin hydratoituminen toimii kosteusnieluna, koska hydratoitumisreaktio sitoo vettä. Tuuletusraon ilmanvaihtuvuus voi toimia kosteuden yhteydessä lähde- tai nieluterminä riippuen tarkasteltavalla ajanhetkellä vallitsevasta tilanteesta. Valumisvesien vaikutus haluttuun rakennekerrokseen voidaan mallintaa esimerkiksi kosteuslähteenä.

Mikäli laskentaohjelmalla ei pystytä mallintamaan ilman siirtymistä, voidaan ilmavuotojen aiheuttamaa kosteusrasitusta kuitenkin mallintaa yksinkertaisesti kosteuslähteen avulla. Tällöin rakennekerrokseen asetetaan kosteuslähde, jonka voimakkuus vastaa ilmavuodon aiheuttamaa kosteusrasitusta. (Künzel et al. 2012)



### 3. LASKENTATARKASTELUJEN TOTEUTUS

Rakennusfysikaalisissa laskentatarkasteluissa mallinnetaan lämmön, kosteuden ja ilman siirtymiseen liittyviä ilmiöitä ja arvioidaan niiden vaikutuksia rakennusten ja rakenteiden toimintaan. Laskentatarkastelujen toteutus mallin luomisesta tulosten analysointiin sisältää useiden lopputuloksiin vaikuttavien valintojen tekemistä, minkä takia luotettavat laskentatarkastelut vaativat tekijältään huolellisuutta, ammattitaitoa ja kokemusta.

Laskentatarkastelujen yleinen toteutusperiaate voidaan kuvata seuraavasti (RIL 255-1-2014):

1. Laskentatehtävän ja tarkasteluperiaatteiden määrittely
2. Toimintakriteerien ja niihin liittyvien raja-arvojen valinta
3. Ulko- ja sisäympäristön olosuhteiden määrittely
4. Laskentamenetelmän tai –ohjelman valinta
5. Materiaaliominaisuuksien määrittely
6. Tarkasteltavan rakenteen tai rakennuksen mallintaminen
7. Tarkasteltavien suureiden ratkaiseminen (laskenta)
8. Laskentatulosten analysointi

Tässä luvussa on käsitelty, miten edeltävässä listassa esitetyt kohdat on huomioitu laskennassa ja miten niihin liittyviä valintoja tässä tutkimuksessa on tehty.

#### 3.1 Laskentatehtävän ja tarkasteluperiaatteiden määrittely

Käytännössä laskentatehtävän määrittely lähtee liikkeelle tarpeesta saada lisätietoja jonkin rakenneratkaisun toimivuudesta. Ratkaisun toimivuuden arvioimiseksi on tunnistettava siihen liittyvät rakennusfysikaaliset ilmiöt sekä vaurioitumiseen liittyvät prosessit. Kun tarkasteltava ratkaisu ja siihen liittyvät ilmiöt ovat tiedossa, valitaan tarkasteluperiaatteet eli miten eri tekijät tarkasteluissa huomioidaan ja miten rakenteen toimivuutta arvioidaan. Tarkasteluperiaatteiden määrittely edellyttää tarkastelujen toteuttajalta kokemusta, jotta ratkaisuun vaikuttavat tekijät osataan huomioida oikealla tavalla ja tarkkuudella.

Tarkasteltavat rakennusfysikaaliset ilmiöt ja vaurioitumiseen liittyvät prosessit vaikuttavat olennaisesti laskentaohjelman valintaan. Nykyään saatavilla on laaja valikoima laskentaohjelmia, jotka mahdollistavat stationääriset ja epästationääriset tarkastelut, 1D-, 2D- ja 3D-tarkastelut sekä rakenteiden tai koko rakennuksen tarkastelut. Valitun laskentaohjelman tulee olla yhteensopiva tarkasteltavien rakennusfysikaalisten ilmiöiden ja tarkasteluperiaatteiden kanssa.

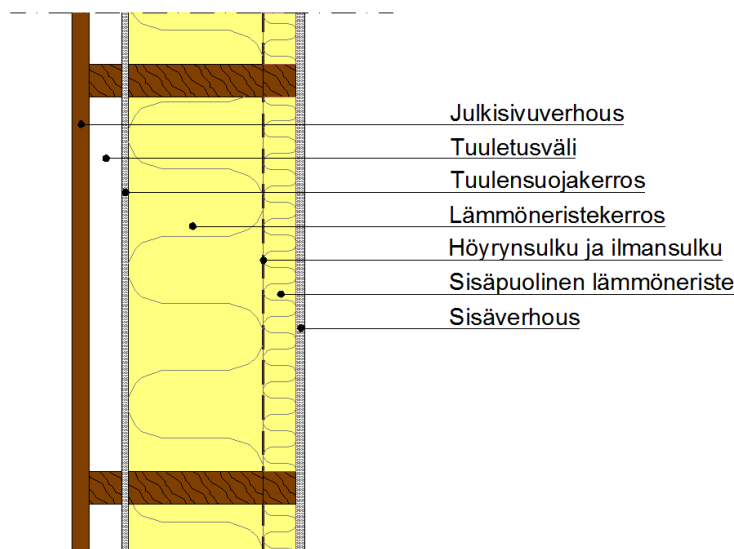
### 3.1.1 Rakennus ja tarkasteltavat rakenteet

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin tuulensuojakipsilevyllisten puurankarunkoisten pientalojen ulkoseinien alapohja-, ulkonurkka- ja sisänurkkaliitosten rakennusfysikaalista toimintaa. Tarkastelujen lähtötietojen määrittämistä varten seinärakenteet jaettiin julkisivumateriaalin perusteella kahteen pääryhmään: puuverhottuihin seinärakenteisiin ja tiiliverhottuihin seinärakenteisiin.

Rakennuspaikasta ja rakennuksesta on tehty seuraavia oletuksia:

- Rakennuspaikan ympäristö on avoin ja tasainen ja sisältää enintään vähäistä kasvillisuutta.
- Rakennus on 2-kerroksinen pientalo, jonka seinärakenteiden korkeus on 6 m.
- Rakennuksen pituus 10 m ja leveys 10 m (1:1).
- Tarkasteltavat rakenteet sijaitsevat rakennuksen kuivissa tiloissa.
- Rakennuksen räystäät on oletettu lyhyiksi ja katto loivaksi.
- Seinärakenteen normaalin ilmansuunta laskentatarkasteluissa:
  - Puuverhotut seinärakenteet:
    - Alapohjaliitokset: pohjoinen
    - Nurkkaliitokset: pohjoinen ja itä
  - Tiiliverhotut seinärakenteet:
    - Alapohjaliitokset: etelä
    - Nurkkaliitokset: etelä ja itä

Pientalojen rakennusmateriaalina puu on ollut aina suosittu, mutta palomääräysten muutosten myötä puun käyttö on yleistymässä myös kerrostalorakentamisessa (Karjalainen 2018). Nykyisin rakennettavista omakotitaloista puurunkoisia on noin 85 %, rivitaloista noin 65 % ja vapaa-ajan asunnoista noin 99 %. Puurankarunkoisia pientaloja tehdään sekä paikalla että elementeistä rakentamalla. (Siikanen 2016) Kuvassa 3.1 on esitetty tyypillisen puurankarunkoisen ulkoseinärakenteen vaakaleikkaus.



**Kuva 3.1.** Tyypillisen puurankarunkoisen ulkoseinän vaakaleikkaus.

Puurankarunkoiset ulkoseinärakenteet koostuvat tyypillisesti seuraavista rakennekerroksista (kerrokset ulkoa sisälle): julkisivuverhous, tuuletusväli, tuulensuojakerros, lämmöneristekerros/runko, ilmansulku- ja höyrinsulkukerros, sisäpuolinen lämmöneriste ja sisäverhous. Rakennekerroksilla on omat tehtävänsä, mutta niiltä vaadittavia ominaisuuksia voidaan myös yhdistää yhteen kerrokseen. Seuraavaksi on esitelty lyhyesti rakennekerroksien tehtäviä ja tutkimuksessa käytettyjä rakennekerroksia. Tarkasteltavat ulkoseinärakenteet on esitetty liitteessä 3.

Ulkoseinän uloin kerros on julkisivuverhous. Julkisivuverhouksen tehtävä on ulkonäöllisten seikkojen lisäksi suojata sisempiä kerroksia rakennuksen ulkopuolisten tekijöiden aiheuttamilta rasituksilta (RIL 250-2011). Tässä tutkimuksessa puuverhottujen seinärakenteiden julkisivuverhouksena on käytetty 23 mm paksua lautaverhousta ja tiiliverhottujen seinärakenteiden julkisivuverhouksena 85 mm paksua muurattua tiiliverhousta.

Ulkoseinän tuuletusvälin tehtävä on poistaa rakenteesta ylimääräinen kosteus tuuletusväliässä virtaavan ilman avulla. Tuuletusväliin siirtyy kosteutta julkisivun läpi kapillaarisesti, diffuusiolla ja vuotovenenä sekä rakennuksen sisältä diffuusion ja konvektion vaikutuksesta. Tuuletusvälin tulee olla yhtenäinen ja riittävän leveä, jotta sen kuivatuskapasiteetti on riittävä. (RIL 250-2011) Suositusten mukaan puuverhotuissa rakenteissa tuuletusvälin leveyden tulee olla vähintään 20 mm ja vähintään 40 mm puurunkoisissa tiiliverhotuissa rakenteissa (RIL 107-2012). Tässä tutkimuksessa tuuletusvälin leveytenä puuverhotuissa rakenteissa on käytetty 25 mm tai 48 mm ja tiiliverhotuissa rakenteissa 40 mm.

Tuulensuojakerroksen tehtävä on estää tuulen aiheuttamat haitalliset ilmavirtaukset lämmöneristekerroksessa. Tuulensuojana voidaan käyttää esimerkiksi kalvo-, levy-, kivi- tai massiivipuurakennetta. Erillinen tuulensuojakerros on tarpeellinen käytettäessä avo- huokoisia lämmöneristeitä. (RIL 107-2012) Rakenteen toiminnan kannalta tuulensuojan

tulisi olla vesihöyryä läpäisevä ja lämpöä eristävä. Liian tiivis tuulensuoja estää kosteuden poistumista rakenteesta ja tuulensuojan lämmöneristyskyky parantaa rakenteen kosteusteknistä toimintaa, kun vaipparakenteiden ulko-osien lämpötila nousee. (RIL 250-2011)

Puurankarakenteissa käytettävän tuulensuojan lämmönvastuksen tulisi olla vähintään  $0,4 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$ , jotta rungon ulkopintaan ei syntyisi homeen kasvulle otollisia olosuhteita. Mikäli tuulensuojan lämmönvastus on pienempi kuin  $0,4 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$ , voidaan rakenteen toimintaa parantaa asentamalla tuulensuojan ulkopuolelle lisäeriste. Heikosti lämpöä eristävän tuulensuojan vesihöyryn läpäisevyyden ( $Z_p$ ) suositeltava maksimiarvo on  $1,0\cdot 10^9 \text{ (m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{Pa)/kg}$  ( $s_d = 0,2 \text{ m}$ ). (RIL 107-2012)

Tämän tutkimuksen tarkasteluissa keskityttiin tuulensuojakipsilevyllisten ulkoseinäarakenteiden tarkasteluihin. Tuulensuojakipsilevyn käyttö pientalorakentamisessa on suositua sen hyvien jäykistävien ominaisuuksien takia. Tuulensuojakipsilevyn käyttöön liittyy kuitenkin riskejä, koska tuulensuojakipsilevyn lämmönvastus ( $0,04 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$ ) on pieni. Mäkitalon (2012) laskentatarkastelut osoittivat, että tuulensuojakipsilevyllinen seinärakenne on toimiva nykyilmastossa, mutta seinärakenteessa havaittiin homehtumisriski tulevaisuuden ilmastossa. Lisäksi tuulensuojakipsilevyn pinnassa käytettävän kartongin on havaittu homehtuvan herkästi (Tuominen et al. 2019).

Tuulensuojakipsilevyllisen ulkoseinäarakenteen toimintaa tutkittiin tuulensuojakipsilevyn ulkopuolisen eristeen kanssa. FRAME-tutkimuksen loppuraportin (Vinha et al. 2013) mukaan avohuokoisella lämmöneristeellä eristetyin tiiliverhotun puurankarunkoisen tuulensuojakipsilevyllisen seinärakenteen ulkopuolisen lämmöneristeen lämmönvastuksen tulisi olla vähintään  $1,94 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$ , jotta rakenne olisi hyväksyttävä tulevaisuuden ilmastossa. Tästä syystä suurimmassa osassa tiiliverhottujen rakenteiden tarkasteluja on käytetty tuulensuojakipsilevyn ulkopuolella vähintään 75 mm paksua mineraalivillakerrosta.

Lämmöneristekerroksen tehtävä on estää lämmön siirtyminen rakennuksen vaipan läpi. Rakennusten energiatehokkuusvaatimusten tiukentumisen seurauksena lämmöneristekerrosten paksuudet ovat kasvaneet viime vuosikymmeninä. Tutkimustulokset vaipparakenteiden lämmöneristykseen lisäyksen vaikutuksista rakenteiden kosteustekniseen toimintaan ovat olleet ristiriitaisia. VTT:n (Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy) tutkimuksissa (Viitanen et al. 2008, Ojanen et al. 2016) on todettu, että rakenteiden kosteustekninen toimivuus ei aseta rajoitteita lämmöneristystason parantamiselle. Toisaalta tutkimukset (Vinha et al. 2013, Pihelo et al. 2016) ovat kuitenkin osoittaneet, että vaipparakenteiden lämmönläpäisykertoimen pienentäminen aiheuttaa ongelmia vaipparakenteen ulko-osiin.

Rakennuksen energiatehokkuusvaatimusten täyttyminen osoitetaan energiaselvityksellä. Ympäristöministeriön asetuksessa uuden rakennuksen energiatehokkuudesta (YMa 1010/2017) määrätään, että rakennuksen energiatehokkuudelle asetettujen vaatimusten

täytyminen voidaan osoittaa vaihtoehtoisesti rakenteellisella energiatehokkuudella, jolloin rakennusosien lämmönläpäisykertoimien vertailuarvoille, rakennuksen ilmatiiveydelle sekä rakennuksen ilmanvaihto- ja lämmitysjärjestelmälle asetetaan tiukempia vaatimuksia. Energiaselvityksen mukaisessa energiatehokkuuden laskennassa ulkoseinärakenteen lämmönläpäisykertoimen vertailuarvona tulee käyttää  $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , kun taas rakenteellisen energiatehokkuusvaatimuksen täyttävän ulkoseinärakenteen vertailuarvo on  $0,12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  (rakennuksen käyttötarkoituusluokka 1). (YMa 1010/2017)

Tässä tutkimuksessa ulkoseinärakenteen eristeenä on käytetty mineraalivillaa, joka on avohuokoinen eristemateriaali. Nurkkaliitosten toimintaa on tarkasteltu sekä normaalin lämmönläpäisykertoimen vertailuarvon että rakenteellisen energiatehokkuusvaatimuksen täyttävillä seinärakenteilla.

Ilmansulkukerroksen tehtävä on muodostaa rakennuksen vaippaan tiivis ja yhtenäinen kerros, joka estää ilmavirtauksen rakenteen läpi. Vastaavasti höyrynsulkukerroksen tarkoitus on estää sisäilman vesihöyryn siirtyminen sisäilmasta rakenteisiin. (RIL 107-2012) Höyrynsulkukerros sijoitetaan rakenteen sisäpinnasta lukien 50 – 75 mm syvyydelle. Syvyys voi olla kuitenkin enintään  $\frac{1}{4}$  eristekerroksen paksuudesta (RIL 249-2015). Rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta höyrynsulkukerros olisi parasta sijoittaa mahdollisimman lähelle rakenteen sisäpintaa, mutta ilmatiiveyden kannalta sisäpuolisen lämmöneristyksen käyttö on suositeltavaa.

Höyryn- ja ilmansulkukerroksena voidaan käyttää kalvo-, levy-, kivi- tai massiivipuura-kennettä. Yleensä höyryn- ja ilmansulkukerroksena toimii sama ainekerros. Avohuokoisilla eristeillä eristettyjen rakenteiden höyrynsulun vesihöyrynvastuksen suositusarvo riippuu tuulensuojan ominaisuuksista. Tuulensuojakipsilevyllisten rakenteiden höyrynsulun ja tuulensuojan vesihöyrynvastuksien suhteen  $Z_{hs}/Z_{ts}$  tulee olla vähintään 30. (RIL 107-2012) Tässä tutkimuksessa höyrynsulkuna käytettiin pääasiassa 0,2 mm paksua muovikalvoa ja joissain tapauksissa 30 mm paksua polyuretaanilevyä.

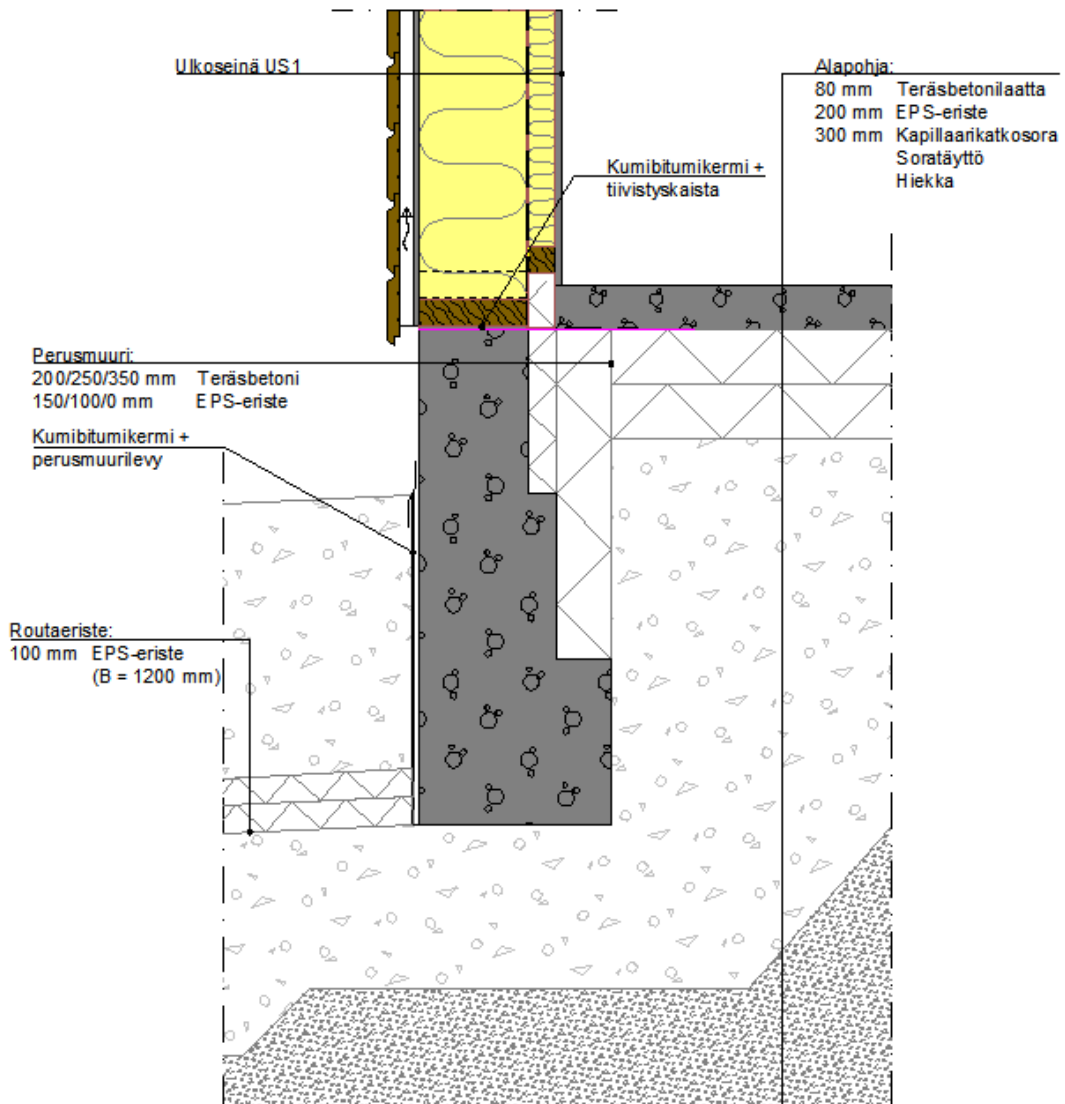
Sisäpuolinen eristekerros sijoitetaan höyryn- ja ilmansulkukerrosten sisäpuolelle. Sisäpuolisen eristekerroksen pääasiallinen tarkoitus on mahdollistaa sähköputkitusten ja muiden asennusten toteuttaminen siten, että höyryn- ja ilmansulkukerrosta ei tarvitse lävistää. Lisäksi se parantaa rakenteen lämmöneristävyyttä. (RIL 250-2011) Tässä tutkimuksessa sisäpuolisen lämmöneristekerroksen paksuutena on käytetty sisäpuolisen koolauksen paksuutta 48 mm.

Sisäverhouksen tehtävä on suojata rakennetta kulumiselta ja sisäpuolisilta rasituksilta (RIL 250-2011). Tarkasteluissa sisäverhouksena käytettiin 13 mm paksua kipsilevyä.

## Alapohjaliitokset

Puurankarunkoiset seinärakenteet liittyvät perustuksiin alaohjauspuun välityksellä. Alaohjauspuun tehtävä on välittää seinärakenteen kuormat perustuksille ja helpottaa seinärakenteen asennusta elementtirakentamisessa. Alaohjauspuu saatetaan asentaa työmaalla paikalleen paljon ennen seinän rakennusta, jolloin alaohjauspuu altistuu ulkoilman olosuhteille. Ulkoilman olosuhteille altistuneen alaohjauspuun kosteuspitoisuus voi nousta hyvin korkeaksi ja liitosdetaljista riippuen alaohjauspuun kuivuminen voi olla hidasta.

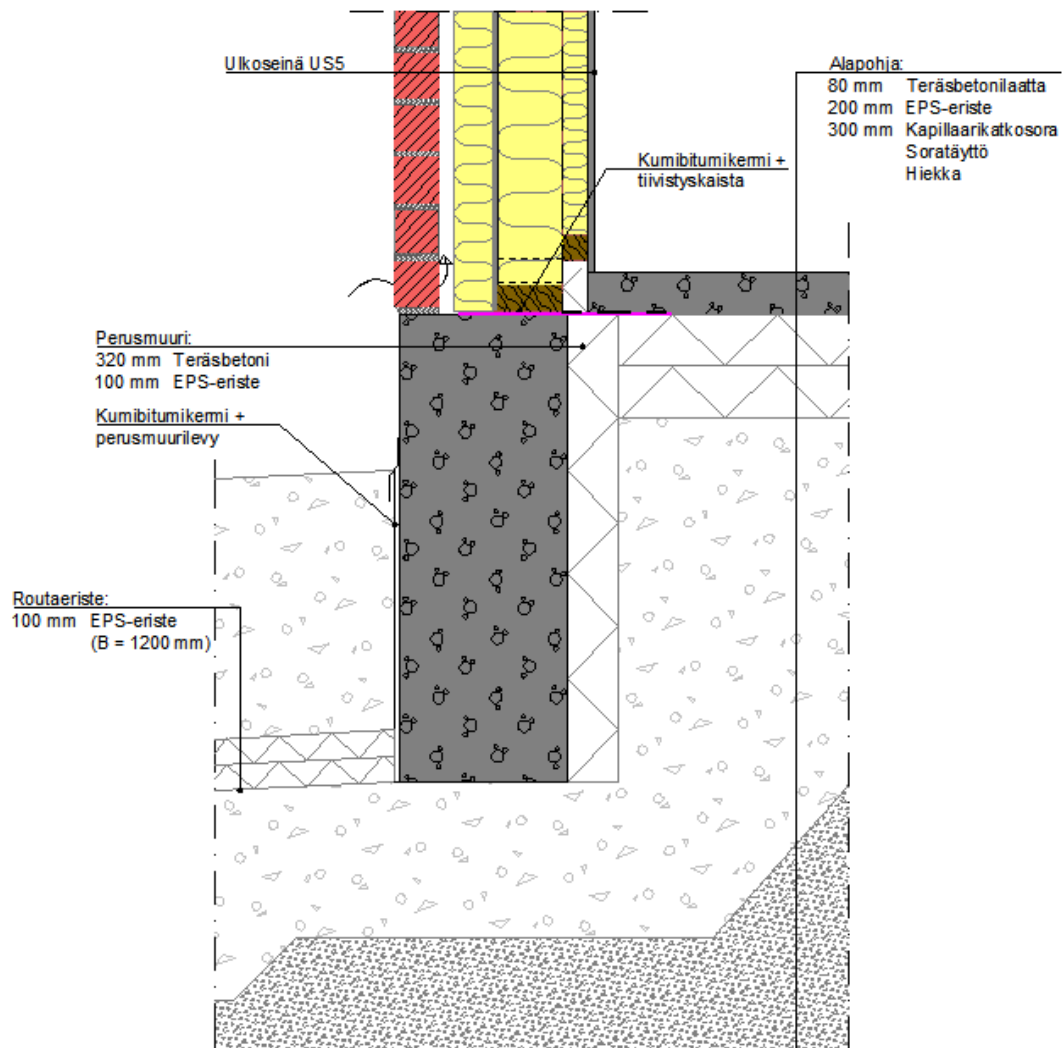
Alaohjauspuun korkea kosteuspitoisuus ja perusmuurin viilentävä vaikutus lisäävät alaohjauspuun homehtumisriskiä huomattavasti. Tässä tutkimuksessa selvitettiin miten erilaiset alaohjauspuun lämmöneristysratkaisut vaikuttavat alaohjauspuun lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan. Kuvassa 3.2 on esitetty tutkimuksessa tarkastellun puuverhotun puurankarunkoisien alapohjaliitoksen perustapauksen rakenneleikkaus.



**Kuva 3.2.** Puuverhotun seinärakenteen alapohjaliitoksen perusrakenne.

Alaohjauspuu on erotettu perusmuurista kosteuden siirtymisen katkaisevalla kumibitumikermillä, joka on ulotettu 300 mm alapohjalaatan alle. Seinän höyrünsulkumuovi on käännetty kumibitumikermin ja lattian betonilaatan väliin ja limitetty 150 mm kumibitumikermin kanssa. Perusmuurin ja maan pinnan välinen etäisyys on 300 mm ja perusmuurin korkeus 900 mm. Perusmuurin ja alapohjan alapuolella on käytetty kapillaarisen nousun katkaisevaa 300 mm paksua sorakerrosta.

Kuvassa 3.3 on esitetty tutkimuksessa tarkastellun tiiliverhotun seinärakenteen alapohjaliitoksen rakenneleikkaus.



**Kuva 3.3.** Tiiliverhotun seinärakenteen alapohjaliitoksen perusrakenne.

Tiiliverhotussa rakenteessa alaohjauspuun ja perusmuurin välinen kumibitumikermin on jatkettu tiilimuurauksen ja perusmuurin väliin, jotta kosteus ei siirry perusmuurista tiilimuuraukseen. Vaikka eristehalkaistu perusmuuri on tiiliverhottujen seinärakenteiden yleinen rakenneratkaisu, sitä ei tässä tutkimuksessa käytetty, koska se olisi pidentänyt laskenta-aikaa merkittävästi.

Paikallarakennettujen ulkoseinien alapohjaliitosten lisäksi tarkasteluissa huomioitiin elementtirakentamisen alapohjaliitosratkaisut lisäämällä alaohjauspuun päälle alajuoksu. Alajuoksun ja alaohjauspuun välissä käytettiin villakaistaa liitoksen ilmatiiveyden parantamiseksi.

Alaohjauspuun olosuhteisiin vaikutettiin lisäämällä lämmöneristystä alaohjauspuun ulkopuolelle sekä alaohjauspuun ja perusmuurin väliin. Tutkittuja eristemateriaaleja olivat paisutettu polystyreeni (engl. expanded polystyrene, EPS), suulakepuristettu polystyreeni (engl. extruded polystyrene, XPS) ja bitumoitu puukuitulevy.

Alapohjaliitosten kosteusteknistä toimintaa tarkasteltiin ideaalisesti toteutetuilla, ilma- vuodottomilla rakennemalleilla, vaikka tutkimuksissa (Vinha et al. 2005b) on havaittu puutteita alapohjaliitosten tiiveydessä ja alapohjaliitosten läheisyydessä on usein myös vuotojen kannalta riskialttiita sähköläpivientejä. Alapohjaliitoksen kohdalla rakennuksen vaipan yli vallitsee tyypillisesti sisäpuolinen alipaine, joten sisäilman kosteutta ei juurikaan pääse siirtymään rakenteeseen ilmavirtauksen mukana. Toisaalta ilmavirtaus kuljettaa mukanaan liitoksessa esiintyviä mikrobeja sisäilmaan, joten homeenkasvua liitoksen alueella ei tule sallia.

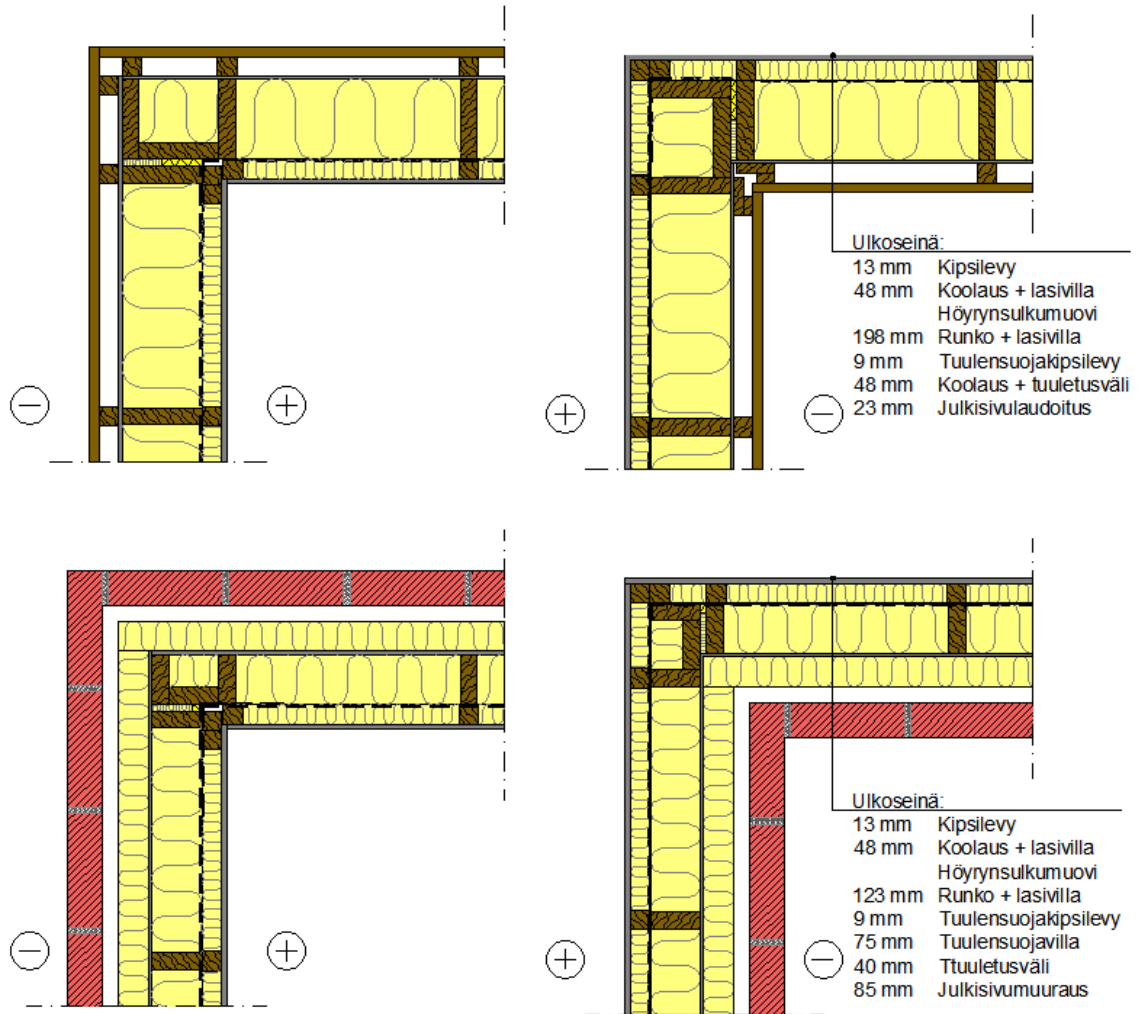
### **Ulkoseinäliitokset**

Risteävien seinien kiinnityksen takia ulkoseinien nurkkaliitoksissa on usein enemmän runkotolppia suoraan seinään verrattuna. Rakennuksen nurkkiin saatetaan myös tukea rakenneosia, kuten esimerkiksi katosten palkkeja, jolloin nurkassa tarvitaan useampia runkotolppia. Nurkkaliitoksen runkotolpat aiheuttavat rakenteeseen kylmäsillan, minkä seurauksena nurkan olosuhteen poikkeavat suoran seinän olosuhteista. Tämän tutkimuksen laskentatarkasteluilla pyritään selvittämään nurkkaliitosten toimintaa verrattuna suorien seinien toimintaan.

Rungon sisäpuolisen koolauksen tehtävä on mahdollistaa sisäpuolisen eristyksen asennus, sähköasennukset ja sisäverhouslevyn kiinnitys. Seinien nurkkaliitoksissa sisäpuolista koolautusta saatetaan myös käyttää risteävien seinien kuormien siirtämiseen. Nurkkaliitoksessa sisäpuolisten koolauspuiden määrä ja sijainti vaihtelevat toteuttajasta ja muista rakenteista riippuen. Tyypillisesti sisäpuolinen koolaus on pystysuuntainen, jotta jäykistys ja sähköputkitukset voidaan toteuttaa helpommin.

Kuvassa 3.4 on esitetty puu- ja tiiliverhottujen ulko- ja sisänurkkien tarkastelujen perustapaukset. Nurkkaliitoksissa risteävien seinien saumassa on käytetty 100 mm leveää villakaistaa. Liitos on tiivistetty täyttämällä villakaistan sisäpuolelle jäävä rako polyuretaanivaahdolla.





**Kuva 3.4.** Puuverhottujen (ylhäällä) ja tiiliverhottujen (alhaalla) ulkoseinien nurkkaliitosten perustapaukset.

Tutkimuksessa selvitettiin, miten höyrynsulun sijainnin ja materiaalin muutokset vaikuttavat nurkkaliitosten kosteustekniseen toimintaan. Kenttätutkimuksissa (Vinha et al. 2005b) on havaittu, että rankarunkoiset rakennukset, joissa höyrynsulkuna on käytetty polyuretaanilevyä (PUR), olivat ilmatiiveydeltään parempia kuin rakennukset, joissa höyrynsulkuna oli käytetty muovikalvoa. Perustapauksessa höyrynsulkuna käytettiin rungon sisäpintaan asennettua muovikalvoa. Vertailutapauksissa höyrynsulkumuovi asennettiin sisäkoolauksen sisäpintaan tai käytettiin höyrynsulkumuovin ja sisäpuolisen eristyksen tilalla 30 mm polyuretaanilevyä.

Tutkimuksessa tarkasteltiin nurkkaliitoksen käyttäytymistä, kun tuulensuojakipsilevyn ulkopuolelle lisättiin eristettä tai muutettiin rungon eristepaksuutta. Lisäksi tarkasteluissa selvitettiin nurkan tolpiteksen ja rungon sisäpuolisen koolauksen vaikutuksia nurkkaliitosten toimintaan puuverhotuilla seinärakenteilla.

Ulko- ja sisänurkkaliitosten toimintaa tarkasteltiin ideaalisesti toteutetun rakenteen lisäksi virheellistä asennustyötä ja vauriotilannetta kuvaavilla vuototarkasteluilla. Vuototarkasteluihin tulee valita rakenteen kriittisin kohta (RIL 255-1-2014), joten ulkoseinien liitoksia tarkasteltiin rakennuksen yläosassa, koska rakenteen yläosassa vallitsee suurin ylipaine ja tutkimuksissa (Vinha et al. 2005b) on havaittu, että ilmavuotoja esiintyy eniten yläpohja-seinäliitoksessa.

### **3.1.2 Rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointi**

Ympäristöministeriön asetuksessa rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta (YMa 782/2017) määrätään, että suunnittelijan tulee tehtäviensä mukaisesti huolehtia siitä, että rakennus käyttötarkoituksensa mukaisesti täyttää sen kosteustekniselle toimivuudelle asetetut olennaiset tekniset vaatimukset. Rakenteiden tulee olla sisäiset ja ulkoiset kosteusrasitukset huomioon ottaen kosteusteknisesti toimivia teknisen käyttöiän ajan (YMa 782/2017). Rakenteiden kosteusteknisen toiminnan tarkasteluissa kosteusteknisen toimivuuden teknisten vaatimusten sekä sisäisten ja ulkoisten kosteusrasitusten määrittäminen ovat suunnittelijan vastuulla.

Rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointia voidaan verrata rakenteiden kestävyiden ja kantavuuden mitoitukseen. Rakenteiden kosteusteknisen toiminnan ja rakenteiden kestävyiden tarkasteluissa tunnetaan yleensä hyvin ilmiöt, materiaaliominaisuudet ja vaurioitumismekanismit. Lämmön- ja kosteuden siirtymisilmiöt ovat tosin rakenteiden mekaniikkaan verrattuna monimutkaisempia, koska ne ovat kytkeytyneet toisiinsa. Lisäksi kosteusteknisen toiminnan tarkasteluissa ilmiöitä tarkastellaan usein ajasta riippuvina, kun rakenteiden kestävyiden tarkasteluissa riittää, että tarkastellaan stationääritilannetta.

Rakenteiden kestävyiden tarkasteluissa käytetään materiaaliominaisuuksien varmuuskertoimia, joilla otetaan huomioon laatupoikkeamat. Kosteusteknisissä tarkasteluissa materiaaliominaisuuksien varmuuskerrointa ei voida käyttää, koska vaurioitumismekanismit ovat luonteeltaan erilaisia. Kosteusteknisen toiminnan tarkasteluissa varmuus joudutaan ottamaan huomioon muilla tavoin.

Rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysoinnin ja rakenteiden kestävyiden mitoituksen välillä esiintyy merkittävä ero myös rasituksissa. Rakenteiden kestävyiden mitoituksessa rasitukset ovat yksinkertaisia ja niiden yhteisvaikutus tunnetaan hyvin, kun taas kosteusteknisen toiminnan tarkasteluissa on useita erityyppisiä rasituksia eikä niiden yhteisvaikutusta tunneta. Koska kosteusteknisissä tarkasteluissa rasitusten yhteisvaikutusta ei tunneta, ei rasitustenkaan yhteydessä pystytä käyttämään varmuuskertoimia.

Laskentatarkasteluja varten TTY:llä on kehitetty menetelmä rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointiin. Menetelmä koostuu tarkasteluperiaatteista, joilla pystytään arvi-

oimaan erilaisten vaipparakenteiden toimivuutta. Menetelmän mukaan rakenteiden toimintaa arvioidaan toimintakriteerien avulla. Laskennassa tulee käyttää laskentaohjelmaa, jolla pystytään ottamaan huomioon toimintakriteerien kannalta oleelliset lämmön, kosteuden ja ilman siirtymisilmiöt sekä rakennusfysikaaliset materiaaliominaisuudet. Rakenteiden ulko- ja sisäympäristön olosuhteen valitaan toimintakriteerien kannalta kriittisiksi. (Vinha et al. 2013) Kuvassa 3.5 on esitetty rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmän osat.



**Kuva 3.5.** Rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmän osat. (Vinha et al. 2013)

Rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmän osia ja niiden keskeisimpiä tekijöitä on käsitelty luvuissa 3.2-3.5. Kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmän tärkein osa on ulkoympäristön olosuhteita kuvaavat rakennusfysikaaliset testivuodet. Testivuosien avulla varmistetaan siitä, että vaipparakenteiden toimintaa tarkastellaan kriittisissä ulkoympäristön olosuhteissa.

### 3.2 Toimintakriteerit ja niihin liittyvät raja-arvot

Rakenteiden ja rakennusten toimintaa arvioidaan toimintakriteerien avulla. Toimintakriteerit voidaan jakaa rakennuksen kokonaistoimintaa ja sisäilmastoa kuvaaviin, rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa kuvaaviin sekä rakenteiden ja materiaalien säilyvyyttä kuvaaviin kriteereihin. Toimintakriteereille määritetään mitattavat tai laskennallisesti määritettävät suureet, joita verrataan toimintakriteereille määritettyihin raja-arvoihin. Rakennusfysikaalisessa suunnittelussa toimintakriteerien raja-arvojen valinnalla voidaan soveltaa varmuuskerroin ajattelua (RIL 255-1-2014).

Tässä tutkimuksessa alapohja- ja nurkkaliitosten toimintakriteerinä käytettiin homehtumisriskiä. Homehtumisriskin arviointi perustuu Suomalaiseen homemalliin, jossa lasketaan tarkastelupisteen homeindeksiä  $M$  [-] lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja ajan funktiona. Homeindeksi kuvaa homekasvuston peittävyttä materiaalin pinnalla. (Ojanen et al. 2010) Tuulensuojalevyn sisäpuolisissa rakennekerroksissa homeenkasvu ei ole hy-

väksyttävää, joten homeindeksin raja-arvoksi valittiin, että tarkasteluajanjaksolla homeindeksin maksimiarvo näissä rakennekerroksissa ei saa ylittää arvoa 1,0. Suomalainen homemalli on esitelty tarkemmin seuraavassa alaluvussa ja homeindeksin raja-arvon valintaan liittyvät perusteet lähteessä (Vinha et al. 2013). Alapohjaliitosten toimivuutta arvioitiin homehtumisriskin lisäksi rakennusaikaisen kosteuden kuivumispotentialin perusteella.

### 3.2.1 Suomalainen homemalli

Homeenkasvun laskennallista mallinnusta on alettu kehittämään VTT:llä 1980-luvulla. Alkuperäinen homemalli arvioi homeen kasvua puumateriaalien pinnalla muuttuvissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa (Hukka & Viitanen 1999). Homemallia kehitettiin 2000-luvulla kattamaan laajempi joukko rakennusmateriaaleja ja kehitystyön tuloksena julkaistiin VTT-TTY homemalli, josta käytetään nykyisin nimeä Suomalainen homemalli (Ojanen et al. 2010).

Suomalaisessa homemallissa homeen kasvua kuvataan homeindeksillä  $M$  [-]. Homeindeksin arvo vaihtelee välillä 0 - 6, riippuen homekasvuston pinnan peittävydestä. Homeindeksin määritelmät on kuvattu taulukossa 3.1. Suomalainen homemalli ei ota kantaa homesienten lajiin tai toksisuuteen. (Ojanen et al. 2010)

**Taulukko 3.1.** Homeindeksin luokkien määritelmät. (Ojanen et al. 2010)

Homeindeksi $M$	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 (silmillä) Yli 50 % peitto alasta (mikroskoopilla)
5	Runsas silmin havaittava kasvu	Yli 50 % peitto alasta (silmillä)
6	Erittäin runsas kasvu	Lähes 100 % peitto, tiivis kasvusto

Suomalaisessa homemallissa materiaalit on jaettu taulukon 3.2 mukaisiin homehtumisherkkyyssluokkiin (HHL).

**Taulukko 3.2.** *Materiaalit homehtumisherkkyyssluokittain. (Ojanen et al. 2010)*

Homehtumisherkkyyssluokka	Rakennusmateriaalit
HHL1 Hyvin herkkä	Karkeasahattu ja mitallistettu puutavara (mänty ja kuusi), höylätty mänty, käsittelemätön puukuitulevy, (kipsilevy**)
HHL2 Herkkä	Höylätty kuusi, paperipohjaiset tuotteet ja kalvot, kipsilevy, vaneri, lastulevy, bitumoidut/käsitellyt huokoiset puukuitulevyt
HHL3 Kohtalaisen kestävä	Mineraalivillat, muovipohjaiset materiaalit, kevytbetoni*, kevytsorabetoni, karbonatisoitunut vanha betoni, sementtipohjaiset tuotteet, tiili
HHL4 Kestävä	Alkalinen uusi betoni, lasi ja metallit, tehokkaista home-suoja-aineita sisältävät materiaalit

\* Kevytbetoni kuuluu homehtumisominaisuuksiltaan kahteen eri homehtumisherkkyyssluokkaan. Homeen kasvunopeus vastaa homehtumisherkkyyssluokka HHL2, mutta homeindeksin maksimiarvo jää homehtumisherkkyyssluokan HHL3 tasolle.

\*\* TTY:llä tehtyjen viimeaikaisten homehtumiskokeiden perusteella on olemassa viitteitä siitä, että tavanomainen tuulensuojakipsilevy homehtuu voimakkaammin verrattuna homehtumisherkkyyssluokan 2 materiaalille määritettyihin laskennallisiin arvoihin (Tuominen et al. 2019).

Homesienet vaativat kasvaakseen suotuisat lämpötila- ja kosteusolosuhteet, ravinteita sekä happea. Lisäksi homeen kasvuun vaikuttavat otollisten olosuhteiden altistusaika sekä materiaalin pinnan laatu.

Suomalaisessa homemallissa tarkasteltavan pinnan lämpötilan  $T$  tulee olla välillä 0 - 50 °C, jotta homeen kasvun katsotaan olevan mahdollista. Kosteusolosuhteet ovat homeen kasvulle otolliset, kun materiaalin pinnan suhteellisen kosteus on homehtumisherkkyyssluokan mukaista vähimmäisarvoa  $RH_{min}$  [%] (taulukko 3.3) sekä suhteellisen kosteuden kriittistä alaraja-arvoa  $RH_{crit}$  [%] korkeampi (kaava (3.1)) (Ojanen et al. 2010).

$$RH_{crit} = \begin{cases} -0,00267 \cdot T^3 + 0,160 \cdot T^2 - 3,13 \cdot T + 100, & \text{kun } T \leq 20 \text{ °C} \\ RH_{min}, & \text{kun } T > 20 \text{ °C} \end{cases} \quad (3.1)$$

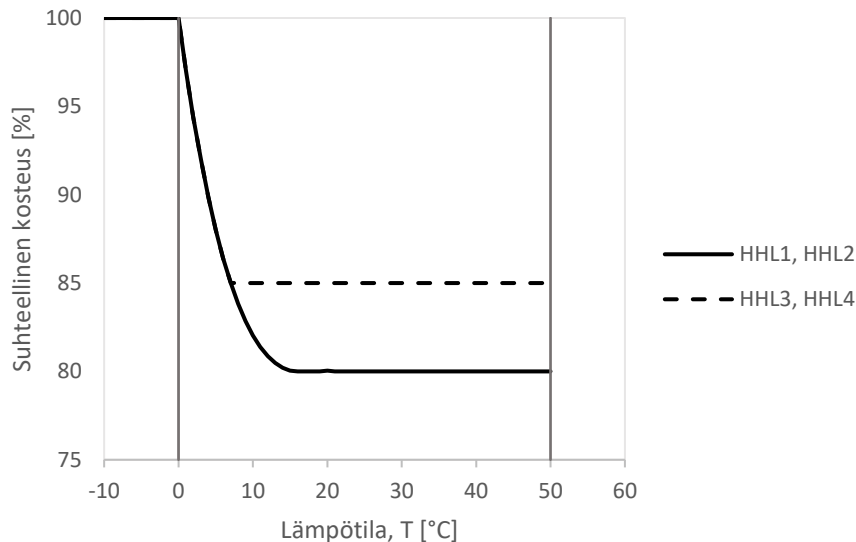
missä

$RH_{crit}$  = suhteellisen kosteuden kriittinen raja-arvo [%]

$T$  = tarkasteltavan pinnan lämpötila [°C]

$RH_{min}$  = homehtumisherkkyyssluokan mukainen suhteellisen kosteuden vähimmäisarvo [%] (taulukko 3.3).

Kuvassa 3.6 on esitetty homeenkasvun kriittiset raja-arvokäyrät homehtumisherkkyyssuokittain. Olosuhteet ovat homeenkasvulle otolliset raja-arvokäyrän yläpuolella ja epäsuotuisat raja-arvokäyrän alapuolella.



**Kuva 3.6.** Homeenkasvun kriittiset raja-arvot

Kun olosuhteet ovat homeen kasvulle otolliset, homeindeksin kasvunopeus lasketaan kaavalla (3.2). Homeindeksin kasvunopeuden laskennassa aika-askeleena  $t$  [h] käytetään yhtä tuntia. (Ojanen et al. 2010)

$$\frac{dM}{dt} = \frac{1}{7 \cdot \exp(-0,68 \cdot \ln(T) - 13,9 \cdot \ln(RH) + 66,02)} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{1}{24} \quad (3.2)$$

missä

$M$  = homeindeksi [-]

$T$  = lämpötila [°C]

$RH$  = tarkasteltavan pinnan suhteellinen kosteus [%]

$k_1, k_2$  = materiaalin homehtumisherkkyyssuokan mukaisia homeindeksin kasvunopeutta sääteleviä kertoimia [-].

Kerroin  $k_1$  vaikuttaa homeindeksin kasvunopeuteen homeen kasvun alkuvaiheessa ja kerroin  $k_2$  homeindeksin kasvunopeuteen homeindeksin lähestyessä olosuhteiden mukaista homeindeksin maksimiarvoa  $M_{max}$ . Kertoimen  $k_1$  arvot on esitetty taulukossa 3.33.3. Kertoimen  $k_2$  arvo määritetään kaavalla (Ojanen et al. 2010)

$$k_2 = \max(1 - \exp(2,3 \cdot (M - M_{max})), 0) \quad (3.3)$$

missä

$M$  = homeindeksin arvo aika-askeleen alussa [-]

$M_{max}$  = homeindeksin maksimiarvo [-].

Homeindeksin maksimiarvo  $M_{max}$  [-] riippuu tarkasteltavan pinnan homehtumisherkkyyssluokasta ja suhteellisesta kosteudesta. Homeindeksin maksimiarvo määritetään kaavalla (3.4). (Ojanen et al. 2010)

$$M_{max} = A + B \cdot \left( \frac{RH_{crit} - RH}{RH_{crit} - 100} \right) - C \cdot \left( \frac{RH_{crit} - RH}{RH_{crit} - 100} \right)^2 \quad (3.4)$$

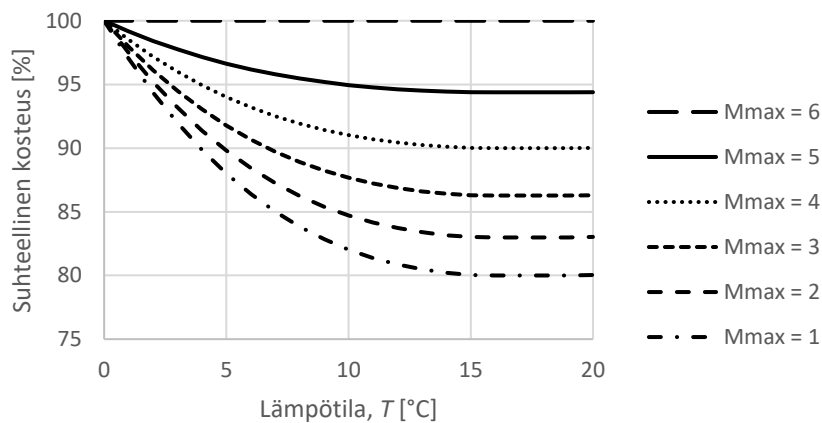
missä

$A, B, C$  = tarkasteltavan pinnan homehtumisherkkyyssluokan mukaisia homeindeksin maksimiarvoa sääteleviä kertoimia [-]

$RH_{crit}$  = tarkasteltavan pinnan kriittinen suhteellinen kosteus aika-askeleella [%]

$RH$  = tarkasteltavan pinnan suhteellinen kosteus [%].

Kuvassa 3.7 on esitetty homeindeksin maksimiarvojen saavuttamiseksi vaadittavat suhteelliset kosteudet lämpötilan funktiona homehtumisherkkyyssluokassa 1.



**Kuva 3.7.** Homeindeksin maksimiarvojen saavuttamiseen vaadittava suhteellinen kosteus lämpötilan funktiona homehtumisherkkyyssluokassa 1.

Taulukossa 3.3 on esitetty homeindeksin laskentaan käytettävät kertoimet ja suhteellisen kosteuden vähimmäisarvot.

**Taulukko 3.3.** Homehtumisherkkyyssluokkien mukaiset kertoimet ja suhteellisen kosteuden vähimmäisarvot. (Ojanen et al. 2010)

Homehtumisherkkyyssluokka	$k_1$		$k_2 (M_{max})$			$RH_{min}$
	$M < 1$	$M \geq 1$	A	B	C	
HHL1 Hyvin herkkä	1	2	1	7	2	80
HHL2 Herkkä	0,578	0,386	0,3	6	1	80
HHL3 Kohtalaisen kestävä	0,072	0,097	0	5	1,5	85
HHL4 Kestävä	0,033	0,014	0	3	1	85

Kun tarkasteltavan pinnan olosuhteet eivät ole kriittisellä alueella, home taantuu eli homeindeksin arvo pienenee. Home ei taannu tasaisesti olosuhteiden muututtua homeen kasvun kannalta epäsuotuisiksi. Homeen taantumista kuvataan kaavalla (3.5). Kuten homeindeksin kasvunopeuden laskennassa, myös taantumisnopeuden laskennassa käytetään aika-askeleena yhtä tuntia. (Ojanen et al. 2010)

$$\frac{dM}{dt} = C_d \cdot \begin{cases} -0,032 \cdot \frac{1}{24} & , \text{ kun } t - t_1 < 6 \text{ h} \\ 0 & , \text{ kun } 6 \text{ h} \leq t - t_1 < 24 \text{ h} \\ -0,016 \cdot \frac{1}{24} & , \text{ kun } t - t_1 \geq 24 \text{ h} \end{cases} \quad (3.5)$$

missä

$M$  = homeindeksi [-]

$t$  = aika-askele [h]

$C_d$  = homeen taantumakerroin [-]

$t$  = aika tunteina tarkastelun alusta [h]

$t_1$  = homeen taantumisen viimeisin käynnistymisajankohta laskennan alusta [h].

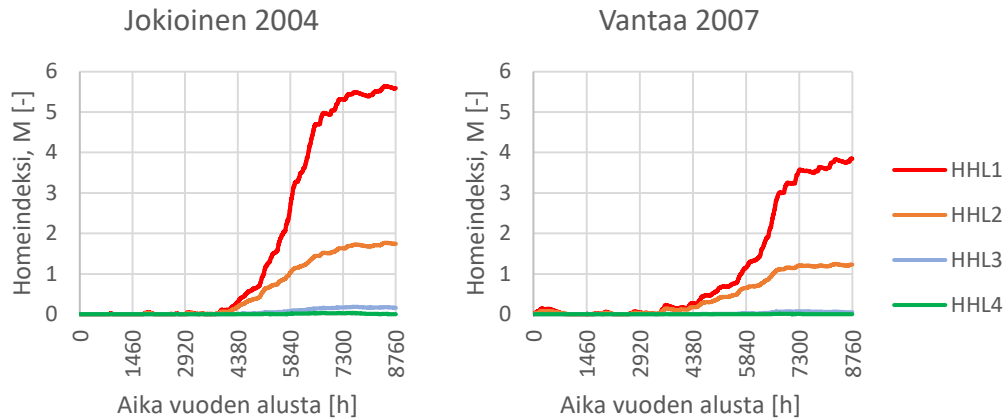
Kaavasta (3.5) nähdään, että home taantuu ensimmäisen 6 tunnin aikana nopeammin kuin vuorokauden kuluttua homeen taantumisen käynnistymisajankohdasta. 6 tunnin kuluttua taantumisen käynnistymisestä taantuminen pysähtyy. Tällä pyritään ottamaan huomioon tiheä suotuisten ja epäsuotuisten olosuhteiden vaihtelu (Ojanen et al. 2010). Kaavassa (3.5) esiintyvän homeen taantumakerroimen  $C_d$  [-] arvot homehtumisherkkyyssluokittain on esitetty taulukossa 3.4.

**Taulukko 3.4.** Homehtumisherkkyyssluokkia tyypillisesti vastaavat homeen taantumaluokat sekä taantumakerroimet. (Ojanen et al. 2010)

Homehtumisherkkyyssluokka	Homeenkasvun taantumaluokka	Taantumakerroin $C_d$
HHL1 Hyvin herkkä	HTL2 Merkittävä taantuma	0,5
HHL2 Herkkä	HTL3 Kohtalainen taantuma	0,25
HHL3 Kohtalaisen kestävä	HTL4 Vähäinen taantuma	0,1
HHL4 Kestävä	HTL4 Vähäinen taantuma	0,1

Kuvassa 3.8 on esitetty homeindeksin kehittymistä eri homehtumisherkkyyssluokissa nykyilmaston rakennusfysikaalisten testivuosiin (Jokioinen 2004 ja Vantaa 2007) ulkoilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden avulla laskettuna.





**Kuva 3.8.** Homeindeksin kehittyminen Jokioisten vuoden 2004 (vasemmalla) ja Vantaan vuoden 2007 (oikealla) ulkoilman olosuhteissa eri homehtumisherkkyyssluokissa.

Kuvasta 3.8 havaitaan, että Jokioisten vuoden 2004 ulkoilman olosuhteissa homeindeksin arvo nousee Vantaan vuoden 2007 ulkoilman olosuhteissa laskettua homeindeksiä korkeammalle. Homeet vaativat kuitenkin kasvaakseen aina jonkin materiaalipinnan, joten homeindeksin tarkastelu ulkoilman lämpötila ja suhteellisen kosteuden avulla antaa puutteellisen kuvan vuoden synnyttämästä homehtumisriskistä. Materiaalipinnan lämpötilaan ja suhteelliseen kosteuteen vaikuttavat ulkoilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden lisäksi myös auringon säteily, pitkäaaltoinen säteily ja viistosade.

### 3.3 Sisä- ja ulkoympäristön olosuhteet

Rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisten laskentatarkastelujen toteuttamiseksi on määriteltävä sisä- ja ulkoympäristön rakenteille aiheuttamat rasitukset. Luotettavien laskentatarkastelujen kannalta on oleellista, että rasitukset on valittu asetettujen toimintakriteerien kannalta kriittisesti (RIL 255-1-2014).

Rasitusten määrittämisessä on käytetty kansainvälisen energiajärjestön (engl. International Energy Agency, IEA) annex 24:ssä antamaa suositusta, jonka mukaan rakenteiden rakennusfysikaalisten kuormien määrittelyssä käytetään 10 % kriittisyystasoa. 10 % kriittisyystaso tarkoittaa sitä, että rasitukset ovat vähemmän kriittisiä vähintään 90 % tapauksista. (Sanders 1996) Rakenteiden kantavuuden mitoittamiseen verrattuna kriittisyystaso on alhainen. Alhaisemman kriittisyystason käyttöä on perusteltu rakennusfysikaalisten vaurioiden vähäisemmällä seurauksilla kantavien rakenteiden vaurioihin verrattuna. (Vinha et al. 2005b)

Tämän diplomityön laskentatarkastelujen sisäilman olosuhteet on valittu tutkimusten (Vinha et al. 2005b; Asuinrakennusten ilmanpitävyys, sisäilmasto ja energiatalous. (2009)) perusteella määritettyjen suositusarvojen mukaan (RIL 107-2012). Ulkoilman olosuhteina on käytetty homeenkasvun kannalta kriittistä ulkoympäristöä kuvaavia rakennusfysikaalisia testivuotia, jotka on määritetty FRAME-tutkimuksessa (Vinha et al.

2013). Ulko- ja sisäilman välinen paine-ero sekä viistosade on määritetty kriittisesti olettamalla rakennusta ympäröivä maasto avoimeksi (maastoluokka I (SFS-EN 1991-1-4+AC+A1 (2011))).

### 3.3.1 Sisäilman olosuhteet

Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa keskeisimmät sisäilman olosuhteet ovat lämpötila ja suhteellinen kosteus. Sisäilman lämpötila- ja kosteusolosuhteita on tutkittu laajoilla kenttämittauksilla Tampereen teknillisen yliopiston (TTY, nyk. Tampereen yliopisto) ja Teknillisen korkeakoulun (TTK, nyk. Aalto-yliopisto) yhteistyönä 2000-luvun alussa. Tutkimusten kohteena oli kaikkiaan 100 puurunkoista pientaloa, 50 kivirakenteista pientaloa, 22 hirsitaloa ja 56 kerrostaloasuntoa. Tutkimusten tulokset ovat luettavissa lähteistä (Vinha et al. 2005b, Vinha et al. 2009).

Puurunkoisista pientaloista mitattujen sisäilman lämpötilojen keskiarvo kesäaikana oli +24,8 °C (vaihteluväli +22,2...+28,5 °C) ja talviaikana +21,6 °C (vaihteluväli +16,8...+26,5 °C) (Vinha et al. 2005b). Tämän tutkimuksen laskentatarkasteluissa sisäilman lämpötilana käytettiin lähteessä RIL 107-2012 suositeltua sisäilman lämpötilaa 21 °C. Kyseistä lämpötilaa suositellaan käytettäväksi laskennallisissa tarkasteluissa, kun sisälämpötilana pyritään pitämään normaalia huonelämpötilaa (RIL 107-2012).

Suosittu sisäilman lämpötila vastaa hyvin talviaikana mitattujen sisälämpötilojen keskiarvoa, mutta on huomattavasti kesäaikana mitattujen sisäilman lämpötilojen keskiarvoa alhaisempi. Tällä valinnalla tarkasteluissa otetaan huomioon sisätilan jäähtymisen vaikutus kesäaikana. Muiden rakennusten laskentatarkasteluissa sisäilman lämpötila on arvioitava tapauskohtaisesti (RIL 107-2012).

Rakennusten käyttö ja asuminen tuottavat sisäilmaan kosteutta, minkä seurauksena sisäilma on lähes aina ulkoilmaa kosteampaa. Kosteuspitoisuusero pyrkii tasoittumaan rakennuksen vaipan läpi diffuusiolla, jonka määrä on sitä suurempi mitä suurempi on rakenteen yli vallitseva kosteuspitoisuusero. Sisäilman kosteutta voi siirtyä rakenteisiin diffuusion lisäksi myös konvektiolla ilmapuotojen mukana. (Vinha et al. 2013)

Sisäilman suhteellinen kosteus on riippuvainen ulkoilman suhteellisesta kosteudesta, joten sisä- ja ulkoilman välistä kosteuspitoisuuseroa on havainnollista kuvata sisäilman kosteuslisällä  $\Delta v$  [g/m<sup>3</sup>] (voidaan ilmoittaa myös vesihöyryn osapaine-erona  $\Delta p_v$  [Pa]). Sisäilman kosteuslisä kertoo, kuinka paljon enemmän sisäilma sisältää vesihöyryä ulkoilmaan verrattuna. (RIL 107-2012)

Sisäilman kosteuslisän määrittämiseen on olemassa standardin SFS-EN ISO 13788 (2012) mukainen kansainvälinen luokittelu, joka perustuu Itä-Euroopassa sijaitsevien rakennusten sisäilman kosteuslisän tutkimuksiin. Tutkimusten (Vinha et al. 2005b, Vinha

et al. 2009) perusteella on kuitenkin näytetty, että Suomessa on suositeltavaa käyttää lähteen RIL 107-2012 (2012) mukaisia sisäilman kosteuslisä mitoitusarvoja. Kosteuslisä määritetään rakennustyypeittäin (taulukko 3.5). Asuinrakennukset kuuluvat kosteusluokkaan 2 sekä lähteen RIL 107-2012 (2012) että lähteen SFS-EN ISO 13788 (2012) mukaisissa luokitteluissa. Lähteen RIL 107-2012 (2012) kosteusluokka 3 vastaa lähteen SFS-EN ISO 13788 (2012) mukaista kosteusluokkaa 1.

**Taulukko 3.5.** Kosteusluokat rakennustyypeittäin (RIL 107-2012).

Kosteusluokka	Kosteuslisän mitoitusarvo talvella ( $T \leq 5 \text{ °C}$ )	Rakennustyyppi <sup>3,4</sup>
1	$> 5 \text{ g/m}^3$ <sup>1</sup>	Kylpylät, uimahallit, laitoskeittiöt, pesulat, panimot, kirjapainot, kasvihuoneet, kostutetut tilat, ratsastusmaneesit, maatalouden tuotantorakennukset, eläinsuojat, teollisuuden kosteusrasitettut tilat
2	$5 \text{ g/m}^3$	Asuinrakennukset, toimisto- ja liikerakennukset, hotellit ja majoitusrakennukset, ravintolat, kokoontumis- ja juhlatilat, opetusrakennukset ja päiväkodit, sairaalat ja hoitolaitokset, museot, liikuntahallit ja -tilat, jäähallit ja jäähdytetyt liikuntatilat <sup>5,6</sup> , kylmä- ja pakkahuoneet <sup>5,6</sup> , talviasuttavat vapaa-ajan asunnot
3	$3 \text{ g/m}^3$ <sup>2</sup>	Vapaa-ajan asunnot, puolilämpimät tai kylmillään olevat rakennukset, varastot ja säilytystilat, ajoneuvosuojat, tekniset tilat, väliaikaiset ja siirrettävät rakennukset

<sup>1</sup> Kosteusluokan 1 rakennuskohteissa sisäilman kosteuslisä ja lämpötila on aina arvioitava kohdekohtaisesti erikseen mitoituksen yhteydessä. Kosteuslisä voi vaihdella rakennuksen käyttötarkoituksesta riippuen välillä  $6\text{--}20 \text{ g/m}^3$ .

<sup>2</sup> Kosteusluokan 3 rakennuskohteissa kosteustekninen mitoitus tehdään käyttäen talvella kosteuslisän arvoa  $3 \text{ g/m}^3$ , ellei voida luotettavasti osoittaa, että pienempikin kosteuslisä riittää tarkasteltavassa kohteessa.

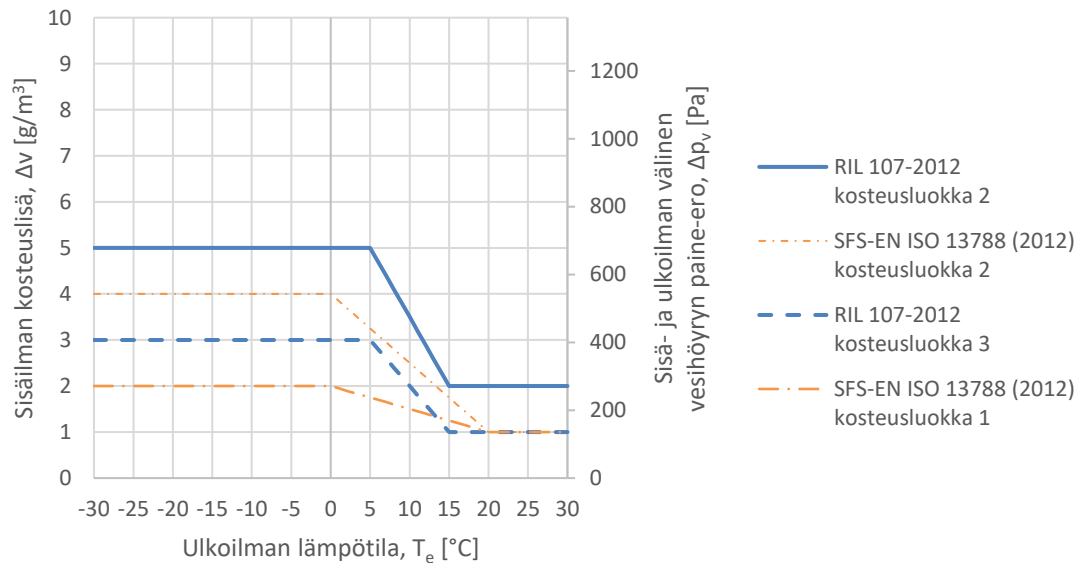
<sup>3</sup> Eri rakennustyyppeihin kuuluvia rakennuksia on lueteltu tarkemmin RakMK D3:ssa (2012).

<sup>4</sup> Rakennusta suunniteltaessa tulisi ottaa huomioon, että rakennuksen käyttötarkoitusta saatetaan joskus myöhemmin muuttaa, jolloin myös sen kosteusluokka voi muuttua.

<sup>5</sup> Jäähdytettyjen tilojen kosteusluokkaa valittaessa on otettava huomioon, että sisäilman kosteuslisä voi nousta suureksi sisätilan mahdollisten lämpötilamuutosten yhteydessä. Jäähallit ja muut jäähdytetyt liikuntatilat, joiden lämpötila nostetaan ajoittain korkeaksi ja joita käytetään ajoittain kosteusluokan 1 mukaisissa tarkoituksissa, kuuluvat kosteusluokkaan 1.

<sup>6</sup> Jäähdytettyjen tilojen vaipparakenteiden mitoituksessa on otettava huomioon myös ulkoa sisälle päin siirtyvä vesihöyry, joka voi aiheuttaa kosteuden kondensoitumista ja homeen kasvuille otollisia olosuhteita lähellä rakenteen sisäpintaa.

Kuvassa 3.9 on määritetty sisäilman kosteuslisä  $\Delta v$  ulkoilman lämpötilan  $T_e$  funktiona eri rakennusluokissa ja eri lähteiden perusteella määritettynä. Kuvassa on myös esitetty sisä- ja ulkoilman välinen vesihöyrynpaine-ero  $\Delta p_v$ , kun sisäilman lämpötila on  $21 \text{ °C}$ . Kuvasta nähdään, että lähteen RIL 207-2012 (2012) mukaan määritetty kosteuslisä on suurempi kuin lähteen SFS-EN ISO 13788 (2012) mukaan määritetty kosteuslisä vastaavissa kosteusluokissa.



**Kuva 3.9.** Sisäilman kosteuslisä kosteusluokittain ulkoilman lämpötilan funktiona.

Laskentatarkasteluja varten sisäilman suhteellinen kosteus määritettiin käyttäen RIL 107-2012 kosteusluokan 2 mukaista sisäilman kosteuslisää. Sisäilman suhteellinen kosteus  $\varphi_i$  laskettiin kaavojen (2.2)-**Error! Reference source not found.** mukaan käyttämällä ulkoilman olosuhteina rakennusfysikaalisia testivuotia. Sisäilman suhteellisen kosteuden laskeminen suoraan ulkoilman olosuhteista johtaa yli 100 % suhteellisiin kosteuksiin. Laskentaa varten sisäilman suhteellisen kosteuden ylärajaksi valittiin 97 %. Tarkastelut kohdistettiin kuivien tilojen rakenteisiin, joten roiskevesiä ei huomioitu rakenteita rasittavina sisäilman olosuhteina.

### 3.3.2 Ulkoilman olosuhteet

Tässä luvussa esitetty kuvaus ulkoilman olosuhteista sekä rakennusfysikaalisten testivuotien valinnasta ja käytöstä perustuu lähteeseen (Vinha et al. 2013). Rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan kannalta keskeisimmät ulkoilman olosuhdetekijät ovat lämpötila, suhteellinen kosteus, tuuli, sade, auringonsäteily sekä rakennuksen ja ympäristön välinen pitkäaaltoinen säteily. Ulkoilman olosuhdetekijät vaihtelevat rakennuksen maantieteellisen sijainnin ja tarkasteltavan ilmansuunnan mukaan. Ulkoilman olosuhdetekijöiden lisäksi rakennusten läheiseen ns. mikroilmastoon vaikuttavat mm. rakennuksen korkeusasema, koko, muoto, korkeus, ulkopintojen detaljit ja suojarakenteet sekä lähiympäristö.

Laskentatarkasteluissa ulkoilman olosuhteina käytettiin FRAME-tutkimuksessa määritettyjä testivuotia. Tutkimuksessa vertailtiin säädataa neljältä paikkakunnalta vuosilta 1980-2009. Vertailut säädatat sisälsivät rakenteiden rakennusfysikaalisen toiminnan kannalta

keskeisimmät ulkoilman olosuhdetekijät pitkäaaltoista säteilyä lukuun ottamatta. Testivuodet valittiin siten, että 90 % tarkasteltavista vuosista oli toimintakriteerien kannalta vähemmän kriittisiä kuin valittu testivuosi. Testivuosien valinnassa otettiin huomioon tarkasteltavat rakenteet ja rakenteiden toimintakriteereinä käytettiin kosteuden kondensoitumista ja homeenkasvua.

Vertailujen perusteella rakenteille valittiin nykyilmastossa kaksi rakennusfysikaalista testivuotta: Jokioinen 2004 ja Vantaa 2007. Rakennusfysikaaliset testivuodet sisältävät tunneittain mitatut säähavaintotiedot. Rakennusfysikaalisia testivuosia ei valittu erikseen tietyille säävyöhykkeille, vaan ne kattavat koko Suomen alueen.

Jokioinen 2004 testivuotta käytetään rakenteille, joiden sisäosan kosteusteknisen toiminnan määräävänä ulkoilman kosteuslähteenä on ympäröivän ilman suhteellinen kosteus. Tällaisia rakenteita ovat esimerkiksi puu- ja metalliverhotut ulkoseinät sekä sisäpuolelta eristetyt massiivirakenteet. Jokioinen 2004 testivuoden yhteydessä seinärakenteiden ilmansuuntana tulee käyttää pohjoista, koska tällöin auringon säteilyn lämmittävä ja kuivattava vaikutus on vähäisin.

Vantaa 2007 testivuotta tulee käyttää rakenteille, joiden sisäosan kosteusteknisen toiminnan määräävänä ulkoilman kosteuslähteenä on viistosade. Esimerkkejä rakenteista ovat tiiliverhotut ja eristerapatut ulkoseinät. Tarkasteltaessa seinärakenteita Vantaa 2007 testivuodella, ilmansuuntana tulee käyttää etelää, koska eteläseinällä viistosade on voimakkainta. Viistosateen lisäksi auringon säteilyn voimistama ulkoverhoukseen sitoutuneen kosteuden diffusiivinen siirtyminen rakenteen sisäosiin on voimakkainta eteläseinällä. Betonisandwich- ja harkkorakenteiden kriittinen testivuosi vaihtelee rakenteesta riippuen, joten niiden tarkastelut on syytä suorittaa molemmilla testivuosilla.

Nykyilmaston testivuosien lisäksi on määritetty testivuodet kuvaamaan tulevaisuuden ilmastoja. Ilmatieteen laitos muunsi nykyilmaston säädäntä tulevaisuuden ilmastoiksi REFI-B-hankkeessa. Modifioinnissa käytettiin A2-skenaariota, jonka mukaan kasvihuonepäästöt tulevat kasvamaan koko tämän vuosisadan ajan. Ilmastonmuutoksen seurauksena ulkoilman lämpötilan odotetaan nousevan ja sademäärän kasvavan. Lisäksi tuulen voimakkuuden ja ulkoilman suhteellisen kosteuden odotetaan nousevan. (Ruosteenoja et al. 2013) Ongelmallista on, että ilmastonmuutoksen vaikutukset olosuhdemuutokset painottuvat rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta kriittisiin syksyyn ja talveen.

FRAME-tutkimuksen vertailuissa havaittiin, että nykyilmastossa kriittiset testivuodet ovat kriittisiä myös tulevaisuuden ilmastoissa. Tulevaisuutta kuvaavat testivuodet ovat arvioita tulevaisuudesta eivätkä kuvaa tarkasti mitään tiettyä vuotta, joten niille käytetään laskentatarkasteluissa nimityksiä Jokioinen 2050, Jokioinen 2100, Vantaa 2050 ja Vantaa 2100.

Rakennusfysikaalisia testivuosia käytettäessä tulee ottaa huomioon seuraavat asiat:

- Testivuodet eivät ole rakenteiden kannalta kaikkein kriittisimpiä ja erot kriittisimpiin testivuosiin voivat olla merkittäviä. Kriittisyys riippuu myös valituista toimintakriteereistä ja tarkasteltavista rakenteista.
- Testivuodet kuvaavat avonaisella paikalla sijaitsevan rakennuksen ulkoilman olosuhteita ja rakennuksen mikroilmaston vaikutukset tulee ottaa tarkasteluissa huomioon.
- Testivuosien valinnassa ei otettu huomioon rakenteen pinnan ja taivaan välistä pitkäaaltoista lämpösäteilyä.
- Testivuodet eivät ole välttämättä kovin kriittisiä rakenteille, joissa ulkoilman kosteusolosuhteiden vaikutus rakenteiden toimintaan on vähäinen tai olematon.

TTY:llä tehdyissä viimeisimmissä laskentatarkasteluissa on havaittu, että 2010-luvun mitattujen ulkoilman olosuhteiden kriittisyys on jo lähellä vuoden 2050 kriittisyyttä. Havaintojen perusteella voidaan todeta, että tulevaisuuden ilmastoilla tehtävät laskentatarkastelut ovat tarpeellisia. Rakennusfysikaalisten testivuosien säätiedot on esitetty liitteessä 1.

### 3.3.3 Paine-erojen muodostuminen

Rakennuksen vaipan yli vallitsee tyypillisesti jatkuvasti vaihteleva ilmanpaine-ero. Ilmanpaine-ero muodostuu ulko- ja sisäilman lämpötilaerosta, tuulesta sekä ilmanvaihtojärjestelmän aiheuttamasta paine-erosta. Tarkasteltavassa pisteessä rakennuksen vaipan yli vallitseva paine-ero lasketaan lämpötilaerosta  $\Delta P_T$ , tuulesta  $\Delta P_W$  ja ilmanvaihdosta  $\Delta P_V$  syntyvien paine-erojen summana kaavalla

$$\Delta P = \Delta P_T + \Delta P_W + \Delta P_V \quad (3.6)$$

missä

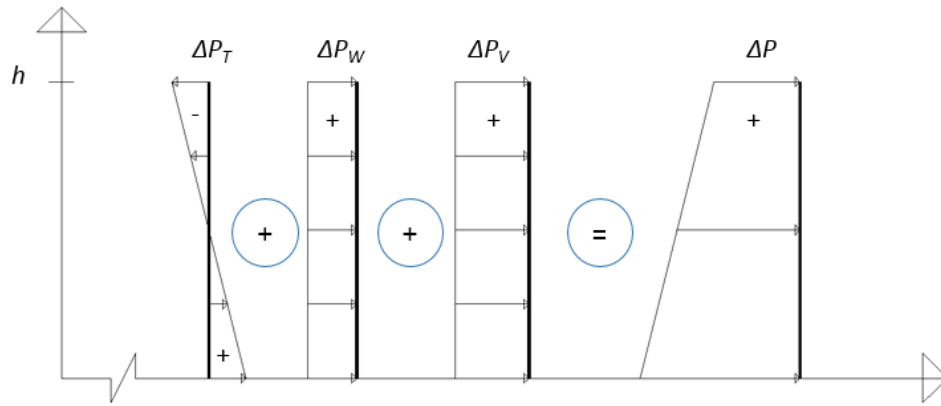
$\Delta P$  = paine-ero rakennuksen vaipan yli [Pa]

$\Delta P_T$  = paine-ero lämpötilaerosta [Pa]

$\Delta P_W$  = paine-ero tuulesta [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]

$\Delta P_V$  = paine-ero ilmanvaihdosta [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]

Kuvassa 3.10 on esitetty rakennuksen ulkoseinän paine-eron muodostuminen, kun rakennukseen sisäilman ja ulkoilman välillä on lämpötilaero, rakennukseen vaikuttaa tuuli ja ilmanvaihto on säädetty alipaineiseksi. Tuulesta ja ilmanvaihdosta aiheutuvat paine-erot ovat käytännössä vakioita rakennuksen korkeuden suhteen, mutta lämpötilasta aiheutuva paine-ero vaihtelee tarkastelukorkeudesta ja ilmavuotojen jakautumisesta riippuen.



**Kuva 3.10.** Ilmanpaine-eron muodostuminen tuulenpuoleisella seinällä.

Rakennuksen vaipan yli vallitsevat paine-erot aiheuttavat ilman siirtymistä huokoisten materiaalien läpi tai rakenteiden rakojen ja reikien läpi. Hallitsemattomilla ilmapuodoilla on monia rakenteisiin ja sisäilman laatuun vaikuttavia seurauksia. Hallitsemattomien ilmapuotojen ehkäisemisellä on siis useita positiivisia vaikutuksia (Aho & Korpi 2009):

- Kostean sisäilman virtaus rakenteisiin vähenee
- Epäpuhtauksien, radonin ja mikrobien virtaus sisäilmaan vähenee
- Ilmanvaihdon säätäminen helpottuu
- Rakennusten energiankulutus vähenee
- Vaipparakenteiden pintalämpötilat nousevat
- Käyttäjien kokema vedon tunne vähenee

Tässä aluvuossa on käsitelty lämpötilaeron, tuulen ja ilmanvaihdon aiheuttamien paine-erojen laskennallisia malleja sekä vaipan ilmatiiveyden vaikutusta paine-erojen muodostumiseen. Vaipan ilmatiiveys on vahvasti kytköksissä toimivaan ilmanvaihtoon. Toimiva ilmanvaihto edellyttää rakennukselta tiivistä vaippaa, mutta toisaalta ilmanvaihdon säätämisen tärkeys korostuu, kun vaipan ilmatiiveyttä parannetaan.

### Vaipan ilmatiiveys

Vaipan ilmatiiveydellä tarkoitetaan vaipan läpi tapahtuvien hallitsemattomien ilmapuotojen ehkäisyä (Ympäristöopas 2016). Rakennuksen vaipan epätiiveyskohtia esiintyy eniten liitosten ja läpivientien yhteydessä. Ilmanpitävien rakennusten suunnittelussa korostuvat liitosten suunnittelu ja toteutus. Nykyaikana suurin osa rakentamisesta on elementtirakentamista, jossa runkorakenteiden välisiä liitoksia esiintyy paikallarakentamista enemmän.

Edellä listattiin ilmapuotojen aiheuttamia vaikutuksia sekä rakennuksille että käyttäjille. Rakennuksen ilmatiiveyden parantamisella saavutetaan myönteisiä vaikutuksia, kun hallitsemattomat ilmapuodot vähenevät. Positiivisia vaikutuksia ovat rakenteiden kosteusteknisen toiminnan, sisäilmanlaadun ja viihtyvyyden paraneminen sekä ilmanvaihdon

säädön helpottuminen. (Aho & Korpi 2009) Lisäksi vuotoilmanvaihdon vähenemisen seurauksena rakennuksen energiankulutus vähenee, koska vuotoilmanvaihto aiheuttaa tuntuvan osan tavanomaisen pientalon energiankulutuksesta. Tutkimuksen (Vinha et al. 2009) mukaan ilmanvuotoluvun yhden yksikön lisäys tarkoittaa noin 4 % lisäystä rakennuksen kokonaisenergiankulutukseen.

Ilmatiiveyden parantaminen korostaa ilmanvaihdon säätämisen tärkeyttä (Vinha et al. 2005b), minkä seurauksena vaipan ilmatiiveyden parantamisella voi olla myös negatiivisia vaikutuksia. Väärin säädetty ilmanvaihto aiheuttaa tiiviimmän rakennuksen tilanteessa suuremman paine-eron. Oletetusti tiiviimmässä rakennuksessa on myös vähemmän vuotoilmareittejä, joten rasituksista tulee pistemäisempiä. Korjausrakentamisessa vaipan ilmatiiveyden parantamisen seurauksena tuloilman määrä saattaa pienentyä merkittävästi, mikä tulee ottaa huomioon ilmanvaihtolaitteiden suunnittelussa tai säädössä (Ympäristö-opas 2016).

Rakennuksen tai rakennuksen osan ilmatiiveyttä mitataan paine-eromenetelmällä. Mittausta varten rakennuksen tarkoituksenmukaiset aukot suljetaan, rakennuksen vaipan yli aiheutetaan paine-ero ja mitataan paine-eroa ylläpitävän laitteen läpi kulkevaa ilmamäärä. Mittaus voidaan suorittaa joko painekoelaitteistolla tai rakennuksen omalla ilmanvaihtolaitteistolla. (SFS-EN ISO 9972 2015) Luotettavien mittaustulosten saamiseksi ilmanpitävyyden mittaus tulisi suorittaa painekoelaitteistolla (RT 80-10974 2009).

Tiiveysmittaus voidaan suorittaa, kun kaikki ulkovaipan ilmanpitävyyteen vaikuttavat rakennustyöt on tehty. Rakennuksen ilmatiiveyden mittaaminen ennen sisäverhouksen asentamista on suositeltavaa, koska tällöin ilmatiiveyteen voidaan vielä vaikuttaa tiiveysmittauksen jälkeen. Rakennuksen lopullinen ilmanvuotoluku mitataan valmiista rakennuksesta. (RT 80-10974 2009)

Mittaus suositellaan suoritettavaksi vähintään viidellä eri paine-erolla siten, että suurin mitattava paine-ero on yli 50 Pa (SFS-EN ISO 9972 2015). Mittaus tulisi tehdä sekä alipaineisena, koska ilmapuotojen määrä voi muuttua merkittävästi paine-eron suunnan muuttuessa (RT 80-10974 2009). Rakennuksen ilmanpitävyyden mittaamista on esitetty tarkemmin standardissa SFS-EN ISO 9972 (2015) ja suositeltuja menetelmiä sekä tarkennuksia ohjekortissa RT 80-10974 (2009).

Rakennuksen vuotoilmavirtaa kuvataan ns. potenssilain avulla

$$R = C \cdot \Delta P^n \quad (3.7)$$

missä

$R$	= vuotoilmavirta tietyllä paine-erolla [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]
$C$	= ilman virtauskerroin [ $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{Pa}^n)$ ]
$\Delta P$	= paine-ero rakennuksen vaipan yli [Pa]
$n$	= ilman virtausekspONENTTI [-]



Ilman virtausekspONENTIN arvo vaihtelee välillä 0,5-1,0 riippuen virtauksen tyypistä (laminäärinen - turbulენტinen) (Vinha et al. 2009). Tyypillinen arvo ilman virtausekspONENTILLE on 0.65-0.7 (ASHRAE Handbook 2017, Arfvidsson et al. 2017), mutta virtausekspONENTIN arvo vaihtelee jokaisen rakennuksen kohdalla.

Tiiveysmittauksen tuloksena rakennukselle määritetään ilmanvuotoluku, joka vastaa vuotoilmavirtaa  $R_{50}$  [m<sup>3</sup>/h], kun paine-ero rakennuksen vaipan yli on 50 Pa. Ilmanvuotoluku esitettiin ennen rakennuksen sisätilavuuden suhteen  $n_{50}$  [1/h] (SRMK D3 2010), mutta nykyisin on siirrytty käyttämään rakennuksen vaipan pinta-alan suhteen määritettyä ilmanvuotolukua  $q_{50}$  [m<sup>3</sup>/(h·m<sup>2</sup>)] (YMa 2017).

Ilmanvuotoluku  $n_{50}$  rakennuksen sisätilavuuden suhteen lasketaan kaavalla

$$n_{50} = \frac{R_{50}}{V} \quad (3.8)$$

missä

$n_{50}$  = ilmanvuotoluku [1/h]

$R_{50}$  = vuotoilmavirta 50 Pa paine-erolla [m<sup>3</sup>/h]

$V$  = rakennuksen sisätilavuus [m<sup>3</sup>].

Ilmanvuotoluku  $q_{50}$  rakennuksen vaipan pinta-alan suhteen lasketaan kaavalla

$$q_{50} = \frac{R_{50}}{A_{vaippa}} \quad (3.9)$$

missä

$q_{50}$  = ilmanvuotoluku [m<sup>3</sup>/(h·m<sup>2</sup>)]

$R_{50}$  = vuotoilmavirta 50 Pa paine-erolla [m<sup>3</sup>/h]

$A_{vaippa}$  = rakennuksen vaipan pinta-ala [m<sup>2</sup>].

Pientaloissa ilmanvuotolukujen  $n_{50}$  ja  $q_{50}$  arvot ovat melko lähellä toisiaan. Korkeissa rakennuksissa sisätilavuuden suhteen lasketut ilmanvuotoluvun  $n_{50}$  arvot ovat pienempiä kuin vaipan pinta-alan suhteen lasketut ilmanvuotoluvun  $q_{50}$  arvot, koska ylöspäin rakennettaessa rakennusten vaipan sisätilavuus muuttuu suhteessa hitaammin vaipan pinta-alaan verrattuna. (*Energiätehokkuus, rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta* 2017)

Ympäristöministeriön asetuksessa uuden rakennuksen energiatehokkuudesta (YMa 1010/2017) määrätään, että rakennuksen vaipan ilmanvuotoluku  $q_{50}$  voi olla enintään 4,0 m<sup>3</sup>/(h·m<sup>2</sup>) ellei rakennuksen käytön vaatimat rakenteelliset ratkaisut edellytä suurempaa ilmanvuotolukua. Vertailulämpöhäviön laskennassa rakennuksen vaipan ilmanvuotolu-

kuna  $q_{50}$  tulee käyttää arvoa  $2,0 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ . Rakenteellisen energiatehokkuuden vaatimusten mukaan rakennuksen vuotoilman lämpöhäviötä laskettaessa rakennuksen ilmanvuotoluvun  $q_{50}$  vertailuarvo on  $0,6 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ . (YMa 1010/2017)

Rakennuksen ilmanpitävyyttä ei tarvitse osoittaa, mikäli tasauslaskennassa suunnitteluratkaisun ilmanvuotolukuna käytetään arvoa  $4,0 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ . Mikäli tasauslaskennassa halutaan käyttää pienempää ilmanvuotolukua, on suoritettava tiiviysmittaus tai osoitettava rakennuksen tiiviys muulla menettelyllä. (*Tasauslaskentaopas 2018* 2017)

Kumotun Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D3 (2012) selostuksen mukaan kosteusteknisen turvallisuuden, hyvän sisäilmaston ja energiatehokkuuden kannalta tulisi rakennuksen vaipan ilmanvuotoluvun  $q_{50}$  olla enintään  $1,0 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ . Myös sisäilmastoluokituksen luokkien S1 ja S2 mukaisissa rakennuksissa ilmanvuotoluvun tavoitearvoksi tulee asettaa  $1,0 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$  (RT 07-11299 2018).

TTY:n ja TKK:n kenttämittauksissa tutkittiin suomalaisten asuinrakennusten ilmanpitävyyttä (ks. alaluku 3.3.1). Kenttämittauksissa tutkitut rakennukset olivat valmistuneet vuosina 1982-2005. Kohteiden keskiarvoikä mittauksia aloitettaessa oli noin 4 vuotta. Tutkimuksissa mitattujen rakennusten ilmanvuotolukujen  $n_{50}$  keskiarvot talotyypeittäin on esitetty taulukossa 3.6.

**Taulukko 3.6.** Ilmanvuotolukujen keskiarvot talotyypeittäin. (Vinha et al. 2005b; Vinha et al. 2009)

Talotyyppi	Ilmanvuotolukujen keskiarvo $n_{50}$ [1/h]
Puurakenteinen pientalo	3,9
Kivirakenteinen pientalo	2,3
Hirsitalo	6,0
Kerrostaloasunto	1,6

Puurunkoisten pientalojen ilmanvaihtolukujen keskiarvoksi saatiin  $3,9 \text{ 1/h}$  vaihteluvälin ollessa  $0,5 \dots 8,9 \text{ 1/h}$  (Vinha et al. 2005b). Myös Virossa on tutkittu vastaavasti teräs- ja puurankarunkoisten pientalojen ilmanpitävyyttä kenttämittauksin 2000-luvun alussa. Virolaisten pientalojen ilmanvaihtolukujen keskiarvoksi saatiin  $4,9 \text{ 1/h}$  vaihteluvälin ollessa  $0,7 \dots 13,6 \text{ 1/h}$  (Kalamees 2007). Tutkimuksissa mitattujen ilmanvaihtolukujen keskiarvot ovat kohtuullisen lähellä toisiaan.

Edellä esitettyjen tutkimusten jälkeen Suomessa on alettu kiinnittää entistä enemmän huomiota rakennusten ilmatiivyyteen. Uusia rakennuksia (2014-2017) käsitelleessä tutkimuksessa puurunkoisten pientalojen (126 kpl) ilmanvuotolukujen keskiarvoksi mitattiin  $1,20 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ . Yksittäisten rakennusten ilmanvuotoluvut vaihtelivat välillä  $0,8 \dots 1,5 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ . Tutkimuksessa kaikki puurunkoiset pientalot alittivat ilmanvuotoluvun vertailuarvon  $2,0 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ . (Jussila 2018) Lisäksi Oulun rakennusvalvonta on tilastoinut

vuonna 2015 valmistuneiden pientalojen ilmanvuotolukuja. Kaikki vuonna 2015 valmistuneet talot mitanneiden puurunkoisten pientalotoimittajien osalta voidaan todeta, että suurin talotoimittajakohmainen ilmoitettu ilmanvuotoluku oli  $1,0 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$  yksittäisten mittaustulosten vaihteluvälin ollessa  $0,2\dots 2,0 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ . (Tiiveys pientaloissa 2016)

Ilmanpitävyydsmittausten yhteydessä suoritettiin lämpökamerakuvauksia, joilla selvitettiin rakennuksien ilmapuotokohtia. Tutkimuksissa tyypillisiksi vuotokohdiksi osoittautuivat ovet, ikkunat ja niiden liitokset, yläpohja-seinäliitokset, alapohja-seinäliitokset sekä välipohja-seinäliitokset. Ilmapuotoja havaittiin myös läpivientien ja seinien välisissä liitoksissa. (Kalamees 2007; Vinha et al. 2009; Jussila 2018)

Tutkimukset ovat osoittaneet, että talotyypistä riippumatta rakennus pystytään rakentamaan hyvin ilmatiiviiksi. Ilmanvuotolukujen vaihtelu talotyypin sisällä kertoo siitä, että rakentamisen laadulla on suuri merkitys ilmanpitävyyden saavuttamisessa. Hyvän ilmanpitävyyden saavuttamiseksi tulee kiinnittää erityistä huomiota rakennedetaljien suunnitteluun sekä rakennustyön ohjeistukseen ja toteutukseen. (Vinha et al. 2005b)

### **Ilmanpaine-ero ilmanvaihdosta**

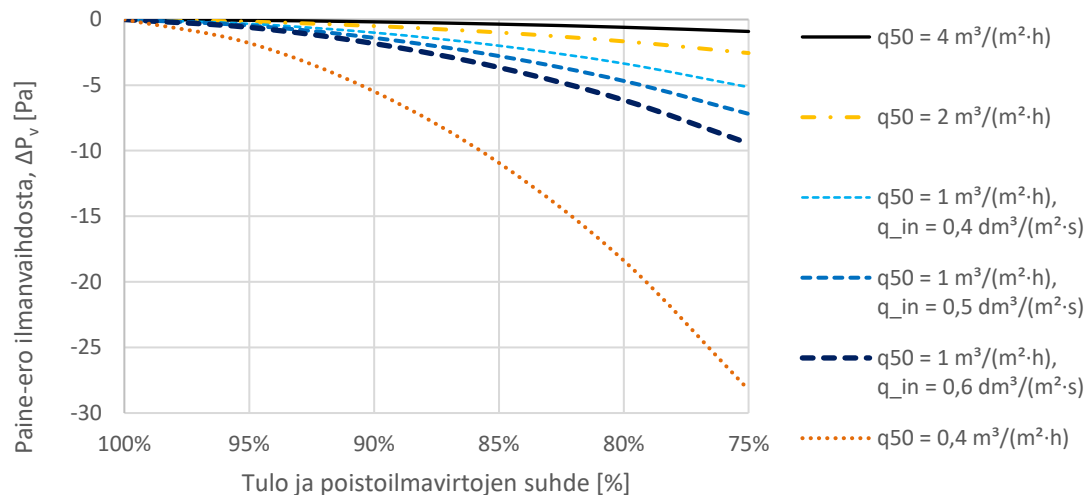
Ilmanvaihdon tehtävä on tuottaa oleskelutiloihin terveellinen, turvallinen ja viihtyisä sisäilman laatu (YMa 1009/2017). Ilmanvaihtojärjestelmä voi olla koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä, painovoimainen ilmanvaihtojärjestelmä, koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä tai yhdistelmä kahdesta edellisestä (*Ympäristöopas 2016* 2016).

Ympäristöministeriön asetusta uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta edeltäneessä (YMa 1009/2017) Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa D2 (2012) määrättiin, että rakennus suunnitellaan yleensä ulkoilmaan nähden alipaineiseksi. Ilmanvaihdon paineistusta koskevat määräykset muuttuivat uusimman asetuksen tullessa voimaan. Ympäristöministeriön asetuksessa (YMa 1009/2017) määrätään, että ilmanvaihdosta ei saa aiheutua uusien rakennusten rakenteille kosteusrasitusta ylipaineen seurauksena tai sisäilmanlaadun heikkenemistä alipaineen seurauksena.

Uusi asetus ohjaa siis suunnittelua tasapainoisen ilmanvaihdon suuntaan, mikä tarkoittaa, että ulko- ja ulospuhallusilmavirrat mitoitetaan yhtä suuriksi. Uudistuneiden määräysten seurauksena rakenteiden kosteusrasitusten voidaan olettaa kasvavan, koska ilmanvaihdolla ei pyritä kumoamaan lämpötilaerosta johtuvaa paine-eroa. FINVAC-yhdistyksen julkaisemassa asuinrakennusten ilmanvaihdon mitoitusoppaassa kuitenkin todetaan, että ilmavirrat tulisi mitoittaa siten, että rakennus ei ole miltään osin jatkuvasti ylipaineinen eikä paine-ero vaipan yli ole suurempi kuin 5 Pa tavanomaisissa sääolosuhteissa (*Opas asuinrakennusten ilmanvaihdon mitoitukseen* 2017).

Kuten edellä ilmatiiveyden yhteydessä todettiin, rakennuksen vaipan ilmatiiveyden parantua ilmanvaihdon ja tavoiteltujen painesuhteiden säätäminen helpottuu, mutta toi-

saalta ilmanvaihdon säätämisen tärkeys korostuu. Asuinrakennusten ilmanpitävyyttä käsitelleen tutkimuksen (Vinha et al. 2009) mukaan ilmanvaihdon säädöillä pystytään hallitsemaan rakennuksen painesuhteita, kun rakennuksen ilmanvuotoluku  $n_{50} \leq 0,4$  1/h. Kuvassa 3.11 on esitetty ilmanvaihdosta aiheutuva paine-ero  $\Delta P_v$  neljällä eri ilmanvuotoluvulla tulo- ja poistoilman suhteen funktiona, kun tuloilmavirta on  $0,5 \text{ dm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  ja lattian pinta-alan suhde vaipan pinta-alaan 2.2 (tarkasteltava rakennus: pituus 10 m, leveys 10 m, korkeus 6 m). Kuvaan on myös laskettu ilmanvaihdon aiheuttama paine-ero ilmanvuotoluvulla  $1,0 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ , kun tuloilmavirta  $q_{in}$  on  $0,4$  tai  $0,6 \text{ dm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ .



**Kuva 3.11.** Ilmanvaihdosta aiheutuva paine-ero.

Ilmanvaihdon mitoitusoppaan mukaan asunnon kokonaisilmavirta saa poiketa suunnitelluarvosta enintään 10 % (*Opas asuinrakennusten ilmanvaihdon mitoitukseen* 2017). Kuvasta 3.11 nähdään, että kun tuloilmavirta on 10 % pienempi kuin poistoilmavirta, ilmanvuotoluvun  $q_{50}$  parantaminen arvosta 4,0 arvoon 0,4 lisää paine-eroa vaipan 5,3 Pa. Mikäli tulo- ja poistoilmavirran suhde olisi 80 %, sama ilmanvuotoluvun parannus lisäisi paine-eroa 17,8 Pa. Ilmanvuotoluvun  $q_{50}$  arvolla 1,0 tehdyt vertailut (kuvassa katkoviivalla) osoittavat, että tuloilmavirran lisääminen kasvattaa myös vaipan läpi vedettävän korvausilmanmäärää, mikä onnistuu vain lisäämällä paine-eroa.

Käyttöaikana koko rakennuksen ulkoilmavirraksi on mitoitettava vähintään  $0,35 \text{ dm}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$  lattian pinta-alaa kohti, asuinhuoneistossa kuitenkin vähintään  $18 \text{ dm}^3/\text{s}$ . Oleskelutiloissa ulkoilmavirran tulee olla vähintään  $6 \text{ dm}^3/\text{s}$  henkilöä kohti. Lisäksi asuinhuoneistojen ilmavirtojen tulee olla tehostettavissa vähintään 30 % käyttötilanteen suunnitteluarvoja suuremmaksi. Asuntokohtaista ilmanvaihtoa voidaan käyttää myös 60 % suunnitteluarvoja pienemmillä ilmavirroilla. (YMa 1009/2017)

Ulkoilmavirta voi olla tehostustilanteessa siis suurempi kuin kuvassa 3.11 käytetty arvo  $0,5 \text{ dm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ . Ulkoilmavirran kasvaessa myös säätövirheen vaikutus ilmanvaihdon ai-

heuttamaan paine-eroon kasvaa. Palvelurakennuksissa on myös tyypillistä, että ilmanvaihtoa säädellään käytön mukaan, niin että ilmanvaihdon ilmavirrat ovat käyttötilannetta pienempiä iltaisin ja viikonloppuisin. Käytettäessä käyttötilanteen suunnitteluarvoja pienempiä ilmavirtoja tulee huolehtia siitä, että tulo- ja poistoilmavirtoja vähennetään saman verran.

### Ilmanpaine-ero lämpötilaerosta

Rakennuksen vaipan yli aiheutuu paine-ero ulko- ja sisäilman välisen lämpötilaeron ja siitä aiheutuvan tiheyseron seurauksena. Lämmityskaudella ulkoilmaa kevyempi sisäilma kohoaa ylöspäin aiheuttaen rakennuksen yläosiin ylipainetta ja alaosiin alipainetta. Paineeron suuruuteen vaikuttavat lämpötilaero, tarkastelukorkeus ja ilmavuotojen jakautuminen. Ilmiötä kutsutaan hormivaikutukseksi tai savupiippuilmiöksi (engl. stack effect). (Hagentoft 2001)

Ilmamassan aiheuttama hydrostaattinen paine  $p_z$  [Pa] korkeudella  $z$  [m] tarkasteltavasta vertailutasosta  $z_0$  lasketaan kaavalla

$$p_z = p_0 - \rho_a \cdot g \cdot z \quad (3.10)$$

missä

$p_z$  = ilmanpaine tarkastelukorkeudella [Pa]

$p_0$  = ilmapaine vertailutasolla [Pa]

$\rho_a$  = ilman tiheys [ $\text{kg/m}^3$ ]

$g$  = putoamiskiihtyvyyys ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )

$z$  = korkeus vertailutasosta [m].

Lämpötilaerosta aiheutuvien paine-erojen laskennassa vertailutasona on hyödyllistä käyttää ns. neutraaliakselia (NA, punainen katkoviiva, ks. kuva 3.12 ja kuva 3.15). Neutraaliakselilla paine-ero rakenteen yli on nolla ja sen korkeusasema rakennuksessa riippuu vaipan ilmavuotojen jakautumisesta. Neutraaliakselin paikka voidaan määrittää vaipan yli eri korkeuksilta tehtävillä paine-eromittauksilla, mutta sen sijainti vaihtelee rakennuksesta ja ympäröivistä olosuhteista riippuen. Olettamalla ilmavuotojen jakautuvan tasaisesti rakennuksessa, neutraaliakseli sijaitsee vapaan ilmatilan korkeuden puolivälissä (Hagentoft 2001).

Etäisyydellä  $z_{NA}$  [m] neutraaliakselista, rakennuksen vaipan yli vallitseva paine-ero  $\Delta P_T$  [Pa] lasketaan kaavalla

$$\Delta P_T = p_{z_{NA},i} - p_{z_{NA},e} = \rho_{a,e} \cdot g \cdot z_{NA} - \rho_{a,i} \cdot g \cdot z_{NA} \quad (3.11)$$

missä

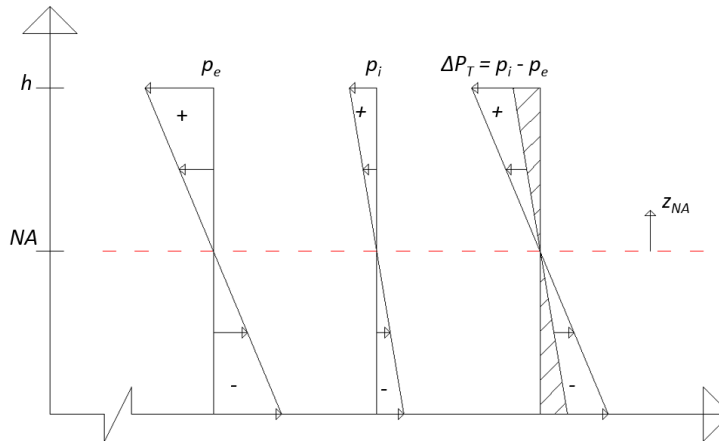
$\Delta P_T$  = paine-ero rakennuksen vaipan yli [Pa]

$\rho_{a,e}$  = ulkoilman tiheys [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$\rho_{a,i}$  = sisäilman tiheys [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$z_{NA}$  = etäisyys neutraaliakselilta [m] (positiivinen suunta ylöspäin).

Neutraaliakselista määritettävän etäisyyden  $z_{NA}$  positiivinen suunta on ylöspäin, jolloin kaava (3.11) tuottaa neutraaliakselin yläpuolella positiivisia paine-eron arvoja (sisäpuolinen ylipaine), kun sisäilma on ulkoilmaa lämpimämpää. Kuvassa 3.12 on esitetty lämpötilaerosta aiheutuvan paine-eron muodostuminen rakenteen yli.



**Kuva 3.12.** Lämpötilaerosta aiheutuva paine-ero.

Sijoittamalla kaavaan (3.11) ideaalikaasun tilanyhtälö (kaava (2.1)), saadaan lämpötilasta johtuvan paine-eron kaavaksi

$$\Delta P_T = \frac{P_{atm} \cdot M_a}{R} \cdot g \cdot z_{NA} \cdot \left( \frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_i} \right) \quad (3.12)$$

missä

$\Delta P_T$  = paine-ero lämpötilaerosta [Pa]

$P_{atm}$  = ilmakehän normaali ilmanpaine (101325 Pa)

$M_a$  = ilman moolimassa (28,96 kg/kmol)

$R$  = yleinen kaasuvakio (8314,5 J/(kmol·K))

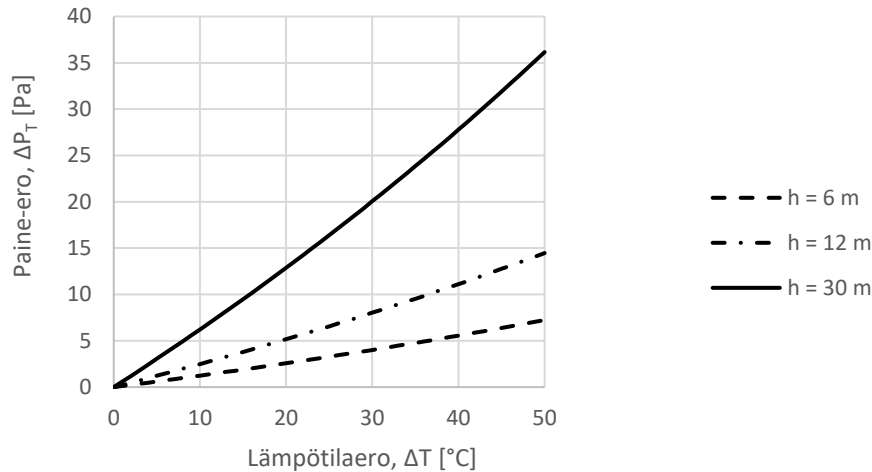
$g$  = putoamiskiikkyvyys (9,81 m/s<sup>2</sup>)

$z_{NA}$  = etäisyys neutraaliakselilta [m] (positiivinen suunta ylöspäin)

$T_e$  = ulkoilman lämpötila [K]

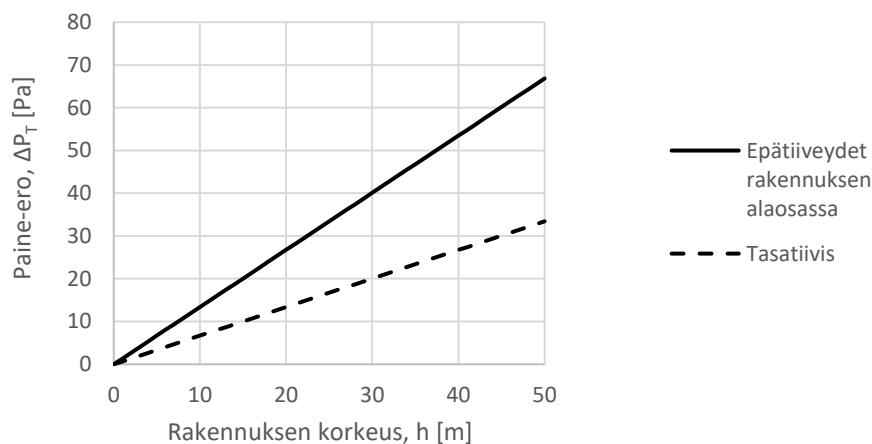
$T_i$  = sisäilman lämpötila [K].

Kuvassa 3.13 on esitetty tasatiiviiden 6 m, 12 m ja 30 m korkeiden rakennusten vaipan yli lämpötilaerosta aiheutuva paine-ero ulkoilman ja sisäilman välisen lämpötilaeron funktiona. Kuvasta nähdään, että kovalla pakkasella (lämpötilaero 50 °C) tasatiiviissä pientaloissa (korkeus 6 m) lämpötilaerosta aiheutuva paine-ero on enintään noin 7 Pa.



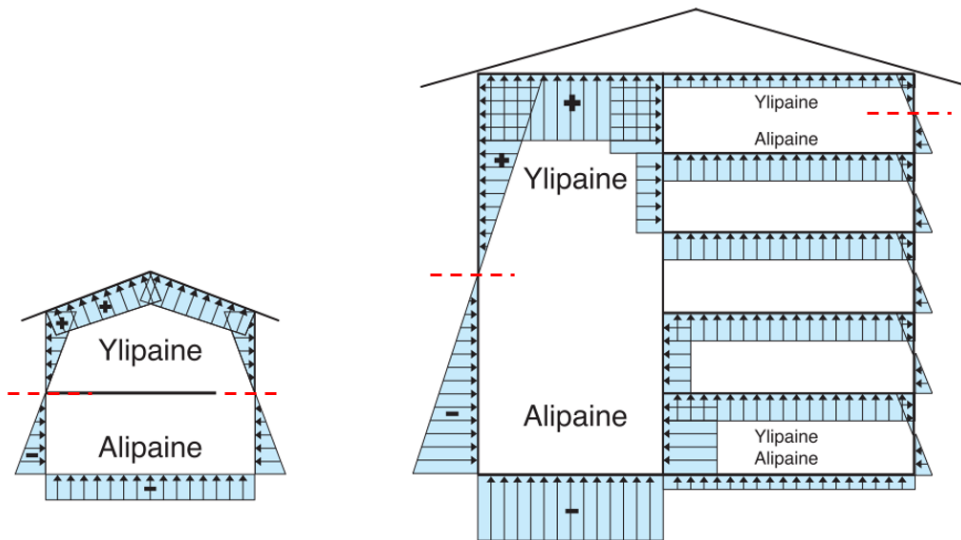
**Kuva 3.13.** Tasatiiviin rakennuksen vaipan yli lämpötilaerosta aiheutuva paine-ero lämpötilaeron funktiona.

Kuvassa 3.14 on esitetty rakennuksen vaipan yli vallitseva paine-ero rakennuksen yläosassa rakennuksen korkeuden funktiona, kun sisä- ja ulkoilman välinen lämpötilaero on 30 °C. Neutraaliakseli on oletettu rakennuksen korkeuden puoleen väliin tasatiiviissä rakennuksessa ja rakennuksen alareunaan, kun rakennuksen alaosa on epätiivis. Alaosaan epätiivisiin rakennuksen yläosien paine-ero (ehjä viiva) kuvaa suurinta mahdollista lämpötilaerosta aiheutuvaa paine-eroa rakennuksessa. Kuvasta nähdään, että korkeissa rakennuksissa savupiippuilmion aiheuttama paine-ero on merkittävä ja tulee ottaa huomioon rakenteita suunniteltaessa.



**Kuva 3.14.** Paine-ero rakennuksen vaipan yli rakennuksen yläosassa, kun sisä- ja ulkoilman välinen lämpötilaero on 30 °C.

Kuvassa 3.15 on esitetty lämpötilaerosta johtuvien paine-erojen muodostumista tasatiiviin rakennuksen eri osissa lämmityskaudella.



**Kuva 3.15.** Sisä- ja ulkoilman välisen lämpötilaeron aiheuttama paine-erojakauma rakennuksen vaipan yli lämmityskaudella. Muokattu lähteestä (RIL 107-2012)

Kuvasta 3.15 nähdään, että kerrostaloissa asuntojen ja porrashuoneen välisen seinän ilmatiiveydellä on suuri merkitys asuntojen ulkoseinien yli vallitsevaan paine-eroon. Jos seinä ei ole tiivis, ulkoseinän yli vallitsee porrashuoneen kaltainen paine-ero. Lämmityskaudella paine-eron seurauksena alimpien kerrosten asuntoihin vuotaa enemmän kylmää ulkoilmaa. Ylimmissä kerroksissa suuremman ylipaineen seurauksena vaipan rakenteille aiheutuu ilmavuodoista suurempia kosteusrasituksia.

Kuvassa 3.16 on esitetty 6 metriä korkean, tasatiiviin rakennuksen yläosaan lämpötilaerosta aiheutuva paine-ero, kun sisäilman lämpötila on 21 °C. Ulkoilman lämpötilana on käytetty Jokioisilla vuonna 2004 mitattuja arvoja.





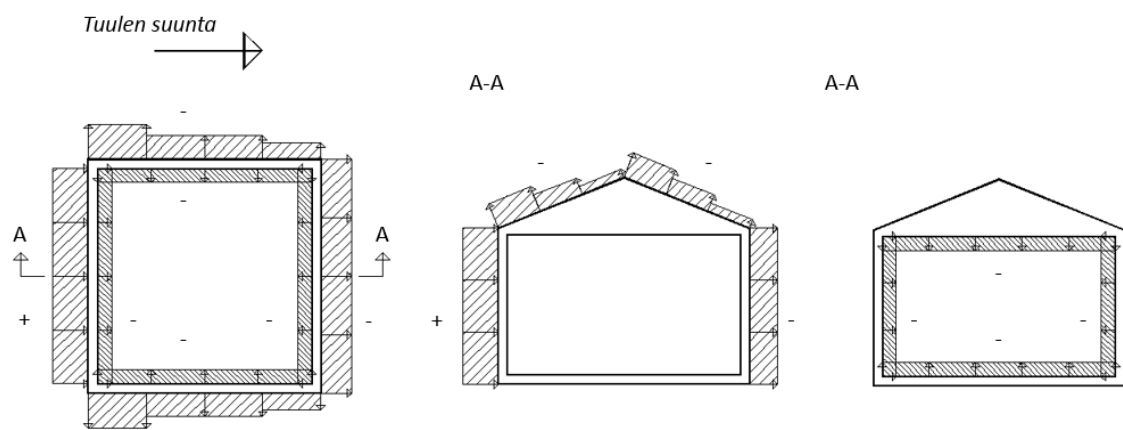
**Kuva 3.16.** Lämpötilaerosta aiheutuva paine-ero 6 m korkean, tasatiiviin rakennuksen yläosassa Jokioisilla vuonna 2004.

Lämpötilaerosta aiheutuva paine-ero vaihteli välillä -0,8...6,5 Pa.

### Ilmanpaine-ero tuulesta

Tuuli aiheuttaa rakennuksen ulkopuolelle painealueita. Rakennuksen huokoisuuden ja ilmavuotojen seurauksena tuulesta aiheutuu painealueita myös rakennuksen sisäpintoihin. Tuulenpaineen voimakkuus riippuu tuulen nopeudesta ja suunnasta, pinnan suunnasta sekä ilman tiheydestä.

Kuvassa 3.17 on havainnollistettu tuulesta rakennuksen pinnoille syntyviä painealueita. Painealueiden yhteyteen on lisätty painekertoimien tyypilliset etumerkit. Esimerkiksi tuulen vastaiselle seinälle tuuli aiheuttaa ulkopintaan ylipaineen (+), mutta sisäpintaan alipaineen (-).



**Kuva 3.17.** Tuulenpainealueet ja tuulenpainekertoimien etumerkit. Leikkauksissa (A-A) vasemmalla rakennuksen ulkopuoliset painealueet ja oikealla sisäpuoliset.

Tuulenpaine tarkasteltavaan pintaan lasketaan Bernoullin laista johdetulla yhtälöllä (ASHRAE Handbook 2017)

$$\Delta P_W = (c_{p,i} - c_{p,e}) \cdot \frac{\rho_a \cdot v_{mod}^2}{2} \quad (3.13)$$

missä

$\Delta P_W$  = paine-ero tuulesta [Pa]

$c_{p,i}$  = sisäpinnan tuulenpainekerroin [-]

$c_{p,e}$  = ulkopinnan tuulenpainekerroin [-]

$\rho_a$  = ilman tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

$v_{mod}$  = modifioitu tuulen nopeus [m/s].

Tässä diplomityössä tuulenpaineen laskennassa ilman tiheydelle  $\rho_a$  on käytetty vakioarvoa 1,25 kg/m<sup>3</sup>. Tuulenpainekerroin  $c_p$  [-] ilmoittaa tuulesta rakenteen pintaan aiheutuvan dynaamisen paineen ja vapaan virtauksen dynaamisen paineen välisen suhteen (Etheridge & Sandberg 1996). Ulko- ja sisäpinnan tuulenpainekertoimien määrittystä on käsitelty myöhemmin tässä alaluvussa. Tuulen nopeutta tarkasteltavassa tilanteessa kuvataan modifioitun tuulen nopeuden  $v_{mod}$  [m/s] avulla. Tuulen aiheuttaman viistosateen intensiteetin määrittämisestä poiketen (ks. alaluku 3.3.4), tuulen aiheuttaman paine-eron määrittämisessä ei oteta huomioon tuulen seinän normaalin suuntaisen komponentin suuruutta. Tuulen suunnan vaihtelusta aiheutuva paine-eron muuttuminen otetaan huomioon painekertoimien määrittämisessä.

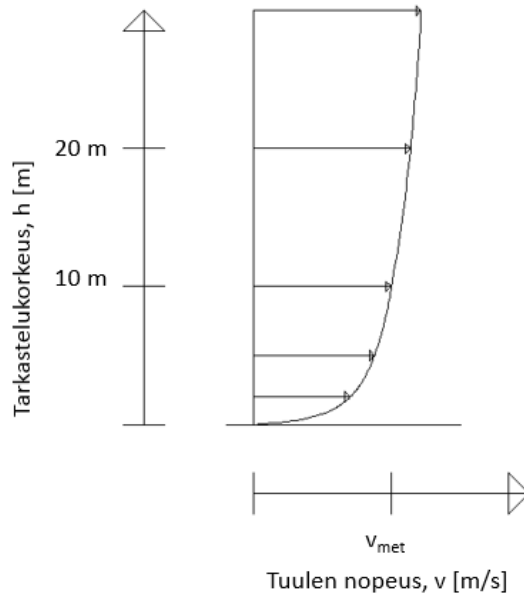
### Modifioitu tuulennopeus

Tuulen nopeus vaihtelee merkittävästi riippuen tarkastelukorkeudesta sekä tarkasteltavan paikan ympäristöstä. Ellei tarkastella tiettyä kohdetta, jonka tuulen nopeus tiedot tunnetaan, käytetään tuulelle sääasemalla mitattuja tietoja.

Sääasemalla tuulen nopeus  $v_{met}$  [m/s] ja suunta  $\alpha_{wind}$  [°] mitataan 10 metrin korkeudesta. Mittauspaikan tulee olla tasainen ja avoin siten, että esteiden etäisyys mittauspai- kasta on vähintään 10 kertaa esteiden korkeus. Säätiedoissa tuulen nopeus ja suunta ilmoitetaan 10 – 60 minuutin pituisten mittausjaksojen keskiarvoina. (*Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation* 2017) Mittauspaikan ympäristö vastaa standardin SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1 (2011) maastoluokkaa II ja lähteen ASHRAE Handbook (2017) maastoluokkaa 3.

Hetkellinen tuulen nopeus voi poiketa merkittävästi tuulen nopeuden keskiarvosta mit- tausjakson sisällä. Tämä tulee ottaa huomioon rakenteiden kuormia määritettäessä, mutta ilmapuotojen laskennassa voidaan käyttää tuulen nopeuden keskiarvoja. (ASHRAE Handbook 2017) Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa käytettävissä säädätiedostoissa tuulen nopeuden ja suunnan mittausjakson pituutena on käytetty yhtä tuntia.

Tyypillisesti modifioidun tuulen nopeuden arvoon vaikuttavat tarkastelukorkeus ja ympäristö. Rosoisessa ympäristössä tuulen nopeus on pienempi kuin vastaavalla korkeudella tasaisessa ympäristössä. Kuvassa 3.18 on esitetty tuulen nopeusprofiili mittaustaikojen olosuhteissa. Kuvasta nähdään, että tuulen nopeus kasvaa, kun tarkastelukorkeus kasvaa.



**Kuva 3.18.** Tuulen nopeusprofiili mittaustaikojen olosuhteissa.

Tässä alaluvussa esiteltävät kolme erilaista modifioidun tuulen nopeuden laskentamenetelmää perustuvat lähteisiin (Hagentoft 2001, SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1 2011, ASHRAE Handbook 2017). Taulukossa 3.7 on esitetty kohdan 3.1.1 tarkasteltavan rakennuksen kuvauksen perusteella valitut maastoluokat modifioidun tuulen nopeuden lasketaan. Tarkasteltava rakennus ei välttämättä sijaitse maastoluokan kuvauksen mukaisessa maastossa, mutta rakennukselle tulee käyttää tasaisempaa maastoluokkaa, mikäli maaston rosoisuus muuttuu sen läheisyydessä (SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1 2011).

**Taulukko 3.7.** Maastoluokat ja maastoluokkien kuvaukset.

Lähde	Maastoluokka	Maastoluokan kuvaus
Hagentoft	-	Avoin, tasainen maasto
ASHRAE Handbook (2017)	4	Tasainen, esteetön alue, joka altistuu vähintään 1,6 km veden päällä virtaavalle tuulelle ja on enintään 10 kertaa rakennuksen korkeuden etäisyydellä sisämaassa (etäisyys kuitenkin vähintään 460 m).
SFS-EN 1991-1-4	I	Järvet tai tasanko, jolla on enintään vähäistä kasvillisuutta.

Lähteessä (Hagentoft 2001) modifioidun tuulen nopeuden laskentaan on esitetty kaava

$$v_{mod,Hagentoft} = v_{met} \cdot k \cdot h^a \quad (3.14)$$

missä

$v_{mod,Hagentoft}$	= modifioitu tuulen nopeus [m/s]
$v_{met}$	= mitattu tuulen nopeus [m/s]
$k$	= kerroin [-]
$h$	= tarkastelukorkeus [-]
$a$	= eksponentti [-]

Tässä diplomityössä tarkasteltavan rakennuksen lähtötietojen perusteella kaavassa (3.14) tulee käyttää kertoimena  $k$  arvoa 0.68 ja eksponenttina  $a$  arvoa 0,17. (Hagentoft 2001)

Vastaavasti lähteessä (ASHRAE Handbook 2017) modifioidulle tuulen nopeudelle on esitetty kaava

$$v_{mod,ASHRAE} = v_{met} \cdot \left(\frac{\delta_{met}}{h_{met}}\right)^{a_{met}} \cdot \left(\frac{h}{\delta}\right)^a \quad (3.15)$$

missä

$v_{mod,ASHRAE}$	= modifioitu tuulen nopeus [m/s]
$v_{met}$	= mitattu tuulen nopeus [m/s]
$\delta_{met}$	= sääaseman maaston mukainen ilmakehän rajakerroksen paksuus [m]
$h_{met}$	= sääaseman tuulennopeuden mittauskorkeus [-]
$a_{met}$	= sääaseman maaston mukainen eksponentti [-]
$h$	= tarkastelukorkeus [-]
$\delta$	= tarkasteltavan maaston mukainen ilmakehän rajakerroksen paksuus [m]
$a$	= tarkasteltavan maaston mukainen eksponentti [-].

ASHRAE Handbook (2017) mukaan sääaseman maaston mukaisena ilmakehän rajakerroksen paksuutena käytetään 270 m ja eksponenttina arvoa 0,14. Tarkasteltavan rakennuksen ympäristön vastaavina parametreina käytetään arvoja 210 m ja 0,10.

Standardissa SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1 modifioidun tuulen nopeuden laskentaan on esitetty kaava

$$v_{mod,EN} = v_{met} \cdot c_o \cdot c_r(h) \quad (3.16)$$

missä

$v_{mod,EN}$	= modifioitu tuulen nopeus [m/s]
$v_{met}$	= mitattu tuulen nopeus [m/s]
$c_o$	= maaston pinnan muotokerroin [-]
$c_r(h)$	= maaston rosoisuuskerroin [-].

Maaston pinnan muotokertoimena käytetään arvoa 1,0. Rosoisuuskertoimella huomioidaan tarkasteltavan rakenteen sijainnista ja ympäristöstä riippuva tuulen nopeuden vaihtelu. Standardin SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1 (2011) mukaan rosoisuuskerroin lasketaan kaavalla

$$c_r(h) = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0.07} \cdot \ln\left(\frac{h}{z_0}\right) \quad , \text{ kun } z_{min} \leq h \leq z_{max} \quad (3.17)$$

$$c_r(h) = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0.07} \cdot \ln\left(\frac{z_{min}}{z_0}\right) \quad , \text{ kun } h \leq z_{min}$$

missä

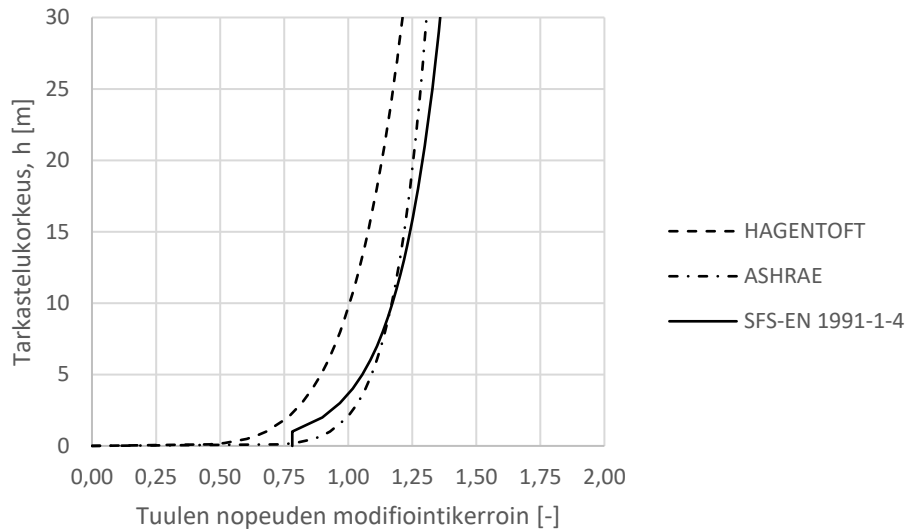
- $c_r$  = maaston rosoisuuskerroin [-]  
 $h$  = tarkastelukorkeus [m]  
 $z_0$  = rosoisuusmitta [m]  
 $z_{0,II}$  = rosoisuusmitta maastoluokassa II [m]  
 $z_{min}$  = minimikorkeus [m]  
 $z_{max}$  = maksimikorkeus (200 m)

Kaavassa (3.17) esiintyvät maastoparametrit saadaan taulukosta 3.8.

**Taulukko 3.8.** Maastoluokat ja maastoparametrit. (SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1 2011)

Maastoluokka	$z_0$ m	$z_{min}$ m
0 Avomeri tai merelle avoin rannikko	0,003	1
I Järvet tai tasanko, jolla on enintään vähäistä kasvillisuutta eikä tuuliesteitä	0,01	1
II Alue, jolla on matalaa heinää tai siihen verrattavaa kasvillisuutta ja erillisiä esteitä (puita, rakennuksia), joiden etäisyys toisistaan on vähintään 20 kertaa esteen korkeus	0,05	2
III Alueet, joilla on säännöllinen kasvipeite tai rakennuksia tai erillisiä tuuliesteitä, joiden keskinäinen etäisyys on enintään 20 kertaa esteen korkeus (kuten kylät, esikaupunkialueet, pysyvät metsä)	0,3	5
IV Alueet, joiden pinta-alasta vähintään 15 % on rakennusten peitossa ja niiden keskimääräinen korkeus ylittää 15 m	1,0	10

Kuvassa 3.19 on esitetty eri menetelmillä laskettu tuulen nopeuden modifiointikerroin tarkastelukorkeuden funktiona. Tuulen nopeuden modifiointikertoimella tarkoitetaan yhtä lukua, jolla sääasemalla mitattu tuulen nopeus kerrotaan, että saadaan tuulen nopeus tarkasteltavassa tilanteessa.



**Kuva 3.19.** Tuulen nopeuden modifiointikerroin tarkastelukorkeuden funktiona.

Kuvasta 3.19 nähdään, että lähteen (Hagentoft 2001) mukainen tuulen nopeuden modifiointimenetelmä tuottaa pienempiä tuulen nopeuksia kuin lähteiden (SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1 2011) ja (ASHRAE Handbook 2017) mukaiset menetelmät. Ero johtuu siitä, että lähteen (Hagentoft 2001) menetelmän tasaisin maastoluokka ei ole yhtä tasainen kuin vertailtavien menetelmien maastoluokat. Standardin SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1 (2011) mukainen menetelmä tuottaa hieman lähdeä (ASHRAE Handbook 2017) pienempiä tuulen nopeuden modifiointikertoimia, kun tarkastelukorkeus on alle 10 metriä. Paineerojen laskentaa varten tuulen nopeuden modifiointi tehtiin standardin SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1 (2011) mukaisella menetelmällä, koska se on menetelmistä tunnetuin suomalaisten rakennesuunnittelijoiden keskuudessa.

### Ulkopinnan painekerroin

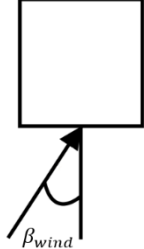
Ulkopinnan tuulenpainekertoimien arvot riippuvat useista muuttujista, kuten tuulen suunnasta ja nopeudesta, tarkastelupisteen sijainnista, rakennuksen muodosta sekä ympäristön esteistä. Tarkkojen tuulenpainekertoimien määrittäminen vaatisi kenttämittauksia, tuulitunnelikokeita tai CFD-simulointia. (ASHRAE Handbook 2017) Tarkkojen tuulenpainekertoimien määrittäminen ei ole kuitenkaan käytännöllistä toteuttaa tai tarpeellisia tutkittaessa yleisiä tapauksia, mikä johtaa yleensä yksinkertaisten menetelmien, kuten taulukoiden tai analyyttisten kaavojen käyttöön.

Pientalojen likimääräisiä ulkopinnan tuulenpainekertoimien arvoja ja kaavoja on esitetty useissa lähteissä. Tässä alaluvussa on vertailtu lähteissä (SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1 2011) ja (Liddament 1996) esitettyjä taulukoituja tuulenpainekertoimien arvoja sekä lähteessä (Swami & Chandra 1987) esitettyä analyyttistä tuulenpainekertoimien laskenta-kaavaa.

Standardissa SFS-EN 1991-1-4+AC+A1 (2011) pystyseiniä tuulenpainekertoimet on ilmoitettu seinän normaalin ja tuulen suunnan välisen kulman  $\beta_{wind}$  mukaan  $90^\circ$  välein. Tuulensuuntaiset seinät on jaettu kolmeen tuulenpainalueeseen. Taulukossa 3.9 on esitetty standardin SFS-EN 1991-1-4+AC+A1 (2011) mukaan määritetyt ulkopinnan tuulenpainekertoimet rakenneosalle  $c_{p,e,10}$  [-] ja rakenneyksityiskohdalle  $c_{p,e,1}$  [-]. Tuulensuuntaiselle seinälle on käytetty rakenneosan tapauksessa keskimääräisen painealueen kerrointa ja rakenneyksityiskohdan tapauksessa nurkan painealueen kerrointa.

**Taulukko 3.9.** Tuulenpainekertoimet standardissa SFS-EN 1991-1-4+AC+A1 (2011)

$\beta_{wind}$ [°]	$c_{p,e,10}$ [-]	$c_{p,e,1}$ [-]
0	+ 0,8	+ 1,0
90	- 0,8	- 1,4
180	- 0,5	- 0,5



Kansainvälisen energiajärjestön ilmapuoto ja ilmanvaihto yksikön (engl. Air Infiltration and Ventilation Centre, AIVC) oppaassa seinän ulkopinnan keskimääräiset painekertoimet on ilmoitettu seinän normaalin ja tuulen suunnan välisen kulman  $\beta_{wind}$  mukaan  $45^\circ$  välein. Taulukossa 3.10 on esitetty enintään 3 kerroksisen pientalon ulkopinnan keskimääräiset tuulenpainekertoimet, kun rakennuksen pituuden ja leveyden suhde on 1:1 ja rakennuksen ympäristö on esteetön (Liddament 1996).

**Taulukko 3.10.** Tuulenpainekertoimet lähteen (Liddament 1996) mukaan.

$\beta_{wind}$ [°]	$c_{p,e}$ [-]
0	+ 0,7
45	+ 0,35
90	- 0,5
135	- 0,4
180	- 0,2

Swami ja Chandra (1987) kokosivat pientalojen tuulenpainekertoimia tuulitunneli- ja kenttäkokeilla käsiteltyjen tutkimusten tuloksia. He sovittivat tutkimusten tuloksiin käyrän, jolla pystytään laskemaan ulkopinnan keskimääräinen tuulenpainekerroin seinän normaalin ja tuulen suunnan välisen kulman funktiona (kaava 3.18).

$$\begin{aligned}
c_{p,e} = c_{p,0} \cdot \ln & \left( 1.248 - 0.703 \cdot \sin\left(\frac{\beta_{wind}}{2}\right) - 1.175 \cdot (\sin(\beta_{wind}))^2 \right. \\
& + 0.131 \cdot (\sin(2 \cdot \beta_{wind} \cdot G))^2 + 0.769 \cdot \cos\left(\frac{\beta_{wind}}{2}\right) \\
& \left. + 0.071 \cdot G \cdot \left(\sin\left(\frac{\beta_{wind}}{2}\right)\right)^2 + 0.717 \cdot \left(\cos\left(\frac{\beta_{wind}}{2}\right)\right)^2 \right) \quad (3.18)
\end{aligned}$$

missä

$c_p$  = tuulenpainekerroin [-]

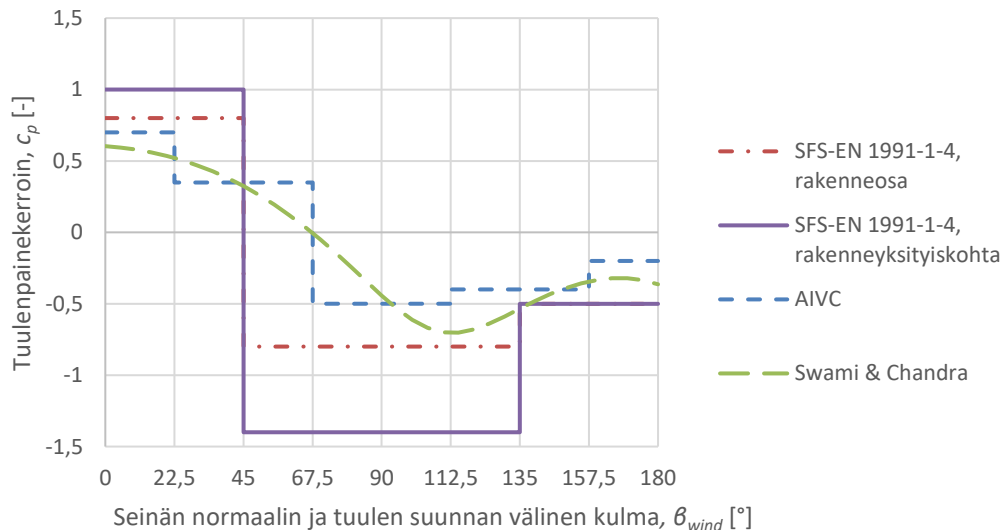
$c_{p,0}$  = tuulenpainekerroin, kun tuuli suoraan seinää vasten [-]

$\beta_{wind}$  = seinän normaalin ja tuulen suunnan välinen kulma [°]

$G$  = luonnollinen logaritmi seinäsuhde [-]

Rakennuksen seinäsuhde tarkoittaa tuulenpuoleisen seinän leveyden suhdetta rakennuksen tuulen suuntaisen seinän pituuteen. Diplomityössä tarkasteltavan rakennuksen seinäsuhde on 1,0. Kohtisuoraan seinää vasten puhaltavan tuulen tuulenpainekertoimena  $c_{p,0}$  suositellaan käytettäväksi kaikkien tutkittujen mittaustulosten keskiarvoa 0.6 (Swami & Chandra 1987).

Kuvassa 3.20 on esitetty vertailtavien menetelmien tuulenpainekertoimien arvot seinän normaalin ja tuulensuunnan välisen kulman funktiona. Taulukkoarvojen välisiä arvoja ei ole interpoloitu, vaan painekertoimet on jaettu osiin taulukoitujen arvojen puolesta välistä.



**Kuva 3.20.** Tuulenpainekertoimet seinän normaalin ja tuulen suunnan välisen kulman funktiona.

Kuvasta 3.20 havaitaan, että lähteen (Liddament 1996) mukaiset ulkopintojen keskimääräiset tuulenpainekertoimet ovat lähellä lähteen (Swami & Chandra 1987) kaavan arvoja



45° välein. Lähteen (Liddament 1996) taulukkoarvojen interpoloinnilla päästäisi siis vielä parempaan vastaavuuteen lähteen (Swami & Chandra 1987) mukaan laskettujen arvojen kanssa. Standardissa SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1 (2011) esitetyt rakenneosan tuulenpainekertoimien arvot ovat itseisarvoltaan suurempia kuin lähteessä (Liddament 1996) esitetyt ja lähteen (Swami & Chandra 1987) mukaan lasketut ulkopintojen keskimääräiset tuulenpainekertoimien arvot.

Menetelmien välillä esiintyy eroa, kun seinän normaalin ja tuulen suunnan välinen kulma  $\beta_{wind}$  on 45-67,5°. Standardin SFS-EN 1991-1-4+AC+A1 (2011) mukaan tarkasteltavan seinän tuulenpainekerroin on negatiivinen, mutta lähteiden (Liddament 1996) ja (Swami & Chandra 1987) mukaan tuulenpainekerroin on positiivinen. Ero johtuu siitä, että standardissa ei ole taulukoitu väliarvoja.

### Sisäpinnan painekerroin

Sen lisäksi, että tuuli aiheuttaa painealueita rakennuksen ulkopintoihin, rakennuksen vaipan huokoisuuden ja ilmavuotojen seurauksena tuuli aiheuttaa paineen rakennuksen sisäpintoihin. Ilman tasapainoyhtälön mukaan rakennukseen sisään ja rakennuksesta ulos virtaavien ilmamäärien tulee olla yhtä suuria. Sisäpinnan painekertoimen määrittämisessä oletetaan, että sisä- ja ulkoilma ovat samassa lämpötilassa, jolloin rakennuksen vaipan yli ei vallitse paine-eroa lämpötilaerosta ja rakennukseen sisään virtaava ilma ei lämpene ja laajene rakennuksen sisällä. (Arfvidsson et al. 2017)

Vaipan ilmapitävyyden yhteydessä esitettiin kaava (3.7), jossa käytettiin ilman virtauskerrointa  $C$  [ $\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{Pa}^n)$ ]. Sisäpinnan painekertoimen määrittämistä varten käytetään ilman virtauskerrointa vastaava kerrointa  $K$  [ $\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{Pa})$ ], jolla päästään eroon ilman virtausekspONENTISTA  $n$  [-] (Arfvidsson et al. 2017). Kertoimen  $K$  arvo tietyllä paine-erolla lasketaan kaavalla (3.19), kun tunnetaan rakennuksen ilmanvuotoluku ( $q_{50}$ ), vaipan pinta-ala ja paine-ero rakennuksen vaipan yli.

$$K = q_{50} \cdot \frac{|\Delta P|^{n-1}}{50^n} \cdot A_{vaippa} \quad (3.19)$$

missä

$K$	= kerroin tietyllä paine-erolla [ $\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{Pa})$ ]
$q_{50}$	= rakennuksen ilmanvuotoluku vaipan pinta-alan suhteen [ $\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ]
$\Delta P$	= paine-ero rakennuksen vaipan yli [Pa]
$n$	= virtausekspONENTTI [-]
$A_{vaippa}$	= rakennuksen vaipan pinta-ala [ $\text{m}^2$ ]

Kaava (3.7) voidaan kirjoittaa nyt muodossa

$$R = K \cdot \Delta P \quad (3.20)$$

missä

$R$  = vuotoilmavirta tietyllä paine-erolla [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]

$K$  = kerroin [ $\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{Pa})$ ]

$\Delta P$  = paine-ero rakennuksen vaipan yli [Pa]

Toisin kuin ilmatiiveyden mittauksessa, paine-ero rakennuksen vaipan eri osissa vaihtelee, koska ulkopinnan tuulenpainekertoimet vaihtelevat rakennuksen eri osissa. Tästä syystä jokainen erilainen painealue tulee huomioida erikseen. Käyttämällä kaavassa (3.20) paine-erona kaavan (3.13) mukaista tuulen aiheuttamaa paine-eroa, ilman tasapainoyhtälö voidaan kirjoittaa painealueiden vuotoilmavirtojen summana muotoon

$$\sum R = \sum (K \cdot \Delta P_W) = \sum (K \cdot (c_{p,i} - c_{p,e}) \cdot p_{w,0}) \quad (3.21)$$

missä

$R$  = painealueen vuotoilmavirta [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]

$K$  = kerroin [ $\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{Pa})$ ]

$\Delta P_W$  = paine-ero tuulesta [Pa]

$c_{p,i}$  = sisäpinnan tuulenpainekerroin [-]

$c_{p,e}$  = ulkopinnan tuulenpainekerroin [-]

$p_{w,0}$  = vapaan tuulen virtauksen dynaaminen paine [Pa]

Koska rakennukseen sisään ja rakennuksesta ulos virtaavien ilmamäärien tulee olla yhtä suuria, vuotoilmavirtojen summan tulee olla  $0 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Sisäpinnan painekertoimelle saadaan kaavasta (3.21) yhtälö

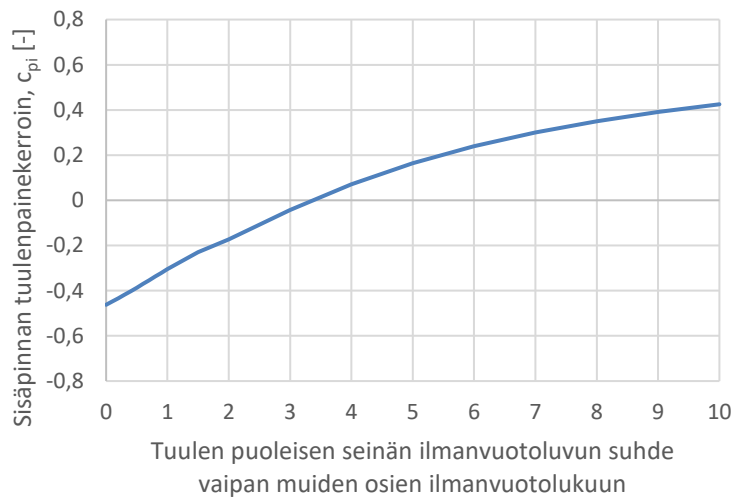
$$c_{p,i} = \frac{\sum (K \cdot c_{p,e} \cdot p_{w,0})}{\sum (K \cdot p_{w,0})} \quad (3.22)$$

Kuten kaavasta (3.19) nähdään, rakennuksen vaipan yli vallitseva paine-ero vaikuttaa kertoimen  $K$  arvoon ellei virtausekspONENTIN  $n$  arvo ole 1. Kertoimen  $K$  arvo taas vaikuttaa sisäpinnan painekertoimeen kaavan (3.22) mukaan. Sisäpinnan tuulenpainekertoimen määrittäminen on tästä syystä tehtävä iteratiivisesti.

Käytetään esimerkkinä 2-kerroksista rakennusta, joka mitat ovat  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 6 \text{ m}$  (pituus  $\times$  leveys  $\times$  korkeus) ja ilmavuodot ovat jakautuneet tasaisesti rakennuksen seiniin ja yläpohjaan. Alapohja on oletettu tiiviiksi (Arfvidsson et al. 2017). Rakennuksen ulkopinnan painekertoimina käytetään lähteen (Liddament 1996) mukaisia seinien keskimääräisiä arvoja. Seinien painekertoimet on esitetty taulukossa 3.10 ja katon ulkopinnan painekertoimena käytettiin arvoa  $-0.5$ . Käyttämällä virtausekspONENTTINA arvoa  $0,67$  ja vapaan tuulen virtauksen dynaamisena paineena  $1,0 \text{ kPa}$ , kaavalla (3.22) sisäpinnan tuulenpainekertoimeksi laskettiin  $-0.31$ .

Hagentoftin (2001) mukaan sisäpinnan tuulenpainekerroin on likimäärin  $-0,3$ , kun ilmapuodot ovat jakautuneet tasaisesti rakennuksessa. Lähteessä (Hagentoft 2001) esitettyjä ulkopinnan tuulenpainekertoimilla esimerkkirakennuksen sisäpinnan tuulenpainekertoimeksi laskettiin  $-0,33$ .

Kaavalla (3.22) voidaan ottaa huomioon myös ilmapuotojen esiintyminen painealueissa ilman virtauskertoimen avulla. Kuvassa 3.21 on esitetty sisäpinnan tuulenpainekerroin, kun esimerkkirakennuksen tuulen puoleisen seinän ilmanläpäisevyyttä on muutettu suhteessa muiden seinien ilmanläpäisevyyteen.



**Kuva 3.21.** Esimerkkirakennuksen sisäpinnan tuulenpainekerroin tuulenpuoleisen seinän ilmanvuotoluvun funktiona.

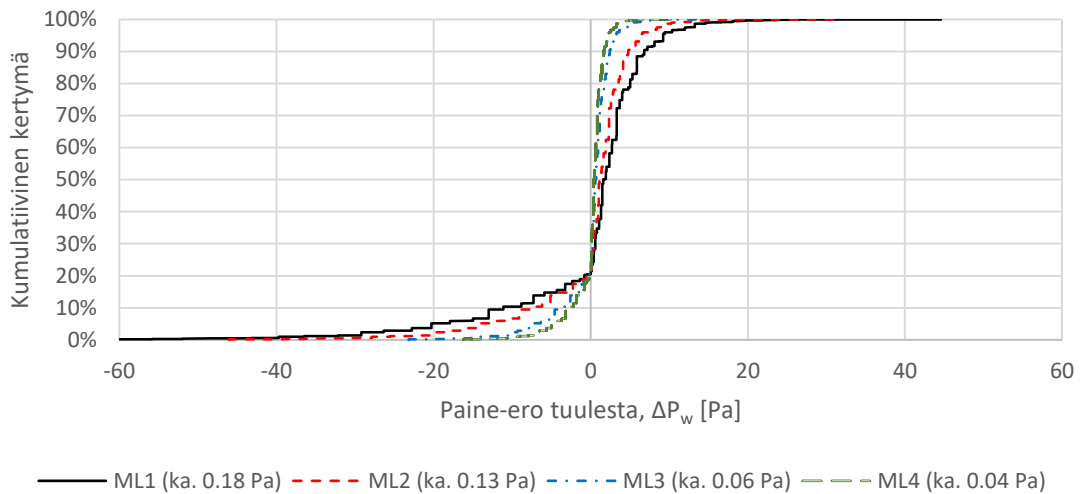
Kuvasta 3.21 nähdään, että sisäpintojen tuulenpainekerroin muuttuu välillä  $-0,5 \dots +0,4$ , kun tuulen puoleisen seinän ilmanvuotoluvun suhde muiden seinien ilmanvuotolukuun vaihtelee välillä  $0 \dots 10$ . Sisäpintojen tuulenpainekerroin muuttuu positiiviseksi, kun tuulenpuoleisen seinän ilmanvuotoluvun suhde vaipan muiden seinien ilmanvuotolukuun on suurempi kuin  $3,4$ . Epäviiveyksien jakautumisella vaipassa voi olla siis merkittävä vaikutus rakennuksen painesuhteisiin.

### Painekertoimien valinta

Ulkopinnan ja sisäpinnan painekertoimia on valittavissa useita eri vaihtoehtoja ja valinta on tehtävä aina tilanne kohtaisesti. Seuraavassa on vertailtu maastoluokan ja painekertoimien valinnan vaikutusta tarkasteltavan seinän yli vallitsevaan paine-eroon.

Kuvassa 3.22 on esitetty maastoluokan valinnan vaikutus 6 m korkean pohjoisseinän yläreunan yli vallitsevan paine-eron kertymään, kun sisäpinnan painekertoimena  $c_{p,i}$  käytetään vakioarvoa  $-0,3$ . Kuvassa on myös esitetty pohjoisseinän yli vallitsevan tuulesta aiheutuvan paine-eron keskiarvo. Paine-eron laskennassa on käytetty taulukon 3.9 mukaisia

rakenneosien tuulenpainekertoimia  $c_{p,e,10}$ . Modifioidut tuulen nopeudet eri maastoluokissa on laskettu lähteen (SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1 2011) mukaan.



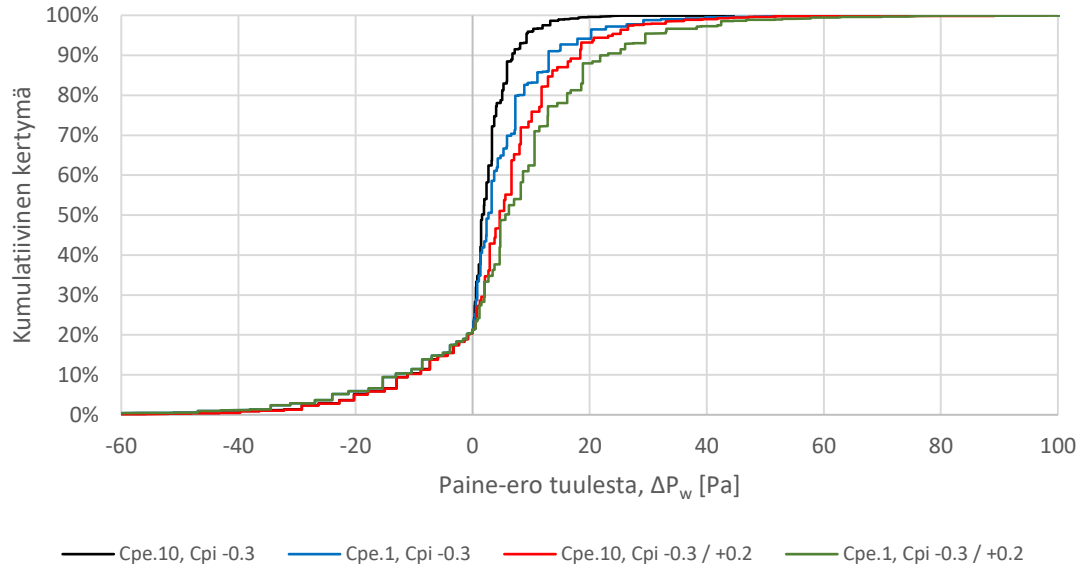
**Kuva 3.22.** Tuulesta aiheutuva paine-eron kertymä 6 m korkealla pohjoisseinällä Jokioilla vuonna 2004. Muuttujana maastoluokka. Ulkopinnan painekertoimet rakenneosalle ja sisäpinnan painekerroin -0.3.

Maastoluokasta riippumatta pohjoisseinän yli vallitsee tuulesta aiheutuva ylipaine 79 % laskentavuoden tunneista. Mikäli tuulen suunta olisi tasaisesti jakautunut, ylipainetuntien odotusarvo olisi 75 % laskentavuoden tunneista. Jokioisten ilmastossa etelästä ja lounaasta puhaltavien tuulten osuus on suuri, mikä vaikuttaa ylipainetuntien määrään.

Rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta kriittinen tilanne syntyy, kun rakenteeseen virtaa kosteutta sisäilman mukana. Ilmavirta on sitä suurempi, mitä suurempi ylipaine sisätiloissa vallitsee. Ulkopinnan painekertoimen lisäksi, paine-eron suuruuteen vaikuttaa sisäpinnan painekerroin ja mahdollisimman suuren tuulesta johtuvan ylipaineen aiheuttamiseksi sisäpinnan painekertoimen tulee olla positiivinen. Kuvan 3.21 mukaan sisäpuolinen painekerroin voi olla positiivinen, kun tuulen puoleinen seinä on epätiivis.

Rakenteen kannalta kriittisen tilanteen kuvaamiseksi sisäpintojen tuulenpainekertoimeksi valittiin +0,2, kun tarkasteltavan seinän ulkopinnan tuulenpainekerroin on negatiivinen ja -0,3, kun tarkasteltavan seinän ulkopinnan tuulenpainekerroin on positiivinen. Valitut sisäpinnan tuulenpainekertoimet ovat samat kuin aukkosuhteeltaan tuntemattoman rakennuksen rakenteiden kestävyuden mitoituksessa standardissa SFS-EN 1991-1-4+AC+A1 (2011) käytettävät sisäpinnan tuulenpainekertoimet.

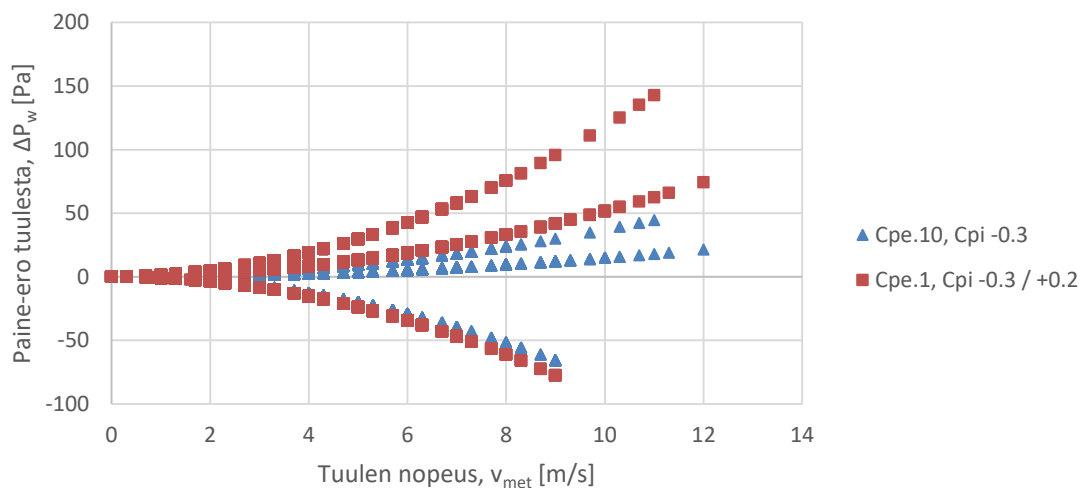
Kuvassa 3.23 on esitetty tuulesta aiheutuvat paine-eron kertymät 6 m korkealle pohjoisseinälle maastoluokassa 1, kun ulkopinnan painekertoimina on käytetty rakenneosien  $c_{p,e,10}$  tai rakenneyksityiskohtien  $c_{p,e,1}$  painekertoimia ja sisäpinnan painokertoimina  $c_{p,i}$  vakioarvoa -0.3 tai ulkopinnan painekertoimen mukaan vaihtelevaa arvoa (-0.3 / +0.2).



**Kuva 3.23.** Tuulesta aiheutuvan paine-eron kertymä 6 m korkealla pohjoisseinällä Jokioisilla vuonna 2004. Muuttujina ulko- ja sisäpinnan painekertoimet. Maastoluokka I.

Painekertoimien muuttaminen ei vaikuta ylipainetilanteiden suhteelliseen osuuteen laskeutavuoden aikana, koska sisäpinnan painekertoimen valinta ei muuta paine-eron suuntaa. Rakennesyksityiskohdan painekertoimen käyttö kasvattaa seinän yli vallitsevan ylipaineen suuruutta rakenneosan painekertoimiin verrattuna. Sisäpinnan painekertoimen valitseminen ulkopinnan painekertoimen mukaan kasvattaa seinän yli vallitsevaa paineroa ylipainetilanteissa.

Kuvassa 3.24 on havainnollistettu painekertoimien valinnan vaikutusta tuulesta aiheutuvaan paine-eroon 6 m korkealla pohjoisseinällä tuulen nopeuden funktiona.



**Kuva 3.24.** Tuulesta aiheutuva paine-ero 6 m korkealle pohjoisseinälle Jokioisilla vuonna 2004. Maastoluokka I.

Kuvasta nähdään, että painekertoimien kriittinen valinta kasvattaa merkittävästi ylipaineen suuruutta. Vaikutus alipaineen suuruuteen ei ole yhtä merkittävä.

Diplomityön ilmapuototarkastelut tehtiin ulkoseinien nurkkaliitoksille, jotka voidaan ajatella rakennetyiskokohdiksi. Ilmapuototarkasteluissa käytettiin taulukossa 3.9 esitettyjä standardin SFS-EN 1991-1-4+AC+A1 (2011) mukaisia rakennetyiskokohdan ulkopuolisia tuulenpainekertoimia, koska ne tuottavat vertailuista menetelmistä eniten sisäpuolisia ylipainetilanteita ja ovat itseisarvoltaan suurimpia tuulenpainekertoimia. Sisäpinnan painekertoimina päädyttiin käyttämään ulkopinnan painekertoimien mukaan vaihtelevia painekertoimia.

Kuvassa 3.25 on esitetty tuulesta aiheutuva paine-ero  $\Delta P_V$  tarkasteltavan rakennuksen pohjoisseinän nurkassa Jokioisilla vuonna 2004.



**Kuva 3.25.** Tuulesta aiheutuvan paine-ero 6 m korkealle pohjoisseinälle Jokioisilla vuonna 2004. Maastoluokka I.

Pohjoisseinän nurkalle tuulesta aiheutuva suurin sisäpuolinen alipaine oli 77 Pa ja ylipaine 142 Pa. Tuulen aiheuttaman paine-eron keskiarvo oli 7,1 Pa sisäpuolista ylipainetta.

Laskentatarkasteluissa käytettävälle paine-erolle ei ole asetettu mitoitusarvoa. Kalamees et al. (2007) tutkimuksen mukaan ilmapuototarkasteluissa tulisi käyttää  $\pm 10$  Pa paine-eroa. ASHRAE standardissa 160 (2016) laskentatarkasteluissa käytettävän paine-eron määrittämiseen on esitetty 2 erilaista tapaa. Paine-ero voidaan laskea ilmanvaihdon, lämpötilaeron ja tuulen aiheuttamien paine-erojen summana tai vaihtoehtoisesti paine-erona käytetään + 5 Pa kun ulkoilman lämpötilan 24 h keskiarvo on alhaisempi kuin sisäilman lämpötila ja - 5Pa, kun ulkoilman lämpötilan 24 h keskiarvo on suurempi kuin sisäilman lämpötila. Vakiopaine-eron lisäksi jälkimmäisessä menetelmässä huomioidaan lämpötilaeron aiheuttama paine-ero vain yli 3 kerrosta korkeissa rakennuksissa. (ASHRAE Standard 160 2016)

Ilmapuototarkasteluiden paine-eron laskennassa huomioitiin tuulen ja lämpötilaeron aiheuttama paine-ero rakennuksen yläosassa. Tuulen ja lämpötilaeron aiheuttamien (ks.

kuva 3.16) paine-erojen keskiarvojen summaksi Jokioisten vuoden 2004 säätiedoilla 6 metriä korkean rakennuksen pohjoisseinän yläosassa saatiin 9,2 Pa, mikä on lähellä tutkimuksessa (Kalamees et al. 2007) esitettyä paine-eron suunnitteluarvoa. Vantaan vuoden 2007 säädätällä 6 metriä korkean rakennuksen eteläseinän yläosassa paine-erojen keskiarvon summaksi saatiin 6,5 Pa.

### 3.3.4 Viistosade

Viistosateella (engl. wind driven rain, WDR) tarkoitetaan sateen vaakasuuntaista komponenttia, joka syntyy tuulen vaikutuksesta (Vinha et al. 2013). Viistosateen määrä vaihtelee suuresti eri vuosien, paikkakuntien ja ilmansuuntien välillä, mutta vuositasolla viistosateen määrä on 20-30% vaakapinnalle tulevan sateen määrästä. Viistosadetta kohdistuu eniten korkeiden rakennusten yläosiin ja nurkka-alueille, kun taas seinien keskiosiin ja matalien rakennusten seiniin sen vaikutus on pienempi. (Björkholtz 1997)

Tarkasteltavaan seinäpintaan kohdistuvan viistosateen laskennassa otetaan tyypillisesti huomioon sateen voimakkuus, tuulen nopeus ja suunta sekä rakennuksen muoto ja koko. Viistosateen intensiteetin laskennassa käytetään sääasemalla 10 m korkeudesta mitattuja tuulen nopeuden arvoja. Laskennassa oletetaan, että seinän normaalin ja tuulen suunnan välisen kulman  $\beta_{wind}$  ollessa yli  $90^\circ$ , tarkasteltavaan seinään kohdistuvan viistosateen intensiteetti on nolla, vaikka todellisuudessa nurkka-alueilla näin ei ole. Laskentamenetelmästä riippuen myös rakennuksen ympäristö voidaan huomioida seinään kohdistuvan viistosateen intensiteettiä laskettaessa.

Rakennuksen pystypintaan tulevan viistosateen laskentaan on määritetty kokeellisesti erilaisia kaavoja. Seuraavaksi on vertailtu neljää erilaista laskentamenetelmää. Laskentamenetelmistä kaksi perustuvat standardeihin (SFS-EN ISO 15927-3 (2009), ASHRAE 160 (2016)) ja kaksi ovat laskentaohjelmiin valittuja viistosateen laskentamenetelmiä (Delphin 5, WUFI-2D). Laskentamenetelmissä viistosadetta on yksinkertaistettu merkittävästi. Tarkemman viistosateen jakautumisen selvittämiseksi tulisi suorittaa mittauksia tai dynaamisia virtauslaskelmia.

Standardissa SFS-EN ISO 15927-3 (2009) tarkasteltavaan seinäpintaan kohdistuvan viistosateen intensiteetti lasketaan kaavalla

$$I_{WDR,ISO} = \frac{2}{9} \cdot c_r \cdot c_o \cdot O \cdot W \cdot v_{met} \cdot \cos(\beta_{wind}) \cdot r_h^{\frac{8}{9}} \quad (3.23)$$

missä

$I_{WDR,ISO}$	= viistosateen intensiteetti tarkasteltavalle seinälle [mm/h]
$c_r$	= maaston rosoisuuskerroin [-]
$c_o$	= maaston pinnan muotokerroin [-]
$O$	= ympäristön esteet huomioiva kerroin [-]
$W$	= rakennuksen muodon ja koon huomioiva seinäkerroin [-]
$v_{met}$	= sääasemalla mitattu tuulen nopeus [m/s]
$\beta_{wind}$	= seinän normaalin ja tuulen suunnan välinen kulma [°]
$r_h$	= sademäärä vaakapinnalle [mm/h].

Standardin SFS-EN ISO 15927-3 (2009) mukainen menetelmä huomioi rakennuksen ympäristön maaston rosoisuuskertoimen  $c_r$ , maaston pinnan muotokertoimen  $c_o$  ja esteet huomioivan kertoimen  $O$  avulla. Tarkasteltavan rakennuksen lähtötietojen perusteella ympäristön esteet huomioivana kertoimena  $O$  käytetään arvoa 1.0 ja maaston pinnan muotokertoimena  $c_o$  arvoa 1.0. Kertoimen  $c_r$  arvo määräytyy modifioitujen tuulen nopeuden yhteydessä alaluvussa 3.3.3 esitettyjen kaavojen mukaan, mutta rosoisuusmittoina käytetään standardin SFS-EN ISO 15927-3 (2009) taulukon 1 mukaisia parametreja.

Viistosateen intensiteetin laskennassa käytettiin maastoluokkaa I. Rakennuksen muodon ja koon huomioiva seinäkerroin  $W$  määritetään standardin SFS-EN ISO 15927-3 (2009) taulukon 4 mukaan. Seinäkertoimelle on käytetty tässä diplomityössä loivakattoisen rakennuksen keskimääräistä arvoa 0.4.

Standardissa ASHRAE 160 (2016) viistosateen intensiteetti tarkasteltavalle seinälle lasketaan kaavalla

$$I_{WDR,ASHRAE} = F_E \cdot F_D \cdot F_L \cdot v_{met} \cdot \cos(\beta_{wind}) \cdot r_h \quad (3.24)$$

missä

$I_{WDR,ASHRAE}$	= viistosateen intensiteetti tarkasteltavalle seinälle [mm/h]
$F_E$	= ympäristöä kuvaava kerroin [-]
$F_D$	= sateen valumista kuvaava kerroin [-]
$F_L$	= empiirinen viistosadevakio (0,2 (kg·s)/(m <sup>3</sup> ·mm))
$v_{met}$	= mitattu tuulen nopeus [m/s]
$\beta_{wind}$	= seinän normaalin ja tuulen suunnan välinen kulma [°]
$r_h$	= sademäärä vaakapinnalle [mm/h].

Standardin ASHRAE 160 (2016) mukaan tässä diplomityössä tarkasteltavan rakennuksen lähtötietojen perusteella ympäristöä kuvaavana kertoimena  $F_E$  käytetään arvoa 1.0. Sateen valumista kuvaavaan termiin liittyy paljon epävarmuutta ja sen valinnalla on merkittävä vaikutus pystypinnan viistosateen intensiteettiin (ASHRAE Standard 160 2016). Tarkasteltavan rakennuksen sateen valumista kuvaavana kertoimena  $F_D$  loivakattoisen rakennuksen arvoa 0.5.



Delphin 5 -laskentaohjelma sisältää vapaan viistosateen intensiteetin laskentaan Standard Rain Model –menetelmän. Standard Rain Model -menetelmän mukaan viistosateen intensiteetti lasketaan kaavalla (Delphin 5 2006)

$$I_{WDR,SRM} = \frac{\cos(\beta_{wind})}{\sqrt{1 + 1142 \cdot \frac{\sqrt{r_h}}{v_{met}^4}}} \cdot e^{-\left(\frac{12}{v_{met} \cdot 5 \cdot \sqrt{r_h}}\right)} \cdot r_h \quad (3.25)$$

missä

$I_{WDR,SRM}$  = viistosateen intensiteetti tarkasteltavalle seinälle [mm/h]

$\beta_{wind}$  = seinän normaalin ja tuulen suunnan välinen kulma [°]

$r_h$  = sademäärä vaakapinnalle [mm/h]

$v_{met}$  = mitattu tuulen nopeus [m/s].

Standard Rain Model –menetelmässä ympäristön tai rakennuksen vaikutusta viistosateen intensiteettiin ei huomioida, joten puhutaan vapaasta viistosateesta. Ympäristön vaikutuksia olisi kuitenkin mahdollista arvioida käyttämällä mitatun tuulen nopeuden tilalla modifioitujen tuulen nopeuden arvoja kuten standardin SFS-EN ISO 15927-3 (2009) mukainen menetelmä käyttää.

WUFI-2D -laskentaohjelmassa pystypinnan viistosateen intensiteetille käytetään kaavaa

$$I_{WDR,WUFI} = R2 \cdot v_{met} \cdot \cos(\beta_{wind}) \cdot r_h \quad (3.26)$$

missä

$I_{WDR,WUFI}$  = viistosateen intensiteetti tarkasteltavalle seinälle [mm/h]

$R2$  = viistosadekerroin [-]

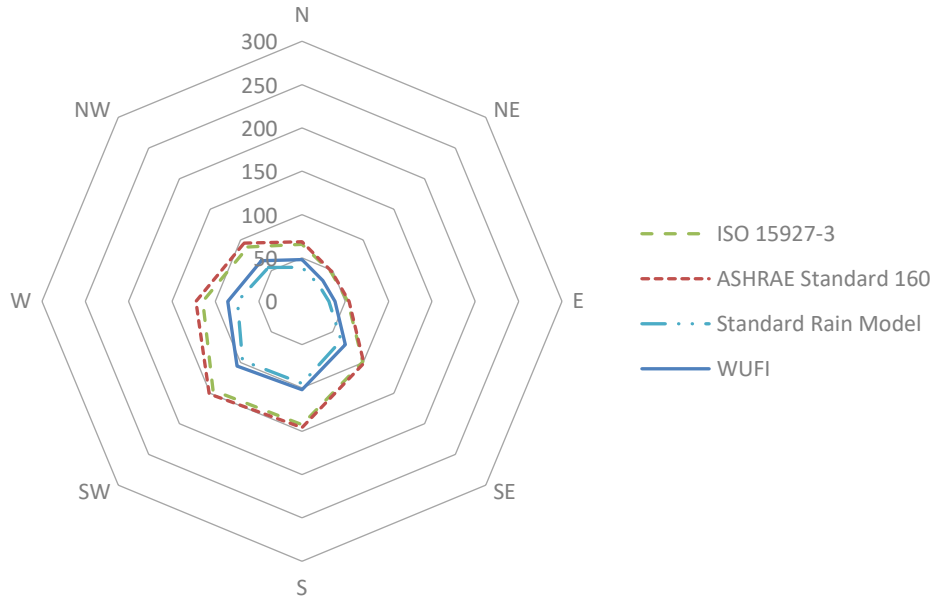
$v_{met}$  = mitattu tuulen nopeus [m/s]

$\beta_{wind}$  = seinän normaalin ja tuulen suunnan välinen kulma [°]

$r_h$  = sademäärä vaakapinnalle [mm/h].

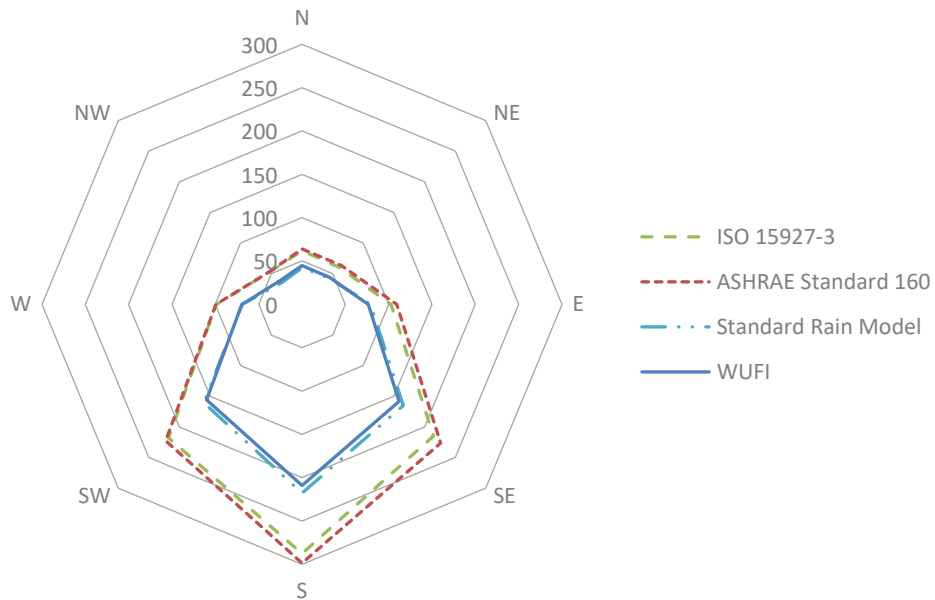
Tarkasteltavan rakennuksen lähtötietojen perusteella viistosadekerroina  $R2$  tulee käyttää arvoa 0.07. (WUFI-2D 3.2, 2007)

Kuvassa 3.26 on esitetty vertailu tarkasteltavan rakennuksen pystypinnalle tulevan vuosittaisen viistosateen määrästä [mm/a] käyttäen Jokioisten 2004 säädataa ja edellä esitellyjä laskentamenetelmiä. Kuvan 3.26 viistosateen laskennassa kaikki sade on oletettu vedeksi. Pystypinnan normaalin suuntana on käytetty pää- ja väli-ilmansuuntia.



**Kuva 3.26.** Vuoden viistosade [mm/a] tarkasteltavan rakennuksen pystypinnalle seinän normaalin suunnan funktiona Jokioisilla 2004 (vasemmalla) ja Vantaalla 2007 (oikealla).

Kuvassa 3.27 on esitetty vastaavasti vuosittaisen viistosateen määrä pystypinnalle Vantaan 2007 säädatalla laskettuna.



**Kuva 3.27.** Vuoden viistosade [mm/a] tarkasteltavan rakennuksen pystypinnalle seinän normaalin suunnan funktiona Vantaalla 2007.

Kuvasta 3.26 havaitaan, että Jokioisilla viistosade on voimakkainta etelän ja lounaan suuntaisille seinille. Vantaalla viistosade on taas selkeästi voimakkainta rakennuksen eteläseinälle. Vuoden sademäärä vaakapinnalle Jokioisilla vuonna 2004 oli 724 mm ja vastaavasti vuonna 2007 Vantaalla 755 mm. Paikkakuntien sademäärät eivät eroa toisistaan merkittävästi, mutta tuulen suunnan ja nopeuden vaihtelu paikkakuntien välillä aiheuttaa viistosateen määrään huomattavan eron. Esimerkiksi standardin SFS-EN ISO 15927-3 (2009) mukaisella menetelmällä laskettuna Vantaalla eteläseinään kohdistui vuonna 2007 288 mm viistosadetta, kun Jokioisilla vuonna 2004 viistosadetta eteläseinään kohdistui 142 mm.

Standardien (ASHRAE 160 (2016) ja SFS-EN ISO 15927-3 (2009)) mukaiset laskentamenetelmät aiheuttivat huomattavasti suurempia viistosateiden arvoja kuin laskentaohjelmien käyttämät menetelmät (Delphin 5 ja WUFI-2D). Standardin ASHRAE 160 (2016) mukaisessa menetelmässä sateen valumista kuvaavalla kertoimelle on merkittävä vaikutus viistosateen intensiteettiin. Käyttämällä pienempää valumakerrointa ( $F_D = 0.35$ ) päädytään WUFI-2D laskentaohjelman menetelmän mukaiseen viistosateen intensiteettiin. Vaikka standardin ASHRAE 160 (2016) mukainen laskentamenetelmä tuottaa suurimman viistosateen intensiteetin, sen käyttöä ei katsottu sopivaksi sateen valumakertoimeen liittyvän epävarmuuden takia.

Laskentatarkasteluissa päädyttiin käyttämään standardin SFS-EN ISO 15927-3 (2009) mukaista menetelmää viistosateen intensiteetin laskennassa. Tulevaisuudessa tehtävien laskentatarkastelujen kannalta on myös käytännöllistä, että tuulenpaineen ja viistosateen laskennassa on käytetty samalla tavalla modifioitua tuulen nopeuteen perustuvia menetelmiä.

Viistosateen osuessa seinään, osa siitä kiinnittyy julkisivuun ja osa kimpoaa pois. Julkisivuun kiinnittynyt vesi voi imeytyä julkisivuun tai liikkua julkisivun pintaa pitkin eri suuntiin, myös ylöspäin (Björkholtz 1997). Tässä diplomityössä kaiken viistosateen on oletettu kiinnittyvän julkisivuun. Tällöin pintaan tuleva viistosade on julkisivumateriaalin saatavilla ja julkisivuun imeytyvän veden määrä riippuu materiaalin kosteudenjohtavuudesta.

Laskentatarkasteluissa lumisateen osuus viistosateesta on poistettu, koska lumisateen ei katsota rasittavan pystyrakenteiden ulkopintaa. Sateen on oletettu olevan lunta, kun laskenta-astelehen lämpötila on alle 0 °C.

### 3.4 Laskentaohjelma

Laskentaohjelmia on saatavilla hyvin laaja valikoima. Laskentatarkasteluissa käytettävän laskentaohjelman valinnassa tulee ottaa huomioon esimerkiksi tarkasteltava rakenne tai rakennus, tarkasteltavat ilmiöt, käytettävät ulko- ja sisäilman olosuhteet, halutut tulokset ja niiden tarkkuus sekä laskentaohjelman ominaisuudet.

Tämän diplomityön laskennalliset tarkastelut on tehty Delphin -laskentaohjelmalla (versio 5.8.3). Delphin -laskentaohjelma soveltuu 1D- ja 2D-tapausten, stationäärisiin ja epästationäärisiin, lämmön, kosteuden ja ilman siirtymistarkasteluihin. Laskentaohjelmalla pystytään simuloimaan myös jäätymistä sekä suolojen ja VOC-yhdisteiden siirtymistä, mutta näitä ominaisuuksia ei käytetty tässä diplomityössä.

Laskentatarkastelujen toteutuksessa hyödynnettiin Tampereen teknillisen yliopiston johtaman Tampereen tieteellisen laskennan keskuksen (engl. Tampere Center for Scientific Computing, TCSC) Narvi -laskentaklusteria. SLURM-eräajojärjestelmää (engl. Simple Linux Utility for Resource Management) käyttävän Narvi-klusterin laskentakapasiteetti koostuu useista tuhansista ytimistä. Narvi-klusterin käyttö mahdollisti kymmenien tapausten yhtäaikaista laskennan.

Laskentatiedostojen sekä lähtötietoina käytettävien paine-erotiedostojen luomisessa, homeindeksien laskennassa ja tulosten kokoamisessa käytettiin Python 3-ohjelmointikielellä kirjoitettuja ohjelmia. Ohjelmien käyttö nopeutti tulosten käsittelyä ja vähensi inhimillisten virheiden määrää tulosten käsittelyssä.

### 3.5 Materiaaliominaisuudet

Luotettavien laskennallisten tarkastelujen toteuttamiseksi materiaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet tulee määritellä mahdollisimman tarkasti. Tärkeimpiä laskennallisissa tarkasteluissa käytettäviä materiaaliominaisuuksia ovat ominaislämpökapasiteetti, lämmönjohtavuus, pinnan säteilyominaisuudet, ilmanläpäisevyys, tasapainokosteus, vesihöyrynläpäisevyys, kapillaariset ominaisuudet ja homehtumisominaisuudet. Materiaaliominaisuudet ovat riippuvaisia olosuhdemuuttujista, kuten lämpötila ja kosteuspitoisuus sekä tuotteeseen liittyvistä muuttujista, kuten valmistus, raaka-aineet ja ikä (RIL 255-1-2014).

Laskentaohjelmasta riippuen materiaaliominaisuuksien vaihtelu lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona tulee ottaa huomioon materiaaliominaisuuksia syötettäessä. Laskentatarkasteluissa on myös suositeltavaa käyttää kyseisessä maassa käytettävien rakennusmateriaalin ominaisuuksia (RIL 255-1-2014). Tämän diplomityön laskelmissa on käytetty mahdollisuuksien mukaan TTY:llä mitattuja ja vertailtuja materiaaliominaisuuksia (ks. (Vinha et al. 2005a, Vinha et al. 2013)) Materiaaliominaisuuksia on täydennetty puuttuvilta osin laskentaohjelman materiaalikirjastosta ja kirjallisuudesta. Taulukossa 3.11 on esitetty yhteenveto laskennassa käytetyistä materiaaliominaisuuksista.

**Taulukko 3.11.** Yhteenveto laskennassa käytetyistä materiaaliominaisuuksista.

Lähde:
FRAME-loppuraportti
Delphin materiaalikirjasto
RIL 255-1-2014

$\rho$  = Tiheys  
 $c_p$  = Ominaislämpökapasiteetti  
 $\theta$  = Huokoisuus  
 $\lambda$  = Lämmönjohtavuus  
 $\mu$  = Diffuusiovastuskerroin  
 $k_a$  = Ilmanläpäisevyys

Materiaali	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$c_p$ [J/(kg·K)]	$\theta$ [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(m·K)]	$\mu$ [-]	$k_a$ [kg/(m·s·Pa)]
Tuulensuojakipsilevy (A1)	774	1100	0.604	0.19	7.9	2.20E-9 <sup>(1)</sup>
Pinnoitettu tuulensuoja- mineraalivilla (A4)	104	850	0.9	0.031	1.8	3.00E-6
Sisäverhouskipsilevy (C1)	574	1100	0.77	0.19	6.9	3.50E-9 <sup>(2)</sup>
Höyrynsulkumuovi 0.2 mm (C11)	980	2300	0.001	0.15	89000	-
Mänty (C13) (kohtisuoraan syitä vasten)	532	2000	0.7	0.12	84	1.00E-12 <sup>(3)</sup>
Mineraalivilla (D1)	22	850	0.98	0.035	1.2	2.70E-4
Bitumoitu puukuitulevy	280	1500	0.85	0.052	13	1.20E-7
EPS-levy	23	1500	0.93	0.036	96	-
XPS-levy	40	1500	0.951	0.030	150	-
Polyuretaanivaahdo	45	1500	0.92	0.029	104	-
Solumuovi	40	1500	0.945	0.036	175	-
Bitumikermi	1200	2000	0.0026	0.145	15000	-
Betoni	2320	850	0.143	2.1	110	-
Tiili	1786	889	0.354	0.55	18	-
Hiekka	1513	805	0.43	1.22	15	-
Sora	2650	1050	0.24	2.1	7	-
Ilmarako 10 mm (vaaka)	1.3	1050	1	0.067	1	0.1
Ilmarako 10 mm (pysty)	1.3	1050	1	0.067	1	0.1
Ilmarako 25 mm (pysty)	1.3	1050	1	0.138	0.4	0.1
Ilmarako 40 mm (pysty)	1.3	1050	1	0.22	0.25	0.1
Ilmarako 50 mm (pysty)	1.3	1050	1	0.278	0.2	0.1

<sup>1)</sup> Tuulensuojakipsilevyn ilmanläpäisevyyttä on vaihdeltu laskelmissa

<sup>2)</sup> Sisäverhouskipsilevyn ilmanläpäisevyytenä käytettiin laskelmissa ilman ilmanläpäisevyyttä

<sup>3)</sup> Julkisivuverhouksen ilmanläpäisevyytenä käytettiin laskelmissa ilman ilmanläpäisevyyttä

Materiaalien ominaisuudet voivat vaihdella myös tarkastelusuunnasta riippuen, jolloin puhutaan anisotrooppisista materiaaleista. Esimerkiksi puu ja mineraalivilla ovat tällaisia materiaaleja. Anisotrooppisuus voidaan mahdollisesti huomioida laskentaohjelmissa, mutta anisotropiaa ei ole välttämättä otettu huomioon materiaaliominaisuuksien määrittelyssä. Tämän diplomityön laskentatarkasteluissa (2D) puun syyt ovat aina laskentamallin syvyys suunnassa (z-akseli), joten puulle on käytetty kohtisuoraan syitä vastaan määritettyjä materiaaliominaisuuksia. Mineraalivillan anisotrooppisuutta on huomioitu käyttämällä sen ilmanläpäisevyydelle tehollista arvoa.

Rakennusmateriaalien pintojen homehtumisominaisuudet on määritetty Suomalaisen homehallin yhteydessä (ks. alaluku 3.2.1). Julkisivupinnoissa ei käytetty maali- tai pinnoi-

tekerroksia. Pinnan lyhytaaltoisen säteilyn absorptiokertoimen  $\alpha_{sw}$  käytettiin puuverho-  
tuissa rakenteissa vaaleiden pintojen arvoa 0,25 ja tiiliverhotuissa rakenteissa tiilelle tyy-  
pillistä arvoa 0,6 (RIL 255-1-2014). Molempien julkisivumateriaalien pitkäaaltoisen sä-  
teilyn emissiviteettinä  $\varepsilon$  käytettiin arvoa 0,9. Laskentatarkasteluissa käytetyt materiaa-  
liominaisuudet on esitelty tarkemmin liitteessä 2.

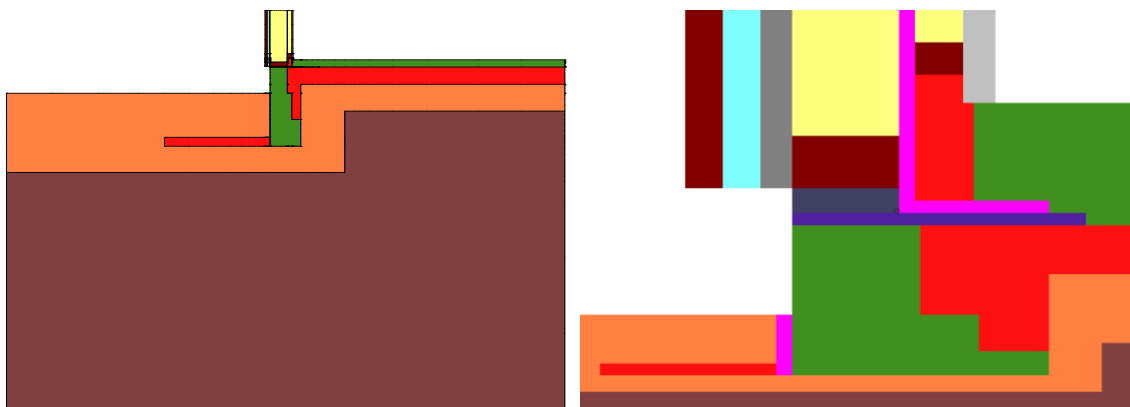
### 3.6 Tarkasteltavien rakenteiden mallintaminen

Rakenteiden toimintaa tutkittiin perättäin toistuvien rakennusfysikaalisten testivuosien  
olosuhteissa. Nurkkaliitosten tarkastelut tehtiin 2 vuoden pituisina, jotta materiaalien olo-  
suhteet ehtivät tasaantumaan ennen varsinaisen tarkastelujakson alkamista. Ideaalisten  
rakenteiden tarkasteluissa homeindeksi laskettiin tarkastelupisteen jälkimmäisen lasken-  
tavuoden lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvoilla. Ilmavuototarkasteluissa homein-  
deksi laskettiin myös ensimmäisen laskentavuoden tuloksilla.

Alapohjaliitosten tarkastelut tehtiin nurkkaliitosten tapaan 2 vuoden pituisina. Kuivumis-  
tarkasteluissa puuverhottujen seinärakenteiden tarkastelujakson pituutena käytettiin 5  
vuotta. Tiiliverhottujen seinärakenteiden tarkasteluissa jouduttiin tyytymään 2 vuoden pi-  
tuiseen laskentajaksoon, koska tiiliverhottujen rakenteiden laskenta-aika oli huomatta-  
vasti pidempi kuin puuverhottujen rakenteiden.

Rakenneliitosten tarkasteluissa rakennemallin laskentaverkko jouduttiin luomaan käsin,  
jotta laskentaelementtien määrä pysyy halutuissa rajoissa ja riittävän tiheänä rakenteen  
kriittisillä alueilla. Elementtiverkon luomisessa käytettiin periaatetta, että elementtien le-  
veys materiaalien rajapinnoissa on 1 mm. Elementtien kokoa kasvatettiin materiaalien  
rajapintojen välillä ja laskentamallin adiabaattipintoja kohti. Ohuet materiaalikerrokset  
on mallinnettu vähintään 3 elementin paksuisina.

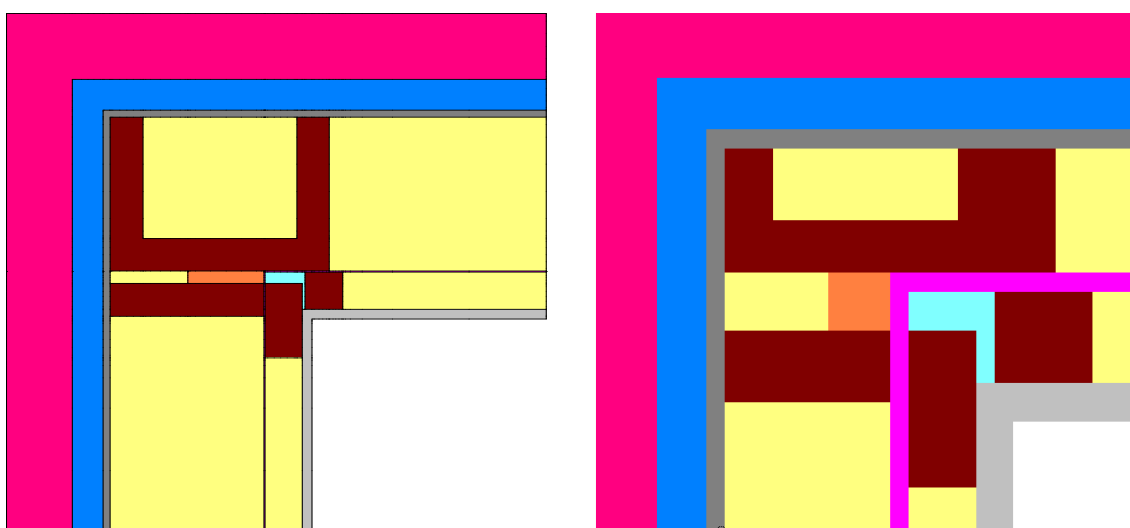
Alapohjaliitos mallinnettiin rakenteen pystyleikkauksena. Seinärakenteen katkaisukohta  
ja laskentamallin pystyreunat oletettiin adiabaattisiksi eli niiden läpi ei siirry lämpöä eikä  
ainetta. Kuvassa 3.28 on esitetty puuverhotun ulkoseinärakenteen alapohjaliitoksen ra-  
kennemalli oikeilla mittasuhteilla sekä muodossa, jossa laskentaelementit on venytetty  
saman kokoisiksi. Kuvasta nähdään, että laskentaelementit ovat painottuneet liitoksen  
alueelle, vaikka laskentamalli on laaja.



**Kuva 3.28.** Alapohjaliitoksen rakennemalli.

Alapohjaliitoksen seinärakenne mallinnettiin siten, että seinärakenteen rakennetyyppiä vastaavaa seinää tuli rakennemalliin 500 mm. Laskentamallin reunojen etäisyytenä perusmuurista käytettiin puuverhotuissa seinärakenteissa 3 m ja tiiliverhotuissa seinärakenteissa 1 m. Maaperän materiaaleina käytettiin yleisten rakenneratkaisujen mukaisia rakennekerroksia. Maaperän olosuhteet otettiin laskennassa huomioon mallin alareunan reunaehtona. Laskentamallin alareunassa maaperän lämpötilana käytettiin 5 °C ja pohjavesi mallinnettiin paineettomana vesikontaktina.

Nurkkaliitosten tarkasteluissa tutkittiin rakennetta vaakaleikkauksena. Nurkkaliitos mallinnettiin katkaisemalla rakenne nurkan ja viereisten runkotolppien puolesta välistä. Katkaisukohtiin oletettiin adiabaattipinnat (kuvassa 3.36 sinisellä). Kuvassa 3.29 on esitetty tiiliverhotun ulkonurkkaliitoksen rakennemalli oikeilla mittasuhteilla sekä yhdenkokoiseksi venytetyillä laskentaelementeillä.



**Kuva 3.29.** Tiiliverhotun ulkonurkkaliitoksen rakennemalli.

Laskentamallin syvyys (z-akselin suuntaan) oli kaikissa laskentatarkasteluissa 1 m. Laskentamallin syvyys vaikuttaa Delphin -laskentaohjelman 2D tarkasteluissa vain tulosten esittämiseen.

Rakennusfysikaalisten testivuosien määrittämisen yhteydessä on määrätty, mitä ilman-suuntaa seinärakenteelle tulee käyttää kyseisen testivuoden yhteydessä. Nurkkaliitoksissa risteävän seinän ilmansuunta selvitettiin vertailemalla homehtumisriskiä liitoksen runkotoilppien ulkonurkissa ja tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa. Sekä puu- että tiiliverhottujen seinärakenteiden kohdalla homeindeksin maksimiarvo kasvoi viereisellä seinällä suuremmaksi, kun viereisen seinän normaalin ilmansuunta oli itä.

### 3.6.1 Ilmavuotojen mallinnus

Tutkimukset ovat osoittaneet, että ilmavuodot kasvattavat puurunkoisten vaipparakenteiden kosteusongelmariskiä (Janssens & Hens 2003; Derome 2005). Pienetkin ilmavuodot kuljettavat rakenteisiin enemmän kosteutta kuin diffuusio. Lämmöneristekerroksen paksuminen ja ilmatiiviin tuulensuojakerroksen käyttäminen rakenteissa lisää ilmavuotojen aiheuttamaa kosteusongelmariskiä entisestään (Langmans et al. 2012a). Vaikka ilman siirtymisen tärkeys on osoitettu useissa tutkimuksissa, vain harvat rakennusfysikaalisiin laskentatarkasteluihin tarkoitetut ohjelmat pystyvät ottamaan ilman huomioon aktiivisena komponenttina laskennassa (Langmans et al. 2012b).

Ennen laskennallisten menetelmien kehittymistä vesihöyryn diffuusion ja ilmavuotojen aiheuttamia vaikutuksia rakenteisiin arvioitiin statiönääritilassa Glaser -menetelmällä. Nykyään on siirrytty dynaamisiin tarkasteluihin, koska niillä ilmiöitä pystytään mallintamaan tarkemmin. (Belleudy et al. 2016) Ilman siirtymisen mallinnus voidaan jakaa kolmeen eriasteiseen mallinnustapaan (Langmans et al. 2012b):

- konvektion vaikutus kosteuden tasapainoyhtälöön mallinnetaan kosteuslähteenä
- pakotettu konvektio mallinnetaan ilman tasapainoyhtälönä, joka on kytketty tai erotettu kosteuden ja energian tasapainoyhtälöistä.
- pakotettu ja luonnollinen konvektio mallinnetaan ilman tasapainoyhtälönä, joka on kytketty kosteuden ja energian tasapainoyhtälöihin.

Yksityiskohtaisin tapa ilman siirtymisen mallintamiseen on virtauslaskenta (CFD). Virtauslaskenta ei ole kuitenkaan sopiva menetelmä rakennusfysikaalisiin tarkasteluihin, koska virtauslaskennan laskentanopeus ei ole riittävä useiden vuosien pituisiin tarkastelujaksoihin. Ilman siirtymisen yhdistäminen lämmön- ja kosteuden siirtymiseen onkin haasteellista juuri siitä syystä, että ilman siirtyminen on paljon nopeampaa verrattuna lämmön ja kosteuden siirtymiseen (Langmans et al. 2012b). Lisäksi ilman siirtymisen mallintaminen huokoisissa materiaaleissa on haastavaa jopa edistyneille laskentaohjelmille, mikä puoltaa yksinkertaistuksien tekemistä ilman siirtymisen mallintamisessa.

Tutkimusryhmät ovat kehittäneet menetelmiä yksinkertaisempaan ilman siirtymisen mallintamiseen rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa. Yksi tapa toteuttaa laskenta on käyttää paine-eroja laskentamallin reunaehtona ja ottaa ilman siirtyminen huomioon tasapainoyhtälöissä ja siirtymisilmiöissä. Belleudy et al. (2016) ovat kehittäneet lämmön, ilman ja



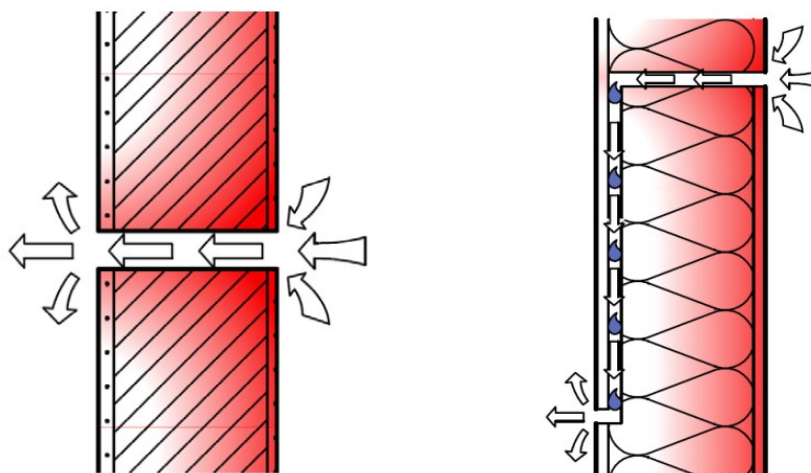
kosteuden siirtymisen tarkasteluihin tarkoitetun laskentamenetelmän COMSOL-laskentaohjelman pohjalle. Langmans et al. (2012b) lisäsivät ilman siirtymisen ja ilman tasapainoyhtälön Delphin -laskentaohjelmaan.

Langmans et al. (2013) tutkivat kehittämällään Delphin -laskentaohjelman versiolla ilmavuotojen vaikutuksia puurunkoisten ulkoseinärakenteiden toimintaan ja vertailivat laskennan tuloksia mittaustuloksiin. Tutkimuksessa ilmavuodot mallinnettiin paine-eroreunaehtona 10 mm leveisiin rakoihin. Kalamees ja Kurnitski (2010) käyttivät samaan tapaan paine-eroreunaehdot, kun he tutkivat ilmavuotojen vaikutuksia puurakenteisten yläpohjarakenteiden kosteustekniseen toimintaan CHAMPS-BES -laskentaohjelmalla ja vertailivat simuloinnin tuloksia laboratoriokokeiden tuloksiin.

Ilmavuotojen vaikutusten tarkastelut ovat myös mahdollisia laskentaohjelmilla, joilla ilman siirtymistä ei pystytä mallintamaan. Seuraavassa esitellään kaksi yksikertaista ilmavuotojen mallinnusmenetelmää, joita ovat kondensoitumista aiheuttavan ilmavuodon mallintaminen kosteuslähteenä ja ilmavuodon mallintaminen ilmanvaihtuvuutena eristetilassa.

Ilmavuotojen mallintaminen kosteuslähteenä perustuu saksalaisessa ohjeessa (WTA Merkblatt 6-2 2014) esitettyyn menetelmään, joka on tarkoitettu ilmavuotojen aiheuttaman kosteuden kondensoitumisen huomioimiseen laskennallisissa tarkasteluissa. Menetelmässä ilmavuodon määrään vaikuttavat rakennuksen vaipan ilmatiiveys, sisätilan korkeus, rakenneosat sekä ulkoilman ja sisäilman olosuhteet.

Saksalaisen ohjeen menetelmä perustuu oletukseen, että kaikki ilmavuodot eivät aiheuta kosteuden kondensoitumista rakenteisiin. Suorat ilman virtausreitit sisäilmasta ulkoilmaan eivät aiheuta kosteusongelmaa, koska ilma ei ehdi jäähtyä niin, että ilmankosteus alkaisi tiivistyä rakenteen sisälle. Kapeat ja mutkittavat ilman virtausreitit taas aiheuttavat hitaamman ilman virtauksen, jolloin ilma jäähtyy ja kosteuden tiivistyminen rakenteiden sisään on mahdollista. (Künzel et al. 2012) Kuvassa 3.30 on esitetty periaate kahdesta erilaisesta ilman virtausreitistä rakenteessa.



**Kuva 3.30.** Erilaisia ilman virtausreittejä. Vasemmalla suora ilman virtausreitti, oikealla kapea ja pidempi ilman virtausreitti sisäilmasta ulkoilmaan. (Künzel et al. 2012)

Suorat ilman virtausreitit edustavat suurinta osaa rakennuksen ilmavuodoista, mutta kapeat ja pitkä ilman virtausreitit ovat rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta merkittäviä. Menetelmän haaste on kosteuden kondensoitumista aiheuttavien ilmavuotojen osuuden määrittäminen rakennuksen ilmavuotojen määrästä. (Künzel et al. 2012) Zirkelbach et al. (2009) selvityksen mukaan kondensoitumista aiheuttavien ilmavuotojen osuus on noin 5-10 % rakennuksen kokonaisilmavuodosta ja edellä mainitun tutkimuksen laskentatarkasteluissa ilmavuotojen osuudeksi on oletettu 1/15. Ilmanvuotoluvun  $q_{50}$  arvolla  $4,0 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$  laskettuna kondensoitumista aiheuttavien ilmavuotojen ilmanvuotoluku  $q_{50,CL}$  olisi tällöin  $0,26 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ .

Kun kondensoitumista aiheuttavien ilmavuotojen ilmanvuotoluku  $q_{50,CL}$  tunnetaan, kondensoitumista aiheuttava ilmavirta  $q_{CL}$  rakenneosan läpi lasketaan kaavalla (3.27). Kondensoitumista aiheuttava ilmavirta rakenneosan läpi voidaan määrittää myös suoraan ilmavirtana (Wang & Ge 2017).

$$q_{CL} = |\Delta P| \cdot \frac{q_{50,CL}}{50 \text{ Pa}} \quad (3.27)$$

missä

$q_{CL}$  = kondensoitumista aiheuttava ilmavirta rakenneosan läpi [ $\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ ]

$\Delta P$  = paine-ero [Pa]

$q_{50,CL}$  = kondensoitumista aiheuttavien ilmavuotojen ilmanvuotoluku [ $\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ ]

WTA Merkblatt 6-2 (2014) mukaan paine-erossa huomioidaan vain lämpötilaeron ja ilmanvaihdon aiheuttama paine-ero. Tuulen aiheuttaman paine-eron huomioimatta jättämisestä on perusteltu sillä, että tuulen aiheuttama paine-ero on suuruudeltaan ja suunnaltaan arvaamaton, jolloin se voi aiheuttaa sekä rakenteiden kuivumista että kastumista. Tuulen aiheuttamat paine-eropiikit voivat myös nopeuttaa ilman virtausta rakenteessa siten, että kosteus ei ehdi kondensoitumaan rakenteen sisälle. (Künzel et al. 2012)

Kondensoitua kosteus mallinnetaan empiirisesti määritettyyn rakennekerrokseen kosteuslähteenä, jonka voimakkuus lasketaan kaavalla

$$\sigma_{REV}^{m_w} = \frac{q_{CL} \cdot (v_i - v_{sat,p})}{\Delta_x} \quad (3.28)$$

missä

$\sigma_{REV}^{m_w}$  = kosteuslähde [kg/(m<sup>3</sup>·s)]

$q_{CL}$  = kondensoitumista aiheuttava ilmavirta rakenneosan läpi [m<sup>3</sup>/(h·m<sup>2</sup>)]

$v_i$  = sisäilman kosteuspitoisuus [kg/m<sup>3</sup>]

$v_{sat,p}$  = tarkasteltavan rakennekerroksen kyllästyskosteuspitoisuus [kg/m<sup>3</sup>]

$\Delta_x$  = rakennekerroksen paksuus, johon kosteus tiivistyy [m]

Ilmavuodon aiheuttaman kosteuden kondensoitumisen laskentamenetelmässä on tehty valinta, että kosteuslähde ei voi olla negatiivinen eli ilmavuoto ei voi kuivattaa rakennetta. Menetelmä ei myöskään ota huomioon ilmavirtauksen mukana kulkevan lämmön vaikutusta rakenteen toimintaan. Todellisuudessa rakenteen kuivuminen ilmavuodon vaikutuksesta on mahdollista ja ilmavuoto kuljettaa mukanaan lämpöä, mutta tehdyt valinnat ovat rakenteen toiminnan kannalta varmalla puolella. (Künzel et al. 2012)

Toinen yksinkertaistettu menetelmä ilmavuotojen aiheuttamien vaikutusten tarkasteluun on mallintaa ilmavuoto ilmanvaihtuvuutena eristetilaan samaan tapaan kuin tuuletusvälin ilmanvaihtuvuus. Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuuden mallintamista on esitelty esimerkiksi lähteessä (Karagiozis & Künzel 2009). Ilmavuodon kuvaamista varten rakenteeseen mallinnetaan ohut virtuaalinen ilmakerros, jolle asetetaan ilmavuotoa vastaava ilmanvaihtuvuus. Kun ilmavuoto mallinnetaan ilmanvaihtuvuutena, toimii se rakennemallissa sekä lämpö- että kosteuslähteenä, jolloin sen avulla pystytään mallintamaan myös ilmavuodon kuivattavaa vaikutusta.

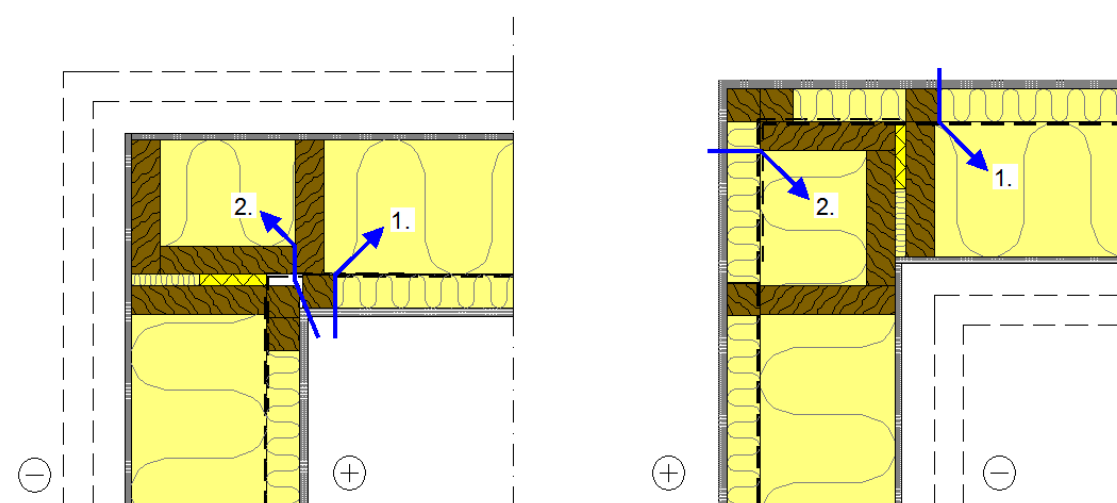
Künzel et al. (2012) sekä Wang ja Ge (2017) ovat käyttäneet vaipparakenteiden tarkasteluissa edellä esitettyjä yksinkertaisia mallinnusmenetelmiä. Künzel et al. (2012) käyttivät tutkimuksessaan WUFI -laskentaohjelmaa ja Wang ja Ge (2017) Delphin -laskentaohjelmaa.

Künzel et al. (2012) mallinsivat ilmavuotoa kuvaavan kosteuslähteen eristekerroksen ulkopintaan ja käyttivät kaavojen (3.27) ja (3.28) mukaan laskettua kosteuslähdettä. Wang ja Ge (2017) tutkivat, mikä osuus rakenteen vuotoilmasta saavutti eristekerroksen ulkopinnan muuttamalla ilmavuodon aiheuttaman kosteuslähteen voimakkuutta ja vertaamalla tuloksia mittaus tuloksiin. Tutkimuksen tuloksena todettiin, että parhaiten mittaus tuloksia vastaavan kosteuslähteen voimakkuus riippui tarkasteltavasta ilmasuunnasta ja rakenteesta (Wang & Ge 2017).

Künzel et al. (2012) mallinsivat ilmavuotoa kuvaavan ilmakerroksen tutkimuksessaan eristekerroksen ulkopintaan. Wang ja Ge (2017) sijoittivat ilmakerroksen eri kohtiin eristekerroksessa ja tutkivat ilmakerroksen sijainnin vaikutuksia laskennan tuloksiin. Tutkimusten (Künzel et al. 2012; Wang & Ge 2017) perusteella ei voida yksiselitteisesti todeta, mille syvyydelle virtuaalinen ilmakerros tulisi sijoittaa eristekerrokseen. Ilmanvaihtuvuuden avulla mallinnetun ilmavuodon simuloinneilla päästiin kuitenkin hyvään vastaavuuteen mittaustulosten kanssa.

Ilmavuotojen aiheuttamien vaikutusten tutkimuksille on yhteistä, että laskentamalleissa lämpötila vastaa mitattuja arvoja suhteellista kosteutta paremmin. Ilman siirtymisen mallinnuksessa tehtyjen yksinkertaistuksien lisäksi eron on esitetty johtuvan geometrian yksinkertaistuksista (Kalamees & Kurnitski 2010) ja materiaaliominaisuuksien epätarkkuuksista korkeassa suhteellisessa kosteudessa (Langmans et al. 2013).

Ulkoseinärakenteiden nurkkaliitosten vikasietoisuuden selvittämiseksi rakenteiden toimintaa tarkasteltiin ideaalisten rakennemallien lisäksi ilmavuotoja sisältävillä rakennemalleilla. Ilmavuotoreitit valittiin kuvan 3.31 mukaisesti pohjois- tai eteläseinän runkotolppien väliseen eristetilaan sekä nurkan runkotolppien muodostamaan ”koteloon”. Ilmavuotoa kuvattiin mallintamalla höyrynsulkumuoviin 1 mm levyinen rako.



**Kuva 3.31.** Ilmavuotoreitit ulkonurkka- (vasen) ja sisänurkkaliitoksessa (oikea).

Julkisivuverhous ja sisäverhous eivät juurikaan estä ilman liikkumista rakenteen ympärillä, koska julkisivuverhouksen takana on ulkoilmaan avoin tuuletusväli ja sisäverhouksen liitokset ovat epätiivittä. Kun höyrynsulkuun on oletettu rako, ovat tuulensuojakipsilevy ja mineraalivilla rakenteen ainoat ilman virtausta vastustavat kerrokset. Mineraalivillan ilmanvastus on pieni eikä laminaarinen ilman virtauksen laskenta ota huomioon rakojen virtausvastuksia, joten laskentamallissa tuulensuojakipsilevyn yli vallitsee melkein yhtä suuri paine-ero kuin koko rakenteen yli. Delphin -laskentaohjelmassa ilmanpainetta ei pysty asettamaan reunaehdoksi materiaalien väliseen rajapintaan, joten se tulee

asettaa reunaehdoksi rakennemallin sisä- ja ulkoverhouksen pintoihin. Tästä syystä ilmapuototarkasteluissa sisäpinnan kipsilevyn ja julkisivuverhouksen ilmanläpäisevyyden arvoksi asetettiin ilman ilmanläpäisevyys  $0,1 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$ .

Ilmavuotojen mallinnuksessa ulkoverhouksen ulkopintaan asetettiin normaali-ilmanpaine  $101325 \text{ Pa}$ . Rakenteen yli vallitseva paine-ero mallinnettiin asettamalla sisäverhouksen sisäpintaan tavoiteltua paine-eroa vastaava paine. Tarkasteluissa käytettiin  $10 \text{ Pa}$  ja  $20 \text{ Pa}$  sisäpuolista vakioylipaine-eroa sekä tuulesta ja lämpötilaerosta aiheutuvaa vaihtelevaa paine-eroa (ks. alaluku 3.3.3). Ilmapuototarkasteluissa molemmilla ulkoseinäpinoilla käytettiin pohjois- tai eteläseinän mukaan laskettua paine-eroa, jotta vältyttiin jyrkältä paine-eron muutokselta nurkassa.

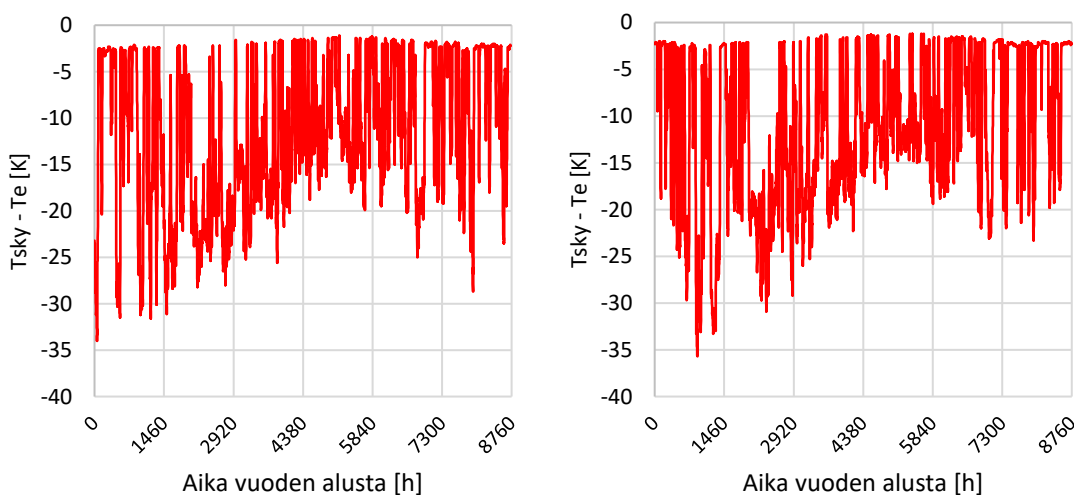
Ilmapuototarkasteluissa konvektiolla siirtyneen ilman ja vesihöyryn määrä saadaan Delphin -laskentaohjelmassa erillisinä tulostiedostoina ks. kaavat (2.60) ja (2.64)). Konvektiolla siirtyneen ilman ja vesihöyryn määrä määritettiin laskentamallissa ilmaraon kohdalta.

### 3.6.2 Laskentatarkastelujen lähtötiedot

Alaluvussa 3.3 on esitelty laskennan reunaehtoina käytettäviä sisä- ja ulkoilman olosuhteita ja alaluvussa 3.5 on esitelty laskennan edellyttämiä materiaaliominaisuuksia. Jotta laskennan reunaehdot voidaan liittää laskentaohjelman tasapainoyhtälöihin, tulee pinnoille määrittää erilaisia siirtokertoimia. Laskennan suorittamiseksi rakenneosille on myös määritettävä alkuolosuhteet. Tässä alaluvussa on esitelty laskennassa käytetyt pintojen siirtokertoimet ja säteilyominaisuudet, rakenteiden alkuolosuhteet.

Laskentaohjelma määrittää säteilyn intensiteetin tarkasteltavalle pinnalle, kun sille annetaan lähtötietona pinnan normaalin suunta, kaltevuus ja leveysasteina. Kun laskennassa käytettiin Jokioisten säähavaintoja, leveysasteena käytettiin  $60,8^\circ$  ja vastaavasti käytettäessä Vantaan säähavaintoja, leveysasteena käytettiin  $60,3^\circ$ .

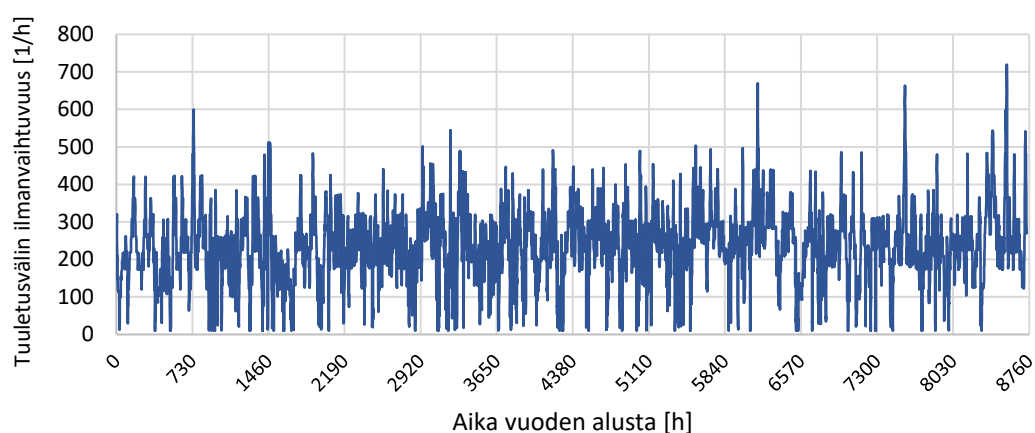
Tarkasteluissa otettiin huomioon rakenteen ulkopintojen ja taivaan välinen pitkäaaltoinen nettolämpösäteily. Laskentatarkasteluissa pitkäaaltoinen nettolämpösäteily mallinnettiin Stefan-Boltzmannin lain mukaan käyttämällä taivaan tehollista lämpötilaa  $T_{sky}$  (ks. alaluku 2.3.3). Tässä tutkimuksessa käytetyt taivaan tehollisen lämpötilan laskentamenetelmät on esitetty lähteessä (Jokela 2018). Kuvassa 3.32 on esitetty taivaan tehollisen lämpötilan  $T_{sky}$  ja ulkoilman lämpötilan  $T_e$  erotus Jokioisilla vuonna 2004 ja Vantaalla vuonna 2007.



**Kuva 3.32.** Taivaan tehollisen lämpötilan ja ulkoilman lämpötilan välinen erotus Jokioisilla vuonna 2004 (vasemmalla) ja Vantaalla vuonna 2007 (oikealla).

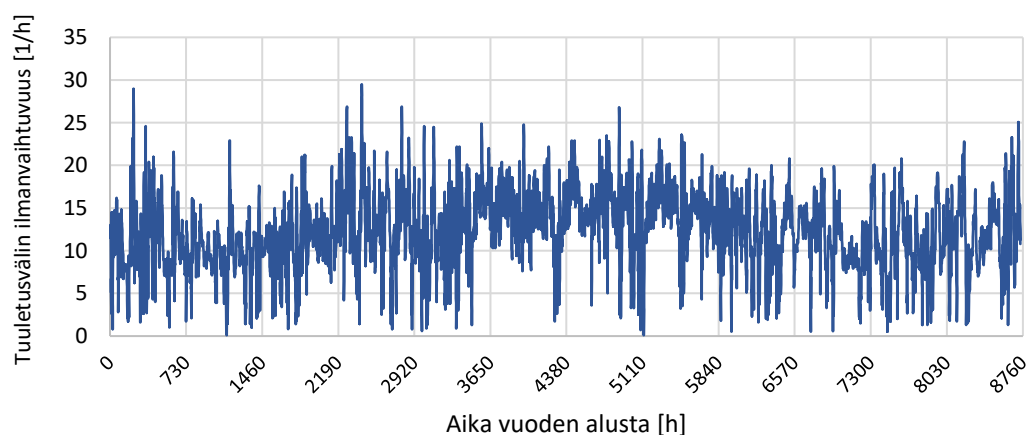
Tuuletusvälissä virtaava ilma huomioitiin laskennassa tuuletusvälin ilmanvaihtuvuuden ACH [1/h] (engl. Air Changes per Hour) avulla. Tuuletusvälissä virtaavan ilman nopeuden vaikuttaa mm. tuulennopeus, seinän korkeus, tuuletusvälin mitat sekä tuuletusraot. Tässä tutkimuksessa käytettyjen tuuletusvälin ilmanvaihtuvuuksien laskenta on esitetty Teemu Jokelan diplomityössä (2018). Kuvassa 3.33 on esitetty pohjoiseen suunnatun 6

m korkean puuverhotun seinärakenteen 48 mm paksun tuuletusvälin ilmanvaihtuvuus Jokioisilla vuonna 2004. Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuuden keskiarvo oli 237 1/h.



**Kuva 3.33.** Puuverhotun pohjoisseinän tuuletusvälin ilmanvaihtuvuus Jokioisilla vuonna 2004. Tuuletusvälin korkeus 6 m ja paksuus 48 mm.

Kuvassa 3.34 on esitetty etelään suunnatun 6 m korkean tiiliverhotun seinärakenteen 40 mm paksun tuuletusvälin ilmanvaihtuvuus Vantaalla vuonna 2007. Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuuden keskiarvo oli 12,2 1/h.



**Kuva 3.34.** Tiiliverhotun eteläseinän tuuletusvälin ilmanvaihtuvuus Vantaalla vuonna 2007. Tuuletusvälin korkeus 6m, paksuus 40 mm ja alaosan tiilisaumoista joka kolmas avoin.

Kuvista 3.33 ja 3.34 nähdään, että puuverhotun seinärakenteen tuuletusvälin ilmanvaihtuvuus on huomattavasti suurempi, kuin tiiliverhotun seinärakenteen. Eron aiheuttaa tiiliverhotun rakenteen huomattavasti pienempi tuuletusrakojen pinta-ala, koska toiseksi alimman tiilivarvin pystysaumoista vain joka kolmas on auki. Vastaavasti puuverhotuilla rakenteilla tuuletusrako on tyypillisesti tuuletusvälin suuruinen.

Tuuletusvälin korkeuden pienentäminen lisää tuuletusvälin ilmanvaihtuvuutta sekä puuverhotuissa että tiiliverhotuissa seinärakenteissa. Tuuletusvälin paksuuden kasvattaminen lisää tuuletusvälin ilmanvaihtuvuutta puuverhotuissa rakenteissa, mutta ei juuri vaikuta tiiliverhottujen seinärakenteiden tuuletusvälin ilmanvaihtuvuuteen, koska tuuletusrakojen pinta-ala rajoittaa ilman virtausta. Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuuden vaikutuksia seinärakenteiden rakennusfysikaaliseen toimintaan on käsitelty tarkemmin lähteessä (Jokela 2018).

### Pintojen siirtokertoimet ja säteilyominaisuudet

Rakenteen pinnalta siirtyy lämpöä ympäristöön pääasiassa säteilemällä ja konvektion vaikutuksesta. Rakenteen U-arvoa laskettaessa pintojen lämmönsiirtokertoimet sisältävät molemmat komponentit, mutta auringon säteilyn huomioon ottavissa epästationäärisissä laskentatarkasteluissa ne pitää erottaa. Rakenteen sisäpinnalla säteilyn komponentti sisällytetään lämmönsiirtokertoimeen, koska rakennuksen sisäpintojen välistä säteilyä ei syötetä laskentaan lähtötietona. Ulkopinnan lämmönsiirtokerroin taas sisältää vain konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen.

Pintojen konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen arvo riippuu ilmavirtauksesta, pinnan suunnasta ja lämpövirran suunnasta. Rakenteen sisä- ja ulkopinnan konvektiivisten lämmönsiirtokerrointen määrittäminen poikkeaa toisistaan, koska sisäpinnalla konvektio on luonnollista ja ulkopinnalla pakotettua. Laskentatarkasteluissa käytettiin standardin SFS-EN ISO 6946 (2017) mukaisia pinnan konvektiivisia lämmönsiirtokertoimia  $h_{conv,i}$  [W/(m<sup>2</sup>·K)]. Rakenteen sisäpinnan konvektiiviset lämmönsiirtokertoimet lämpövirran suunnan mukaan on esitetty taulukossa 3.12.

**Taulukko 3.12.** Sisäpinnan lämmönsiirtokertoimet lämpövirran suunnan mukaan. (SFS-EN ISO 6946 2017)

Sisäpinnan konvektiivinen lämmönsiirtokerroin [W/(m <sup>2</sup> ·K)]	Lämpövirran suunta		
	Ylöspäin	Vaakasuuntaan	Alaspäin
$h_{conv,i}$	5,0	2,5	0,7

Ulkopinnan konvektiivisen  $h_{conv,e}$  lämmönsiirtokertoimen määrittämiseen käytettiin kaavaa (SFS-EN ISO 6946 2017)

$$h_{conv,e} = 4 + 4 \cdot v \quad (3.29)$$

missä

$h_{conv,e}$  = ulkopinnan konvektiivinen lämmönsiirtokerroin [W/(m<sup>2</sup>·K)]

$v$  = ilman nopeus pinnalla [m/s]



Ulkopinnan ja maan pinnan konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen määrittämisessä ilman nopeutena käytettiin laskentavuosien tuulen nopeuden keskiarvoa 4 m/s. Konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen arvoksi saatiin tällöin 20 W/(m<sup>2</sup>·K).

Rakenteen sisäpinnan säteilyn lämmönsiirtokertoimen  $h_{rad,i}$  [W/(m<sup>2</sup>·K)] määrittämiseen käytettiin kaavaa

$$h_{rad,i} = 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{mn}^3 \quad (3.30)$$

missä

$h_{rad,i}$  = sisäpinnan säteilyn lämmönsiirtokerroin [W/(m<sup>2</sup>·K)]

$\varepsilon$  = pinnan emissiviteetti [-]

$\sigma$  = Stefan-Boltzmannin vakio (5,67·10<sup>-8</sup> W/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>))

$T_{mn}$  = Pinnan ja ympäristön keskilämpötila [K]

Kun rakenteen sisäpinnan ja sisäilman keskilämpötilana käytettiin 21 °C ja sisäpinnan emissiviteettinä 0,9, sisäpinnan säteilyn lämmönsiirtokertoimen arvoksi saatiin 5,19 W/(m<sup>2</sup>·K).

Pintojen kosteudensiirtokertoimet määritettiin pinnan konvektiivisen lämmönsiirtokertoimesta kaavan (2.14) mukaan. Kosteudensiirtokertoimien määrittämisessä ilman tiheytenä  $\rho_a$  käytettiin 1,20 kg/m<sup>3</sup> ja ilman ominaislämpökapasiteettina  $c_{p,a}$  1000 J/(kg·K). Pinnan ilmansiirtokertoimena on käytetty laskentaohjelman oletusarvoa 1000 s/m.

Laskennassa käytetyt pintojen lämmön- ja kosteudensiirtokertoimet sekä säteilyominaisuudet on koottu taulukkoon 3.13.

**Taulukko 3.13.** Pintojen siirtokertoimet ja säteilyominaisuudet.

Pinta		Kerroin
Seinän sisäpinta		
Lämmönsiirtokerroin	$h_i$	7.69 W/m <sup>2</sup> K
Kosteudensiirtokerroin	$\beta_{v,p,i}$	1.52E-08 s/m
Ilmansiirtokerroin	$\beta_{a,i}$	1000 s/m
Seinän ulkopinta		
Lämmönsiirtokerroin	$h_e$	20 W/m <sup>2</sup> K
Kosteudensiirtokerroin	$\beta_{v,p,e}$	1.22E-07 s/m
Ilmansiirtokerroin	$\beta_{a,e}$	1000 s/m
Maanpinnan heijastuskerroin	$\rho_{albedo}$	0.25 -
Lyhytaaltoisen säteilyn absorptiokerroin	$\alpha_{sw,e}$	Julkisivumateriaalin mukaan
Pitkäaaltoisen säteilyn emissiviteetti	$\varepsilon_e$	Julkisivumateriaalin mukaan
Lattian pinta		
Lämmönsiirtokerroin	$h_f$	5.89 W/m <sup>2</sup> K
Kosteudensiirtokerroin	$\beta_{v,p,f}$	4.27E-09 s/m
Maan pinta		
Lämmönsiirtokerroin	$h_g$	20 W/m <sup>2</sup> K
Kosteudensiirtokerroin	$\beta_{v,p,g}$	1.22E-07 s/m
Lyhytaaltoisen säteilyn absorptiokerroin	$\alpha_{sw,g}$	0.6 -
Pitkäaaltoisen säteilyn emissiviteetti	$\varepsilon_g$	0.9 -

### Rakenneosien alkuolosuhteet

Seinärakenteiden alkuolosuhteet määritettiin erilaisiksi höyrynsulun ulko- ja sisäpuolella, jotta olosuhteet rakenteen sisällä tasaantuisivat mahdollisimman nopeasti laskennan alussa. Seinärakenteiden rakennekerrosten alkuolosuhteet on esitetty taulukossa 3.14. Pohjarakenteiden alkuolosuhteina käytettiin 5 °C lämpötilaa ja 97 % RH suhteellista kosteutta.

**Taulukko 3.14.** Rakennekerrosten alkuolosuhteet.

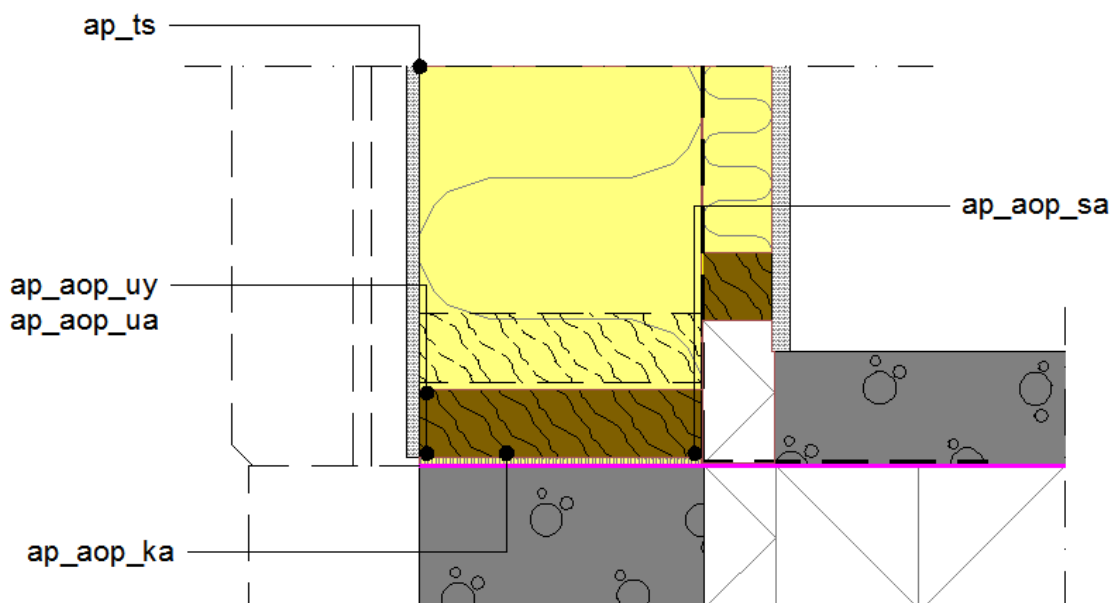
	Jokioinen			Vantaa		
	2004	2050	2100	2007	2050	2100
Höyrynsulun sisäpuoliset rakennekerrokset						
Lämpötila	15	15	16	16	17	18
Suhteellinen kosteus	55	58	66	69	72	75
Höyrynsulun ulkopuoliset rakennekerrokset						
Lämpötila	2	3	6	7	9	11
Suhteellinen kosteus	78	83	84	89	90	91

Alapohjaliitoksien tarkasteluissa rakennusaikaisen kosteuden vaikutusta liitoksen rakennusfysikaaliseen toimintaan tutkittiin muuttamalla alaohjauspuun alkukosteuspitoisuutta. Alapohjaliitosten tarkasteluissa alaohjauspuun alkukosteutena käytettiin 80 % RH, 90 % RH ja 97 % RH huokosilman suhteellista kosteutta vastaavia kosteuspitoisuuksia ( $96 \text{ kg/m}^3$ ,  $145 \text{ kg/m}^3$  ja  $185 \text{ kg/m}^3$ ). Lisäksi tarkasteltiin täysin kastunutta, vesikontaktissa ollutta alaohjauspuuta, jonka alkukosteuspitoisuutena käytettiin  $470 \text{ kg/m}^3$ .

### 3.6.3 Tarkastelupisteet

Tarkastelupisteet tulee sijoittaa toimintakriteerien kannalta kriittisiin kohtiin. Tyypillisesti tarkastelupisteitä sijoitetaan materiaalikerrosten rajapintoihin ja kylmäsihtakohtien yhteyteen. (RIL 255-1-2014)

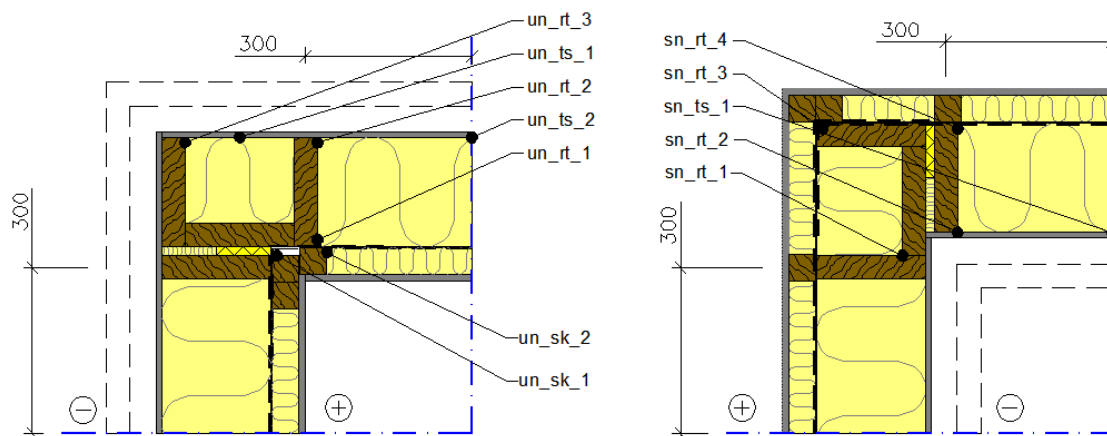
Alapohjaliitosten (ap) homehtumisriskiä tarkasteltiin alaohjauspuun (aop) ja alajuoksun (aj) nurkista sekä alaohjauspuun ylä- ja alapinnan keskipisteistä. Lisäksi yksi tarkastelupiste sijoitettiin tuulensuojakipsilevyn (ts) sisäpintaan, jotta laskennan tuloksia voidaan vertailla rakennetyyppien ja ulkoseinäliitosten tuloksiin. Alaohjauspuun kuivumistarkasteluissa tarkasteltiin koko alaohjauspuun kosteuspitoisuuden keskiarvoa. Kuvassa 3.35 on esitetty alapohjaliitosten tarkastelupisteet ja tarkastelupisteiden tunnukset lueteltuna ylhäältä alaspäin.



**Kuva 3.35.** Alapohjaliitoksen tarkastelupisteet ja tarkastelupisteiden tunnukset.

Alajuoksua ei ole mallinnettu paikalla rakennettuihin rakenteisiin, joten alajuoksun tarkastelupisteet on huomioitu vain elementtiliitosten laskentatarkasteluissa.

Nurkkaliitosten homehtumisriskiä ei ole tarkasteltu aikaisemmin lämpö- ja kosteusteknisissä laskentatarkasteluissa. Koska kriittisiä pisteitä ei tunnettu, tarkastelupisteitä valittiin varmuuden vuoksi aluksi useita. Tarkastelupisteet sijoitettiin kaikkiin runkotolppien (rt) nurkkiin, sisäkoolauksen (sk) nurkkiin ja runkotolppien keskelle tuulensuojakipsilevyn (ts) sisäpintaan. Kuvassa 3.36 on esitetty alustavissa laskentatarkasteluissa kriittisiksi osoittautuneet ulko- ja sisänurkkaliitosten tarkastelupisteet ja tarkastelupisteiden tunnukset.



**Kuva 3.36.** Ulkonurkkaliitoksen (vasemmalla) ja sisänurkkaliitoksen (oikealla) tarkastelupisteet ja tarkastelupisteiden tunnukset.

Puuverhottujen seinärakenteiden nurkkaliitoksissa tarkastelupisteet on valittu pohjoisseinälle ja tiiliverhotuissa seinärakenteissa eteläseinälle. Risteävän seinän vastaavien tarkastelupisteiden homehtumisriski oli valittuja tarkastelupisteitä alhaisempi. Risteävän seinän normaalin ilmansuuntana käytettiin itää.

## 4. LASKENTATARKASTELUJEN TULOKSET

Laskentatarkasteluissa tutkittiin tuulensuojakipsilevyllisten puurankarunkoisten pientalojen ulkoseinien alapohja-, ulkonurkka- ja sisänurkkaliitosten rakennusfysikaalista toimintaa. Laskentatarkasteluissa tutkittujen seinärakenteiden rakennetyypit on esitetty liitteessä 3. Puuverhottujen seinärakenteiden liitosten tarkasteluissa käytettiin rakennetyyppejä US1-US3 ja tiiliverhottujen seinärakenteiden liitosten laskentatarkasteluissa rakennetyyppejä US1-US6.

Puurankarunkoisia seinärakenteita on tutkittu laskennallisesti TTY:llä aikaisemmissa tutkimuksissa. Puu- ja tiiliverhottujen seinärakenteiden tulosten esittelyn alussa on tehty vertailuja liitostarkastelujen tarkastelupisteiden ja muiden tutkimusten vastaavien tarkastelupisteiden välillä. Puuverhottujen seinärakenteiden liitosten laskentatarkastelujen tuloksia on käsitelty alaluvussa 4.1 ja tiiliverhottujen seinärakenteiden liitosten laskentatarkastelujen tuloksia alaluvussa 4.2.

Tarkasteluja tehtiin sekä ideaalisille että virheellisille rakenteille. Virheellisten rakenteiden toimintaa arvioitiin ilmavuotojen avulla mallintamalla höyrünsulkukerrokseen rako ja muuntelemalla tuulensuojakipsilevyn ilmanläpäisevyyttä asennustyön laadun mukaan. Huolellisesti asennetulle tuulensuojakipsilevyllä käytettiin materiaaliarvon mukaista ilmanläpäisevyyttä ja heikosti asennetulle tuulensuojakipsilevyllä satakertaista ilmanläpäisevyyden arvoa, mikä vastaa huokoisen puukuitulevyn ilmanläpäisevyyttä.

Tuloksissa on esitetty tuulensuojakipsilevyn tarkastelupisteiden homeindeksin arvoja homehtumisherkkyyssuokkien 1 ja 2 mukaan laskettuna, koska TTY:llä tehtyjen viimeaikaisten homehtumiskokeiden perusteella on olemassa viitteitä siitä, että tavanomainen tuulensuojakipsilevy homehtuu voimakkaammin verrattuna homehtumisherkkyyssuokan 2 materiaaleille määritettyihin laskennallisiin arvoihin.

### 4.1 Puuverhotut seinärakenteet

Puuverhotuissa seinärakenteissa kosteus pyrkii siirtymään diffuusion vaikutuksesta pääasiassa sisältä ulospäin sisäilman korkeamman vesihöyrypitoisuuden seurauksena. Vesihöyryn siirtymisen seurauksena puuverhottujen seinärakenteiden ongelmakohdat sijaitsevat tyypillisesti rakenteiden ulko-osissa. Rakenteiden ulko-osien olosuhteisiin voidaan vaikuttaa merkittävästi tuulensuojakerroksen rakennusfysikaalisilla ominaisuuksilla.

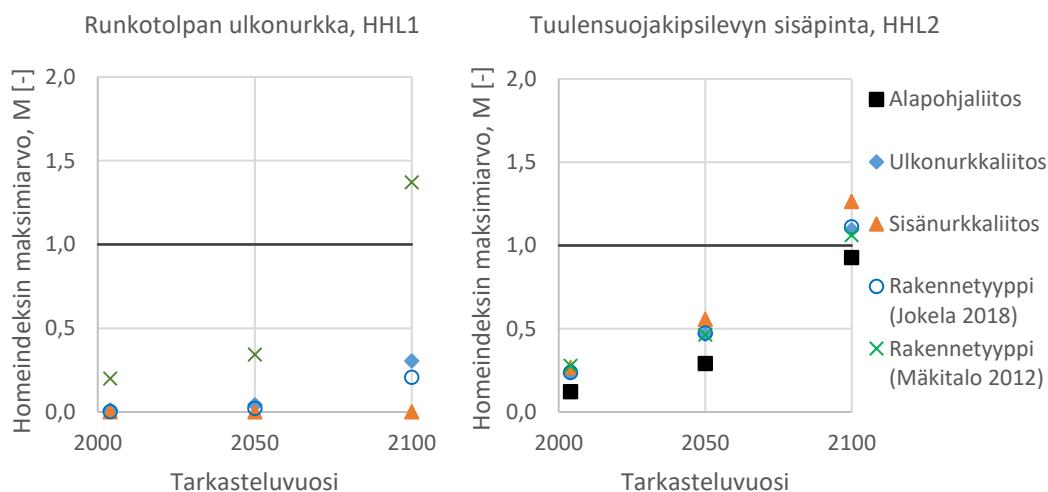
### 4.1.1 Rakennetyyppien ja liitososien vertailu

Puuverhottujen seinärakenteiden rakennetyyppien lämpö- ja kosteusteknisestä toimintaa on tarkasteltu TTY:llä aikaisemmissa tutkimuksissa (Mäkitalo 2012, Vinha et al. 2013, Jokela 2018). Ennen puuverhottujen seinärakenteiden liitosten tulosten esittelyä vertailaan rakennetyyppien tutkimusten tuloksia tämän tutkimuksen tuloksiin kolmella ulkoseinärakenteella: perusrakenne (US1), rakenteellisen energiatehokkuuden vaatimukset täyttävä rakenne (US2) ja 30 mm paksulla tuulensuojamineraalivillalla lisäeristetty rakenne (US3) (ks. liite 3). Vertailuissa on tarkasteltu homeindeksin maksimiarvoa runkotolpan ulkonurkan tarkastelupisteissä (un\_rt\_2, sn\_rt\_2) ja tuulensuojakipsilevyn sisäpinnan tarkastelupisteissä (ap\_ts, un\_ts\_2 ja sn\_ts\_1) (ks. alaluku 3.6.3).

Vertailuissa tutkimuksissa käytetyt laskentaohjelmat poikkesivat toisistaan. Jokela (2018) käytti tutkimuksessa samaa Delphin -laskentaohjelmaa kuin tässä tutkimuksessa käytettiin, mutta Mäkitalo (2012) käytti tarkasteluissa WUFI 1D- ja WUFI 2D-laskentaohjelmia. Laskentaohjelmat eroavat toisistaan mm. materiaaliominaisuuksien ja huomioon otettavien fysikaalisten ilmiöiden osalta, mikä vaikuttaa osaltaan tuloksiin. Kuvissa 4.1 - 4.3 esitetyt Mäkitalon (2012) tuulensuojakipsilevyn tulokset on laskettu WUFI 1D-ohjelmalla ja runkotolpan ulkonurkan tulokset WUFI 2D-ohjelmalla.

Laskentaohjelmien lisäksi tutkimusten välillä on eroja laskennassa huomioon otetuissa reunaehdoissa. Tässä tutkimuksessa ja Jokelan (2018) tutkimuksessa tuuletusvälin ilmanvaihtuvuus on mallinnettu vaihtelevana ja pitkäaaltoisen säteilyn vaikutus on otettu huomioon laskennassa rakenteen pinnan ja taivaan välisenä nettolämpösäteilynä (ks. alaluku 3.6.2). Mäkitalon tutkimuksessa tuuletusvälin ilmanvaihtuvuutena käytettiin suurta vakioarvoa, jolla pyrittiin ottamaan huomioon pitkäaaltoisen säteilyn viilentävää vaikutusta, koska pitkäaaltoinen säteily ei ollut laskennassa mukana omana yhtälönä.

Kuvassa 4.1 on vertailtu homeindeksin maksimiarvoja liitosten ja rakennetyyppien tarkastelujen välillä runkotolpan ulkonurkassa ja tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa puuverhotulla ulkoseinärakenteella US1.

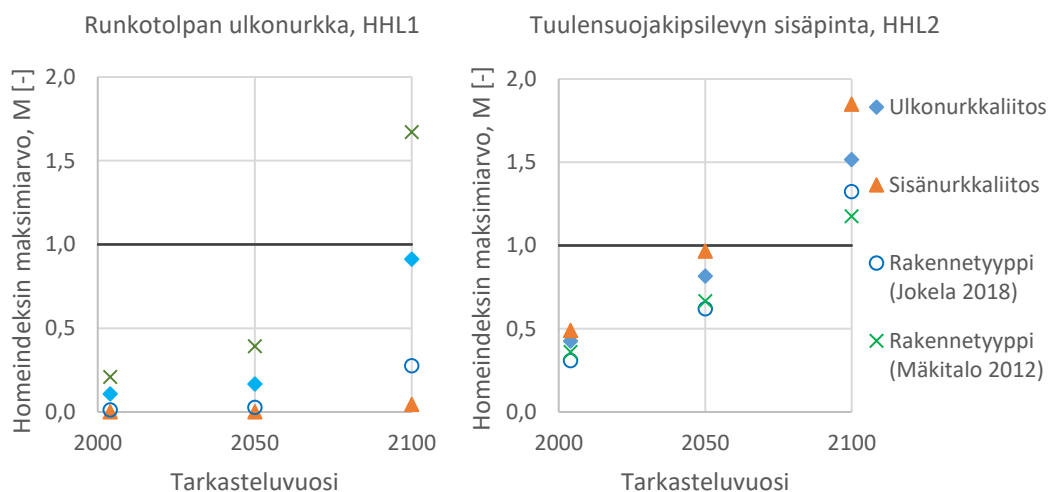


**Kuva 4.1.** Homeindeksin maksimiarvojen vertailu runkotolpan ulkonurkassa ja tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa puuverhotulla seinärakenteella US1.

Seinärakenteella US1 tuulensuojakipsilevyn sisäpinnan homeindeksien maksimiarvojen vaihtelu tutkimusten sekä liitosten ja rakennetyyppien välillä oli vähäistä. Sisänurkkaliitoksessa tuulensuojakipsilevyn sisäpinnan tarkastelupisteen homeindeksin maksimiarvot nousivat muita tutkimuksia suuremmiksi ja alapohjaliitoksissa jäivät taas hieman pienemmiksi.

Runkotolpan ulkonurkan homeindeksin maksimiarvoissa esiintyi enemmän vaihtelua. Runkotolpan ulkonurkan tuloksissa oli merkittävä ero jo rakennetyyppien tutkimusten välillä, kun Mäkitalo (2012) sai tarkasteluissaan Jokelaa (2018) suurempia homeindeksin maksimiarvoja. Ero johtuu siitä, että Mäkitalon (2012) tarkasteluissa tuuletusväliin ei mallinnettu pystykoolausta, mikä vaikuttaa huomattavasti runkotolpan ulkonurkan homeindeksin maksimiarvoon. Tuuletusvälin ristikoolauksen vaikutus runkotolpan ulkonurkan homeindeksin maksimiarvoon on havaittu myös Jokelan (2018, s. 67) laskentatarkasteluissa.

Kuvassa 4.2 on esitetty homeindeksin maksimiarvot eri tutkimuksissa rakenteellisen energiatehokkuuden vaatimukset täyttävän rakenteen (US2) runkotulpan ulkonurkassa ja tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa.

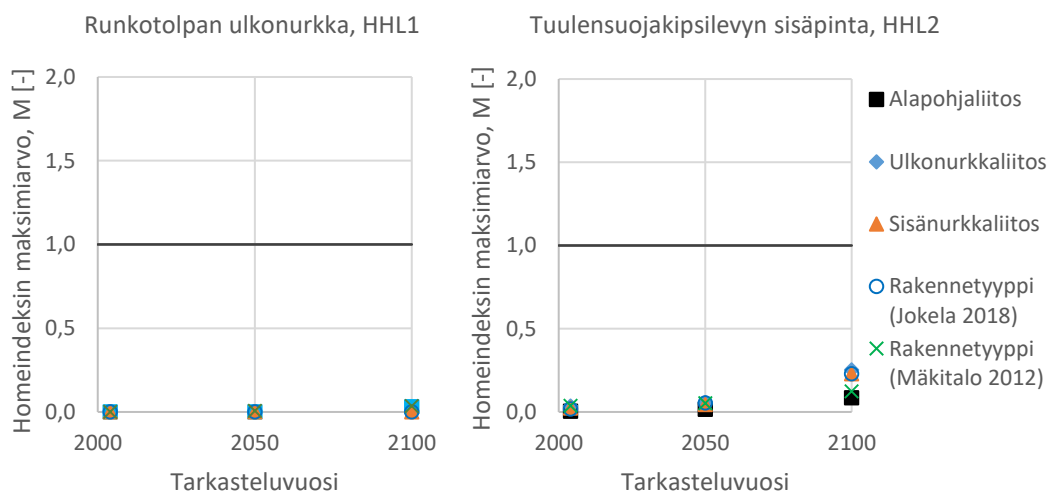


**Kuva 4.2.** Homeindeksin maksimi-arvojen runkotolpan ulkonurkassa ja tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa ulkoseinärakenteella US2.

Rakenteellisen energiatehokkuuden vaatimuksen täyttävällä ulkoseinärakenteella (US2) tulosten erot olivat samansuuntaisia kuin perusrakenteella (US1), mutta erot näkyivät selkeämmin. Tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homeindeksin maksimi-arvo nousi yli sallitun raja-arvon 1,0 sekä rakennetyyppien että -liitosten tarkasteluissa tarkasteluvuonna 2100. Seinärakenteen eristepaksuuden kasvattaminen heikensi runkotolpan ulkonurkan olosuhteita ulkonurkkaliitoksessa, mikä näkyi ulkonurkkaliitoksen ja Jokelan (2018) rakennetyyppitarkastelujen homeindeksin maksimi-arvojen kasvaneena erona kuvissa 4.1 ja 4.2.

Kuvassa 4.3 on vertailtu homeindeksin maksimi-arvoja tuulensuojamineraalivillalla tuulensuojakipsilevyn ulkopuolelta lisäeristetyissä rakenteissa (US3). Tässä tutkimuksessa ja Mäkitalon (2012) tarkasteluissa tuulensuojamineraalivillan paksuutena käytettiin 30 mm. Jokela (2018) käytti tarkasteluissaan 25 mm paksua tuulensuojamineraalivillaa.





**Kuva 4.3.** Homeindeksin maksimi-arvojen vertailu runkotolpan ulkonurkassa ja tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa ulkoseinärakenteella US3.

Tuulensuojamineraalivillalla tuulensuojakipsilevyn ulkopuolelta eristetyissä rakenteissa (US3) runkotolpan ulkonurkan homeindeksin maksimi-arvot eivät nousseet lainkaan liitosten eikä rakennetyyppien tarkasteluissa. Tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa havaittiin maltillista homeindeksin nousua kaikissa tutkimuksissa, mutta homeindeksin maksimi-arvo pysyivät alle kriittisen raja-arvon myös tulevaisuuden ilmastoissa. Lisäeristäminen tuulensuojamineraalivillalla tuulensuojakipsilevyn ulkopuolelta oli vertailussa huomioidujen tutkimusten perusteella toimivin rakenne.

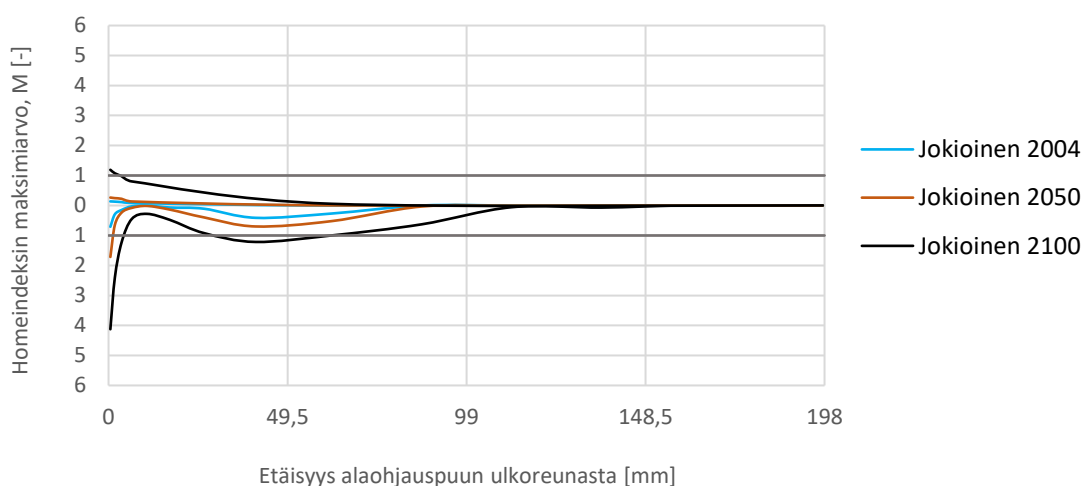
Yleisesti vertailuista puuverhotuista seinärakenteista voidaan todeta, että homeindeksin maksimi-arvot vastasivat kohtalaisen hyvin toisiaan tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa tutkimusten ja rakenteiden kesken. Runkotolpan ulkonurkan homeindeksin maksimi-arvoissa havaitut erot liitosten ja rakennetyyppien tarkastelujen välillä olivat keskenään loogisia ja erojen syyt selitettävissä. Liitoksissa tarkasteltava runkotolppa sijaitsee seinärakenteen nurkassa, minkä takia sen lämpö- ja kosteusolosuhteet ovat erilaiset verrattuna suoraan seinään. Sisänurkkaliitoksessa runkotolpan ulkonurkan homeindeksin maksimi-arvot eivät nousseet, koska tarkastelupisteen lämpötila oli riittävä pitämään suhteellisen kosteuden alhaisena. Ulkonurkkaliitoksessa runkotolpan ulkonurkka on taas kylmempi kuin suorassa seinässä, mikä näkyi hieman korkeampina homeindeksin arvoina.

## 4.1.2 Alapohjaliitos

Puuverhottujen seinärakenteiden alapohjaliitoksen tarkasteluissa tutkittiin paikalla rakennettujen ja elementtirakenteisten seinärakenteiden alaohjauspuun homehtumisriskiä ja kosteuspitoisuutta erilaisissa alkuolosuhteissa. Puuverhottujen alapohjaliitosten tarkastelut tehtiin seinärakenteella US1 (ks. liite 3). Perustapauksessa alaohjauspuuna käytettiin poikkileikkaukseltaan 48x198 mm<sup>2</sup> sahatavaraa. Puuverhottujen alapohjaliitosten tarkastelujakson pituus oli viisi vuotta.

Alaohjauspuun kriittisten tarkastelupisteiden selvittämiseksi alaohjauspuun ala- ja yläpintojen homeindeksin maksimiarvoja tutkittiin alapohjaliitoksen perusrakenteella (ks. kuva 3.2). Kuvissa 4.4 - 4.7 on esitelty rakennusfysikaalisen testivuoden (ilmastonmuutoksen), alaohjauspuun kuivumisen, alaohjauspuun alkukosteuden ja alajuoksun lisäämisen vaikutuksia homeindeksien maksimiarvoihin. Kuvissa x-akselilla on etäisyys alaohjauspuun ulkoreunasta. x-akselin yläpuolella on esitetty alaohjauspuun yläpinnan homeindeksi ja x-akselin alapuolella alapinnan homeindeksin maksimiarvot.

Kuvassa 4.4 on esitetty rakennusfysikaalisen testivuoden (ilmastonmuutoksen) vaikutus kuivan alaohjauspuun (80 % RH) ylä- ja alapintojen homeindeksin maksimiarvoihin. Kuvassa esitetyt homeindeksin maksimiarvot on laskettu tarkastelujakson toisen vuoden tuloksista.

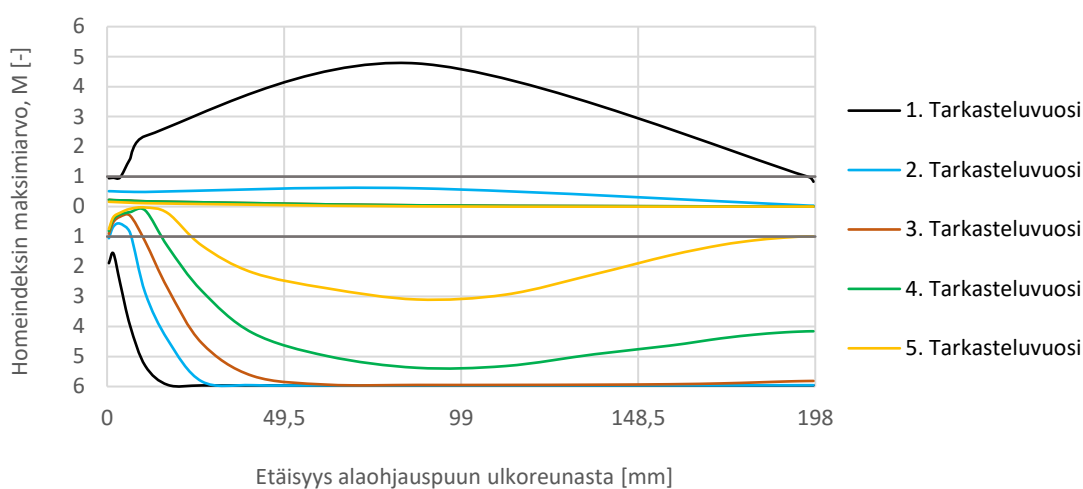


**Kuva 4.4.** Rakennusfysikaalisen testivuoden (ilmastonmuutoksen) vaikutus kuivan alaohjauspuun (80 % RH, HHL1) pintojen homeindeksin maksimiarvoihin. Alaohjauspuun alapinnan homeindeksin maksimiarvot x-akselin alapuolella ja yläpinnan yläpuolella. Seinärakenne US1.

Ilmastonmuutoksen vaikutukset aiheuttivat homeindeksin maksimiarvojen kasvua alaohjauspuun pinnoilla. Kuvasta 4.4 nähdään, että kuivan alaohjauspuun yläpinnan homeindeksin maksimiarvo oli suurin ulkoreunassa ja ylitti kyseisessä pisteessä homeindeksin raja-arvon 1,0 Jokioisten 2100 ilmasto-olosuhteissa laskettuna. Alaohjauspuun alapinnan

homeindeksin maksimiarvo oli myös suurin alaohjauspuun ulkoreunassa. Alaohjauspuun alapinnan ulkonurkan olosuhteet vastaavat lähes ulkoilman olosuhteita, mikä aiheuttaa nurkan korkean homeindeksin maksimiarvon. Kuivan alaohjauspuun alapinnan homeindeksin maksimiarvo saavutti paikallisen maksimiarvon noin 40 mm etäisyydellä alaohjauspuun ulkoreunasta.

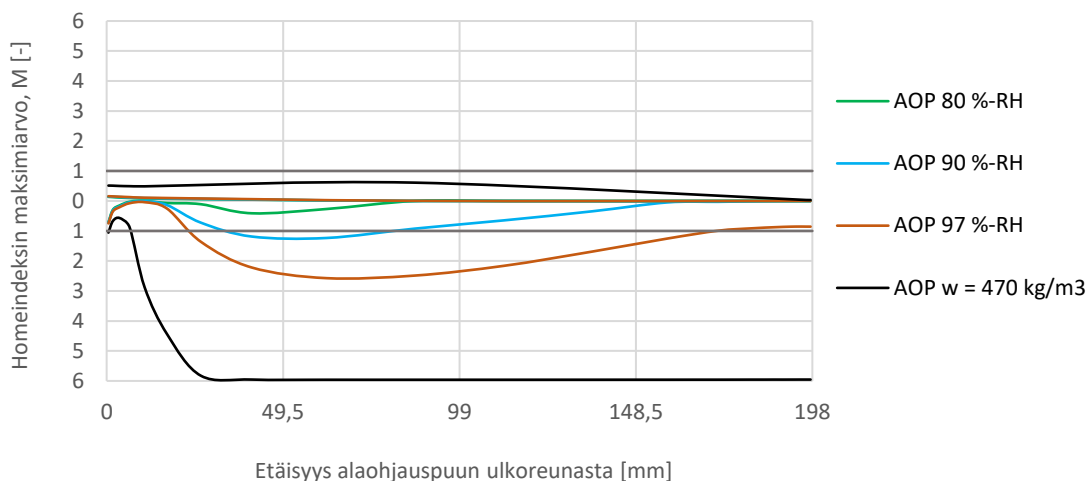
Kuvassa 4.5 on esitetty vesikontaktissa olleen alaohjauspuun ( $w=470 \text{ kg/m}^3$ ) ylä- ja alapinnan homeindeksin maksimiarvot viiden vuoden pituisen tarkastelujakson aikana Jokioisten vuoden 2004 ilmasto-olosuhteissa laskettuna. Homeindeksi on nolattu jokaisen tarkasteluvuoden alussa, jolloin kuvassa nähdään, miten alaohjauspuun kuivuminen vaikuttaa pintojen homeindeksin maksimiarvoihin.



**Kuva 4.5.** Kuivumisen vaikutus täysin kastuneen ( $w=470 \text{ kg/m}^3$ , HHL1) alaohjauspuun pintojen homeindeksin maksimiarvoihin Jokioisten vuoden 2004 säädatalla laskettuna. Alaohjauspuun alapinnan homeindeksin maksimiarvot  $x$ -akselin alapuolella ja yläpinnan yläpuolella. Seinärakenne US1.

Täysin kastuneen alaohjauspuun yläpinnan keskiosassa homeindeksin maksimiarvo oli korkea tarkastelujakson ensimmäisenä vuonna, mutta laski alle raja-arvon jo toisena tarkasteluvuonna. Yläpinta kuivui siis melko nopeasti homeenkasvulle epäsuotuisiin olosuhteisiin. Alaohjauspuun alapinnan homeindeksin maksimiarvo sen sijaan pysyi korkeana koko tarkastelujakson ajan. Homeindeksin maksimiarvo oli yli 3,0 vielä viidentenäkin tarkasteluvuonna, mikä johtuu alaohjauspuun alapinnan hitaammasta kuivumisesta yläpintaan verrattuna.

Kuvassa 4.6 on esitetty alaohjauspuun pintojen homeindeksin maksimiarvot Jokioisten vuoden 2004 ilmasto-olosuhteissa alaohjauspuun eri alkukosteuspitoisuuksilla. Kuvassa esitetyt homeindeksin maksimiarvot on laskettu tarkastelujakson toisen vuoden tulokista.

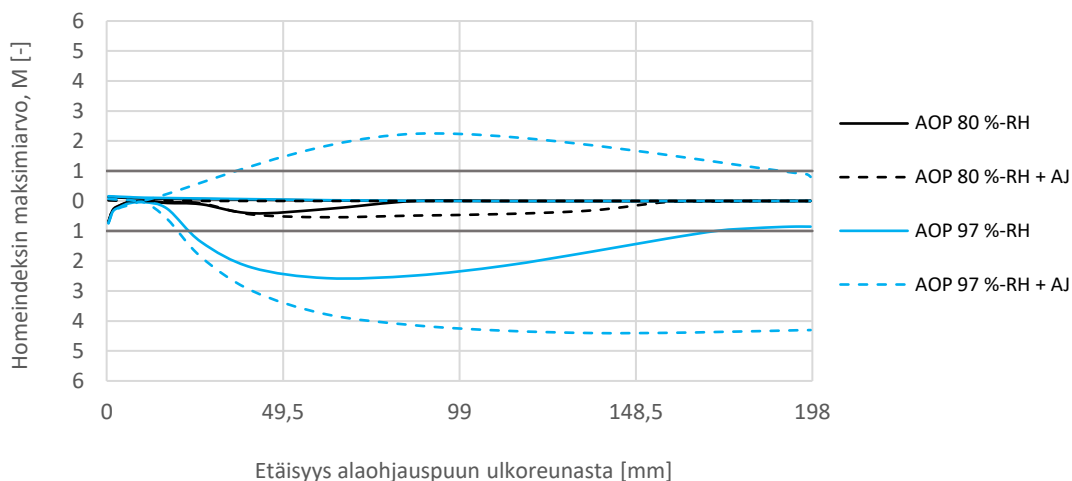


**Kuva 4.6.** Alaohjauspuun alkukosteuspitoisuuden vaikutus tarkastelujakson toisen vuoden homeindeksin maksimiarvoon Jokioisten vuoden 2004 säädatalla laskettuna (HHL1). Alaohjauspuun alapinnan homeindeksin maksimiarvot x-akselin alapuolella ja yläpinnan yläpuolella. Seinärakenne US1.

Kuvasta 4.6 nähdään, että alaohjauspuu alkukosteuspitoisuus ei juurikaan vaikuttanut tarkastelujakson toisen vuoden alaohjauspuun yläpinnan homeindeksin maksimiarvoon. Sama havainto tehtiin myös kuvasta 4.5. Alaohjauspuun alapintaan sen sijaan alkukosteuspitoisuuden vaikutus oli merkittävämpi. Jo 90 % RH vastaava alaohjauspuun tasapainokosteuspitoisuus nosti homeindeksin maksimiarvon yli sallitun raja-arvon alaohjauspuun alapinnassa.

Kuvista 4.5 ja 4.6 havaitaan, että mitä suurempi alaohjauspuun alkukosteuspitoisuus oli, sitä kauemmaksi alaohjauspuun ulkoreunasta homeindeksin maksimiarvon paikallinen maksimi siirtyi. Paikallisen maksimin siirtyminen johtui siitä, että alaohjauspuu kuivui nopeammin ulkoreunasta kuin keskeltä.

Kuvassa 4.7 on tarkasteltu elementtiliitoksissa käytetyn alajuoksun vaikutusta alaohjauspuun pintojen homeindeksin maksimiarvoihin kuivalla (80 % RH) ja kastuneella alaohjauspuulla (97 % RH). Kuvassa esitetyt homeindeksin maksimiarvot on laskettu tarkastelujakson toisen vuoden tuloksista.



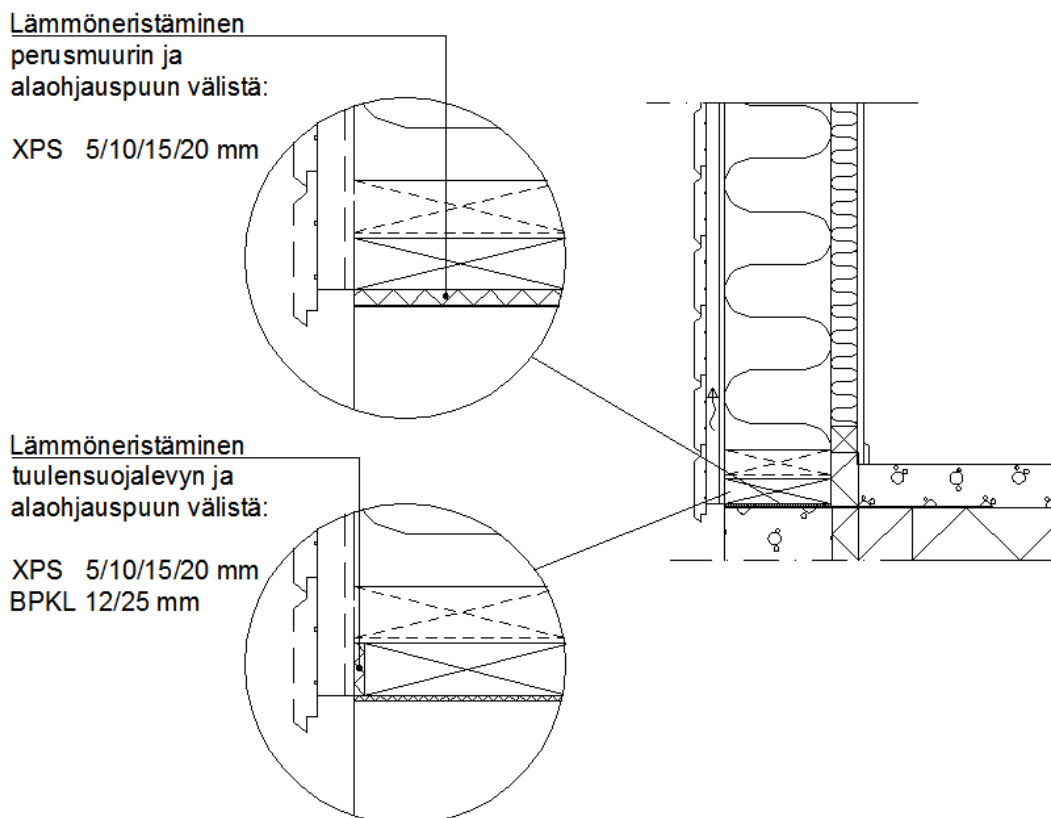
**Kuva 4.7.** Alajuoksun vaikutus kuivan ja kastuneen alaohjauspuun homeindeksin maksimiarvoon tarkastelujakson toisena vuonna Jokioisten vuoden 2004 säädatalla laskettuna (HHL1). Alaohjauspuun alapinnan homeindeksin maksimiarvot x-akselin alapuolella ja yläpinnan yläpuolella. Seinärakenne US1.

Alajuoksun lisääminen alapohjaliitokseen lisäsi alajuoksun homehtumisriskiä. Kuivan alaohjauspuun tapauksessa ero ei ollut merkittävä, kun alajuoksu vaikutti vain vähän alaohjauspuun alapinnan homeindeksin maksimiarvoon, mutta ei nostanut sitä yli sallitun raja-arvon. Alajuoksuttomassa alapohjaliitoksessa kastuneen alaohjauspuun yläpinnan homeindeksin maksimiarvo ei noussut yli raja-arvon. Alajuoksun lisääminen liitokseen hidasti alaohjauspuun yläpinnan kuivumista, minkä seurauksena homeindeksin maksimiarvot kastuneen alaohjauspuun yläpinnassa nousivat yli raja-arvon. Alajuoksun lisääminen alaohjauspuun päälle nosti homeindeksin maksimiarvon suurimmassa osassa kastuneen alaohjauspuun pintaa yli arvon 3,0, kun se alajuoksuttomassa liitoksessa nousi vain osassa yli arvon 2,0.

Kuvien 4.4 - 4.7 perusteella puuverhotun seinärakenteen alapohjaliitoksen kriittisiksi tarkastelupisteiksi valittiin alaohjauspuun ulkoalanurkka (ap\_aop\_ua), alaohjauspuun ulko-ylänurkka (ap\_aop\_uy) ja piste alaohjauspuun alapinnasta noin 60 mm etäisyydeltä alaohjauspuun ulkoreunasta (ap\_aop\_ka) (ks. alaluku 3.6.3).

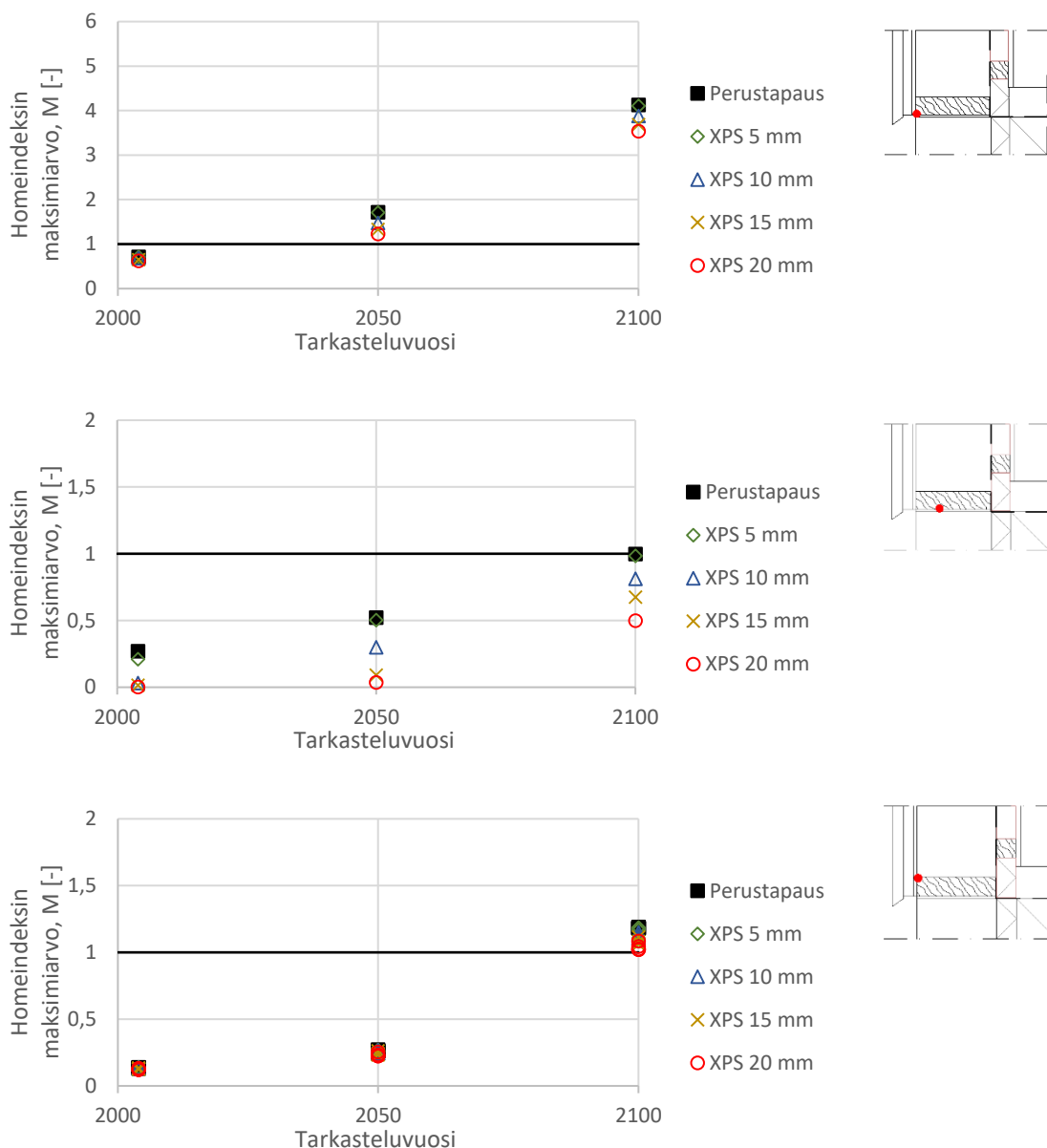
## Alaohjauspuun lämmöneristäminen

Alaohjauspuun kosteusteknistä toimintaa pyrittiin parantamaan alaohjauspuun ja perusmuurin välisen sekä tuulensuojalevyn ja alaohjauspuun välisen lämmöneristyksen avulla (kuva 4.8). Tutkimuksessa alaohjauspuun ja perusmuurin välinen solumuovikaista (mallinnettu 5 mm paksuna) korvattiin 5-20 mm paksulla XPS-eristeellä. Alaohjauspuun ja tuulensuojakipsilevyn välisenä lämmöneristeenä käytettiin 5-20 mm paksua XPS-eristettä tai 12/25 mm paksua bitumoitua puukuitulevyä (BPKL). Lämmöneristysratkaisujen yhteistoimintaa ei tarkasteltu tässä tutkimuksessa.



**Kuva 4.8.** Tutkimuksessa tarkastellut alaohjauspuun lämmöneristysvaihtoehdot.

Alaohjauspuun homehtumisriskin kannalta kriittiset tarkastelupisteet määritettiin edellä perusrakenteella. Kuvassa 4.9 on esitetty alaohjauspuun ja perusmuurin välisen XPS-eristeen vaikutus paikallarakennetun seinärakenteen kuivan alaohjauspuun tarkastelupisteiden homeindeksin maksimiarvoihin.

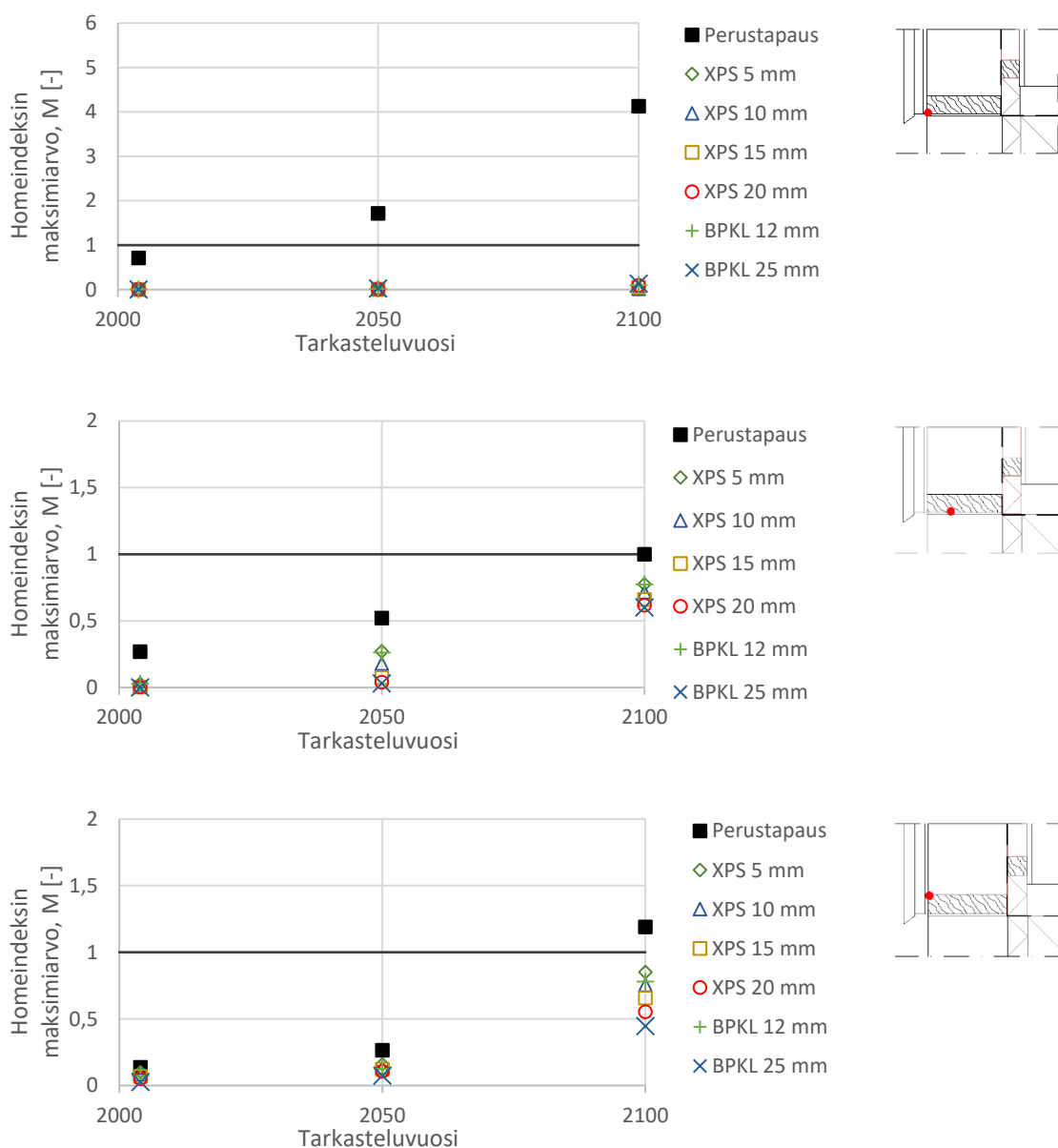


**Kuva 4.9.** Alaohjauspuun ja perusmuurin välisen lämmöneristystyksen vaikutus kuivan alaohjauspuun (80 % RH, HHL1) tarkastelupisteiden homeindeksin maksimiarvoihin. Seinärakenne US1. (Pysty akselin asteikko vaihtelee)

Lämmöneristäminen alaohjauspuun ja perusmuurin välistä pienensi homeindeksin maksimiarvoa noin 0,5 yksikköä alaohjauspuun alapinnan tarkastelupisteissä Jokioisten vuoden 2050 ja 2100 ilmasto-olosuhteissa. Nykyilmastossa lämmöneristäminen alaohjauspuun ja perusmuurin välistä pienensi homeindeksin maksimiarvoa vain alaohjauspuun alapinnan keskiosan tarkastelupisteessä (ap\_aop\_ka). Alaohjauspuun yläpinnassa alaohjauspuun ja perusmuurin välisen lämmöneristämisen vaikutus oli odotetusti pienempi.

Tutkimuksessa tuulensuojakipsilevyn alareuna pidettiin kaikissa tarkasteluissa alaohjauspuun alapinnan tasolla. Alaohjauspuun ja perusmuurin välisen lämmöneristeen vaikutus alaohjauspuun alapinnan ulkonurkan tarkastelupisteen olosuhteisiin jäi vähäiseksi, koska tarkastelupisteen olosuhteet vastasivat edelleen lähes ulkoilman olosuhteita.

Kuvassa 4.10 on esitetty alaohjauspuun ja tuulensuojakipsilevyn välisen lämmöneristeen vaikutus kuivan alaohjauspuun tarkastelupisteiden homeindeksin maksimiarvoihin. Alaohjauspuun poikkileikkausta kavennettiin lämmöneristeen mukaan.



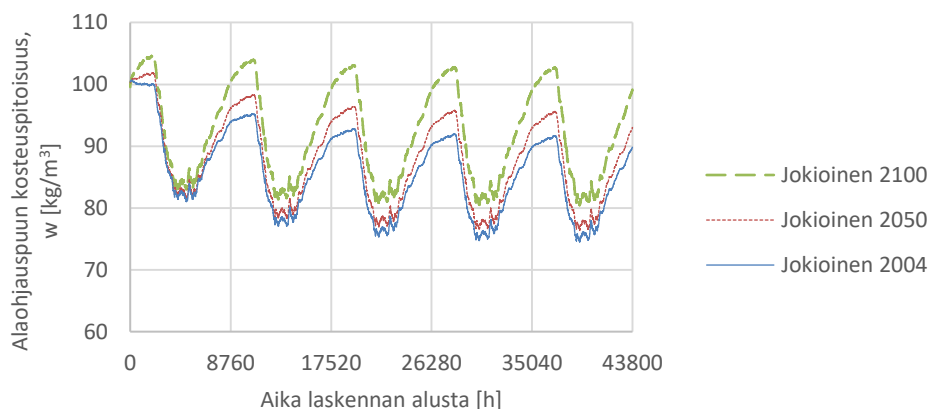
**Kuva 4.10.** Alaohjauspuun ja tuulensuojakipsilevyn välisen lämmöneristeyksen vaikutus kuivan alaohjauspuun (80 % RH, HHL1) kriittisten pisteiden homeindeksin maksimiarvoihin. (Pystyakselin asteikko vaihtelee)

Kuivan alaohjauspuun eristäminen alaohjauspuun ja tuulensuojakipsilevyn välistä paransi alaohjauspuun olosuhteita huomattavasti. 5 mm paksu XPS-eriste pienensi alaohjauspuun homeindeksin maksimiarvon alle sallitun raja-arvon kaikissa tarkastelupisteissä myös tulevaisuuden ilmastoissa. Kuvasta 4.10 nähdään, että bitumoitu puukuitulevy pienentää tarkastelupisteiden homeindeksin maksimiarvoa enemmän kuin XPS-eriste, vaikka sen lämmöneristävyys on heikompi, koska bitumoitu puukuitulevy läpäisee vesihöyryä XPS-eristettä paremmin ja sallii alaohjauspuun kuivumisen rakenteesta ulospäin.



## Alaohjauspuun kuivuminen

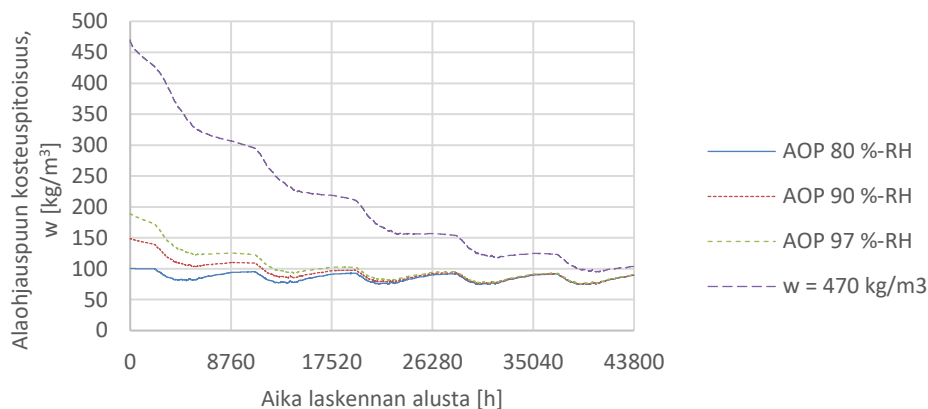
Laskentatarkasteluissa selvitettiin alaohjauspuun lämmöneristystapojen vaikutuksia alaohjauspuun kuivumiseen ja kuivumisen vaikutusta alaohjauspuun homeindeksiin. Alaohjauspuun kuivumisen tarkasteluissa alaohjauspuun kosteuspitoisuus laskettiin keskiarvona alaohjauspuun alueelta. Kuvasta 4.11 nähdään, miten ilmastonmuutos vaikuttaa alaohjauspuun tasapainokosteuspitoisuussykliin.



**Kuva 4.11.** Rakennusfysikaalisen testivuoden (ilmastonmuutoksen) vaikutus eristämättömän, kuivan alaohjauspuun (80 % RH) kosteuspitoisuuteen. Seinärakenne US1.

Puuverhottujen seinärakenteiden alaohjauspuun kuivumisen tarkasteluissa käytettiin Jokioisten vuoden 2004 ilmasto-olosuhteita, mutta kuten yllä olevasta kuvasta havaitaan, ilmastonmuutos hidasti alaohjauspuun kuivumista, koska alaohjauspuun kosteuspitoisuus oli korkeampi tulevaisuuden ilmastoissa. Viiden vuoden tarkastelujakson aikana alaohjauspuun kosteuspitoisuuden keskiarvojen ero rakennusfysikaalisten testivuosien välillä oli suurimmillaan  $11,0 \text{ kg/m}^3$ .

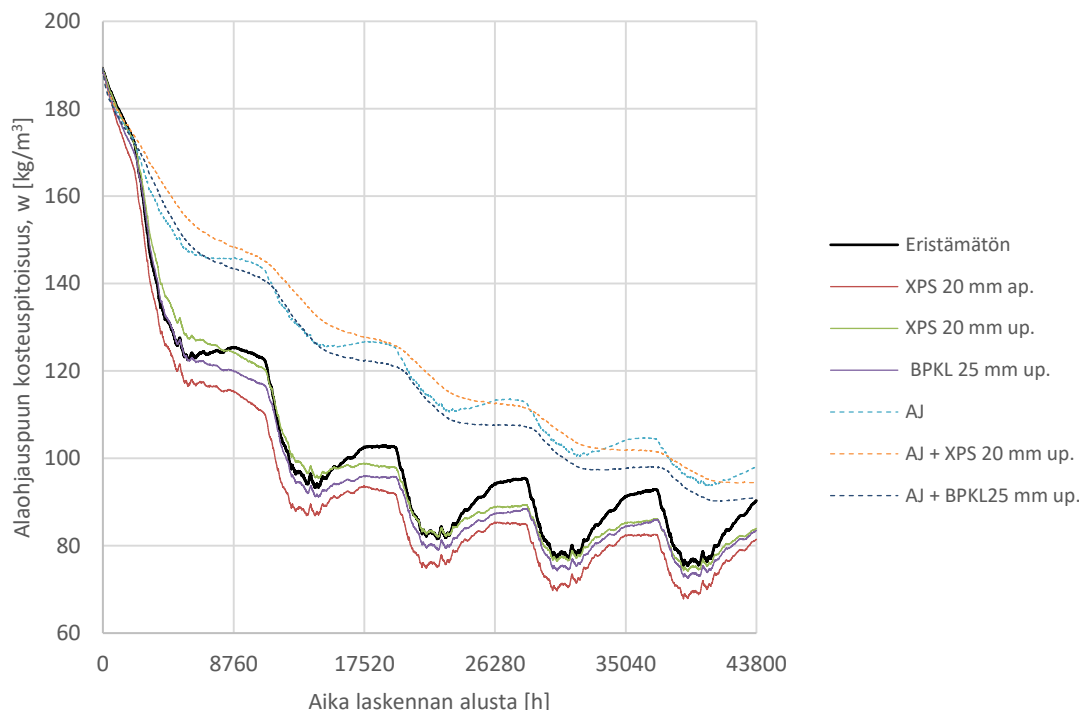
Kuvassa 4.12 on esitetty eristämättömän alaohjauspuun kosteuspitoisuus laskentajakson aikana eri alkukosteuspitoisuuksilla.



**Kuva 4.12.** Eristämättömän alaohjauspuun kosteuspitoisuus tarkastelujakson aikana eri alkukosteuspitoisuuksilla Jokioisten vuoden 2004 ilmasto-olosuhteissa laskettuna. Seinärakenne US1.

Kolme alhaisinta alkukosteuspitoisuutta (80 % RH, 90 % RH ja 97 % RH) tasoittuivat samaan kosteuspitoisuussykliin noin kolmen vuoden kuluttua laskennan alusta. Vesikontaktissa ollut alaohjauspuu ( $w = 470$  kg/m<sup>3</sup>) ei kuivunut alhaisempia alkukosteuspitoisuuksia vastaavalle tasolle tarkastelujakson aikana. Tarkastelujakson lopussa vesikontaktissa olleen alaohjauspuun kosteuspitoisuus poikkesi alhaisemmista alkukosteuspitoisuuksista noin 14 kg/m<sup>3</sup>.

Alapohjaliitosten ja alaohjauspuun eristysratkaisujen vaikutuksia alaohjauspuun kuivumiseen vertailtiin kastuneella alaohjauspuulla (97 % RH). Kuvassa 4.13 on esitetty eri tavoin lämmöneristetyin alaohjauspuun kosteuspitoisuus paikalla rakennettujen ja elementtirakenteisten ulkoseinien alapohjaliitoksessa.



**Kuva 4.13.** Alaohjauspuun kosteuspitoisuus tarkastelujakson aikana Jokioisten vuoden 2004 säädatalla laskettuna. Seinärakenne US1. (Alaohjauspuun alkukosteuspitoisuus 97 % RH)

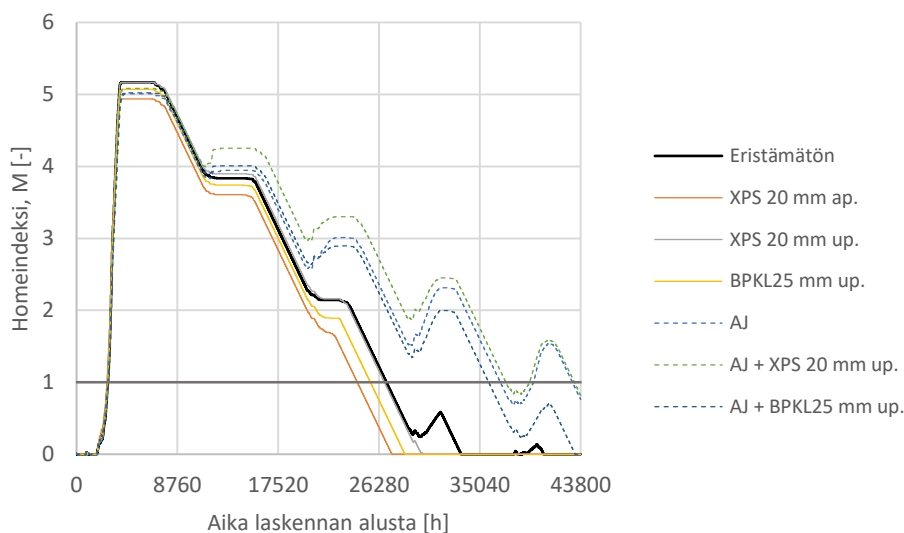
Alaohjauspuun kuivumisen kannalta lämmöneristäminen alaohjauspuun ja perusmuurin välistä oli tarkastelluista lämmöneristyratkaisuista parempi. Alaohjauspuun ja tuulensuojalevyn välisistä lämmöneristeistä bitumoitu puukuitulevy oli kuivumisen kannalta paremmin toimiva ratkaisu. Bitumoitu puukuitulevy on XPS-eristettä heikompi lämmöneriste, mutta sen läpäisee paremmin vesihöyryä, minkä seurauksena alaohjauspuu kuivuu tehokkaammin. Tarkastelujakson alussa XPS-eristeellä lämmöneristetyn rakenteen kuivuminen oli jopa hitaampaa verrattuna eristämättömään rakenteeseen. Myös alajuoksullisen alapohjaliitoksen tapauksessa bitumoitu puukuitulevy toimi kuivumisen kannalta paremmin kuin XPS-eriste.

Kuivan alaohjauspuun tarkasteluissa havaittiin, että alajuoksun lisääminen alaohjauspuun päälle ei kasvata alaohjauspuun tarkastelupisteiden homeindeksin maksimiarvoja. Alajuoksun lisääminen alaohjauspuun päälle kuitenkin hidasti merkittävästi alaohjauspuun kuivumista, koska kosteuden siirtyminen eristetilaan hidastui. Kuivumisen hidastumisen seurauksena kastunut alaohjauspuu altistui pidempiaikaisesti homeenkasvulle otollisille olosuhteille.

Alajuoksullisen alapohjaliitoksen alaohjauspuun kosteuspitoisuutta ei tarkasteltu alaohjauspuun ja perusmuurin välistä lämmöneristetyllä rakenteella. Kuvan 4.13 perusteella voidaan kuitenkin todeta, että lämmöneristäminen alaohjauspuun ja perusmuurin välistä olisi toimiva ratkaisu myös alajuoksullisessa alapohjaliitoksessa, koska lämmöneriste

nostaa alaohjauspuun lämpötilaa eikä estä kosteuden kuivumista alaohjauspuun ulkoreunasta.

Kuvasta 4.5 nähtiin, että rakennusaikana kastuneen alaohjauspuun alapinnassa homeindeksin maksimiarvo pysyi korkeana useiden vuosien ajan. Kuvassa 4.14 on esitetty jatkuvana laskettu homeindeksi alaohjauspuun alapinnan keskiosan tarkastelupisteessä (ap\_aop\_ka), jossa homeindeksin maksimiarvo oli pitkäaikaisissa tarkasteluissa korkein.



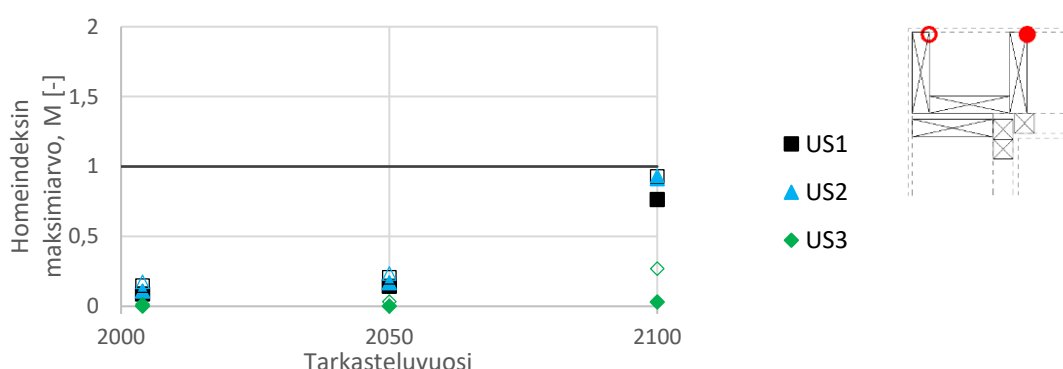
**Kuva 4.14.** Kastuneen alaohjauspuun (97 % RH, HHL1) alapinnan tarkastelupisteeseen (ap\_aop\_ka) jatkuvana laskettu homeindeksi tarkastelujakson aikana Jokioisten vuoden 2004 säädatalla laskettuna. Seinärakenne US1.

Kastuneen alaohjauspuun (97 % RH) alapinnassa homeindeksi nousi ensimmäisenä vuonna erittäin korkeaksi, minkä jälkeen se alkoi alaohjauspuun kuivumisen seurauksena laskea. Alajuoksullisessa alapohjaliitoksessa alaohjauspuun kuivuminen oli hitaampaa, minkä seurauksena alaohjauspuun alapinnan homeindeksi pieneni hitaammin kuin alajuoksuttomassa alapohjaliitoksessa. Alajuoksuttomassa alapohjaliitoksessa kaikki lämmöneristysratkaisut nopeuttivat tarkastelupisteeseen homeindeksin pienenemistä verrattuna eristämättömään alaohjauspuuhun. Alajuoksullisessa liitoksessa eristäminen bitumoidulla puukuitulevyllä alaohjauspuun ja tuulensuojakipsilevyn nopeuttivat homeindeksin pienenemistä, mutta eristäminen XPS-levyllä päinvastoin hidasti.

### 4.1.3 Ulkonurkkaliitos

Puuverhottujen ulkonurkkaliitosten tarkasteluissa tutkittiin seinärakenteen, höyrönsulun sijainnin ja materiaalin sekä liitososien vaikutuksia nurkan lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan. Tarkasteluja tehtiin ideaalisille rakenteille ja lisäksi virheellisille rakenteille, joihin mallinnettiin ilmavuoto.

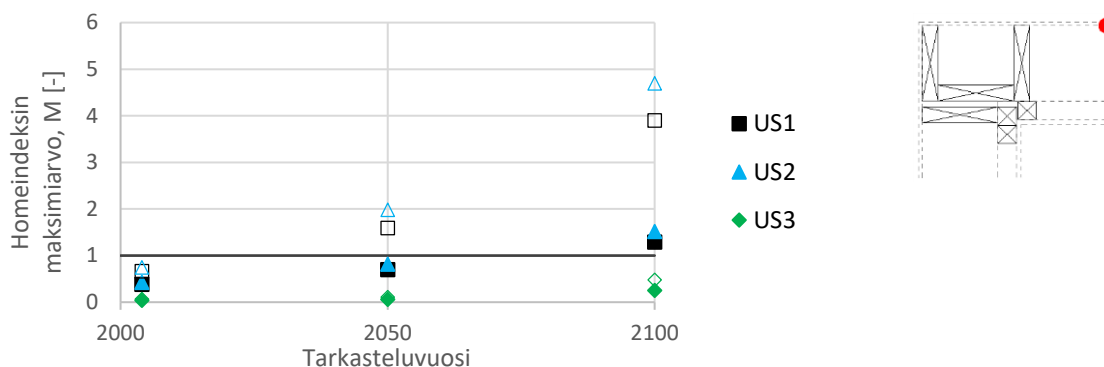
Seinärakenteen vaikutusta ulkonurkkaliitoksen kosteustekniseen toimintaan tarkasteltiin seinärakenteilla US1 - US3. Kuvassa 4.15 on esitetty homeindeksin maksimi-arvot ulkonurkkaliitoksen runkotolppien ulkonurkissa. Pohjoisseinän vastaisen runkotolpan ulkonurkan tarkastelupisteen (un\_rt\_2) homeindeksit on merkitty kuvaan täysillä kuvioilla ja nurkan uloimman runkotolpan ulkonurkan (un\_rt\_3) homeindeksit tyhjillä kuvioilla.



**Kuva 4.15.** Homeindeksin maksimi-arvot runkotolppien ulkonurkissa (HHL1). Tarkastelupisteet un\_rt\_2 (täydet kuviot) ja un\_rt\_3 (tyhjät kuviot).

Homeindeksin maksimi-arvot eivät ylittäneet sallittua raja-arvoa runkotolppien ulkonurkissa. Seinärakenteilla US1 ja US3 homeindeksin maksimi-arvot olivat suurempia uloimman runkotolpan nurkassa kuin pohjoisseinän vastaisen runkotolpan ulkonurkassa. Seinärakenteella US2 molempien tarkastelupisteiden homeindeksin maksimi-arvot olivat lähes yhtä suuria. Homeindeksin maksimi-arvot jäivät alhaisimmiksi tuulensuojakipsilevyn ulkopuolelta eristetyllä seinärakenteella US3.

Tuulensuojakipsilevyn sisäpinnan tarkastelupiste runkotolppien välissä pohjoisseinällä (un\_ts\_2) osoittautui kriittisimmäksi tuulensuojakipsilevyn tarkastelupisteeksi ilmavuodottomien puuverhottujen rakenteiden ulkonurkissa. Kuvassa 4.16 on esitetty tuulensuojakipsilevyn sisäpinnan homeindeksin maksimi-arvot homehtumisherkkyysluokissa 1 ja 2 laskettuna.

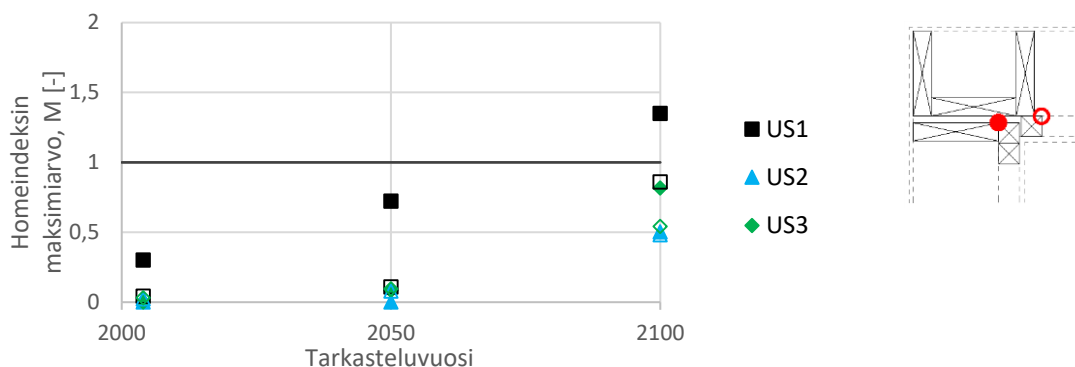


**Kuva 4.16.** Homeindeksin maksimiarvot tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homehtumisherkkyyssluokissa 1 ja 2 (täydet kuviot HHL2, tyhjät kuviot HHL1).

Seinärakenteiden US1 ja US2 ulkonurkissa tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homeindeksin arvo nousi yli sallitun raja-arvon Jokioisten vuoden 2100 ilmasto-olosuhteissa, kun tuulensuojakipsilevylle käytettiin homehtumisherkkyyssluokan 2 parametreja. Mikäli tuulensuojakipsilevylle käytettiin homehtumisherkkyyssluokan 1 mukaisia parametreja, tuulensuojakipsilevyn sisäpinnan homeindeksin maksimiarvo nousi yli sallitun raja-arvon jo Jokioisten vuoden 2050 ilmasto-olosuhteissa. Tuulensuojakipsilevyn homehtumisherkkyyssluokasta riippumatta tuulensuojamineraalivillalla lisäeristetyssä seinärakenteessa US3 homeindeksin maksimiarvo ei noussut sallitun raja-arvon yläpuolelle.

Ulkonurkkaliitosten laskentatarkasteluissa havaittiin, että homeindeksi nousee sisäpuolisen koolauksen höyrynsulkua vasten olevissa nurkissa. Sisäkoolauksen ulkonurkkien homeindeksin nousu johtuu siitä, että sisäilman kosteus läpäisee höyrynsulkukerroksen sisäpuoliset rakenteet helposti ja nostaa siten sisäkoolauksen kosteuspitoisuutta. Sisäkoolauksen ulkonurkat ovat yhteydessä ulkonurkkaliitoksen kylmäsiltoihin, mikä laskee niiden lämpötilaa, mikä edelleen nostaa niiden suhteellista kosteutta. Korkea suhteellinen kosteus yhdistettynä jatkuvasti homeen kasvun mahdollistavaan lämpötilaan altistaa sisäkoolauksen ulkonurkat homeenkasvulle otollisille olosuhteille. Homeindeksin nousu höyry- ja ilmansulkuna toimivan muovikalvon sisäpuolissa rakenteissa on vakava kostustekninen riski, koska homeitiöt pääsevät tällöin kulkeutumaan helposti sisäilmaan.

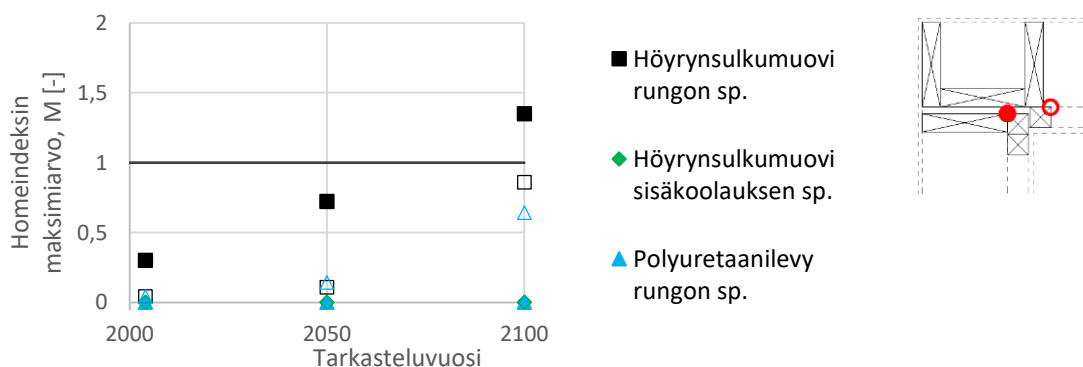
Kuvassa 4.17 on esitetty homeindeksin maksimiarvot sisäpuolisen koolauksen nurkissa. Kuvan tulokset on laskettu käyttämällä kuvan 4.19a) mukaista nurkan tolpitusta ja sisäpuolista koolausta.



**Kuva 4.17.** Homeindeksin maksimi-arvot sisäkoolauksen nurkissa (HHL1). Tarkastelupisteet un\_sk\_1 (täydet kuviot) ja un\_sk\_2 (tyhjät kuviot).

Seinärakenteen US1 ulkonurkassa homeindeksin maksimi-arvo ylitti sallitun raja-arvon tarkastelupisteessä un\_sk\_1 tulevaisuuden ilmastossa Jokioinen 2100. Seinärakenteissa US2 ja US3 homeindeksin maksimi-arvot eivät nousseet sisäkoolauksen nurkissa yli sallitun raja-arvon. Kyseisissä seinärakenteissa kylmäsillat eivät viilennä sisäkoolauksta yhtä paljon kuin seinärakenteessa US1, koska rakenteissa on enemmän lämmöneristettä sisäkoolauksen ulkopuolella.

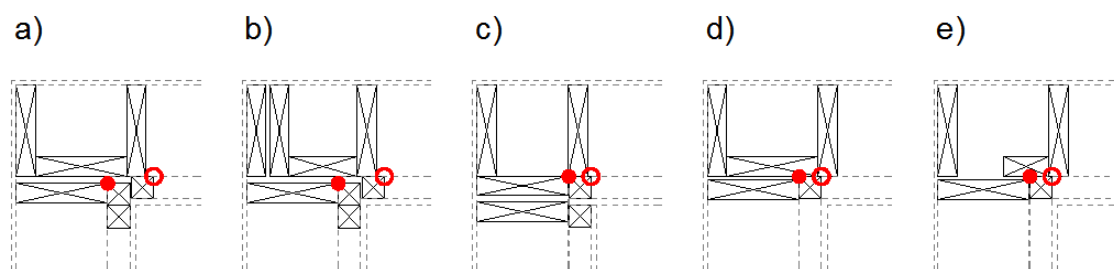
Rungon sisäpuolisten koolauksen lämpö- ja kosteusolosuhteisiin voidaan vaikuttaa merkittävästi muuttamalla höyrynsulkukerroksen sijaintia tai materiaalia. Kuvassa 4.18 on esitetty, miten höyrynsulkumuovin siirtäminen rungon sisäpinnasta (sp.) sisäkoolauksen sisäpintaan tai höyrynsulkumuovin korvaaminen polyuretaanilevyllä vaikuttaa sisäkoolauksen nurkkien homeindeksin maksimi-arvoihin. Höyrynsulkuna toimiva polyuretaani-levy sijoitettiin rungon sisäpintaan ja sisäpuolinen koolaus polyuretaani-levyn sisäpintaan (polyuretaani-levyä ei ole eristetty tulososion kuvissa). Samalla höyrynsulun sisäpuolinen mineraalivilla poistettiin rakenteesta. Polyuretaani-levyn tapauksessa edellä mainitut toimenpiteet nostavat sisäkoolauksen lämpötilaa.



**Kuva 4.18.** Höyrynsulun sijainnin vaikutus seinärakenteen US1 ulkonurkkaliitoksen sisäpuolisen koolauksen nurkkien homeindeksin maksimi-arvoon (HHL1). Tarkastelupisteet un\_sk\_1 (täydet kuviot) ja un\_sk\_2 (tyhjät kuviot).

Molemmat tarkastellut höyrynsulkuvaihtoehdot paransivat sisäkoolauksen kosteusteknistä toimintaa. Höyrynsulkumuovin siirtäminen rungon sisäpinnasta sisäkoolauksen sisäpintaan lasi homeindeksin maksimiarvot sisäkoolauksen nurkissa nollaan. Myös höyrynsulkumuovin korvaaminen polyuretaanilevyllä lasi homeindeksin maksimiarvon alle raja-arvon vuoden 2100 ilmastossa.

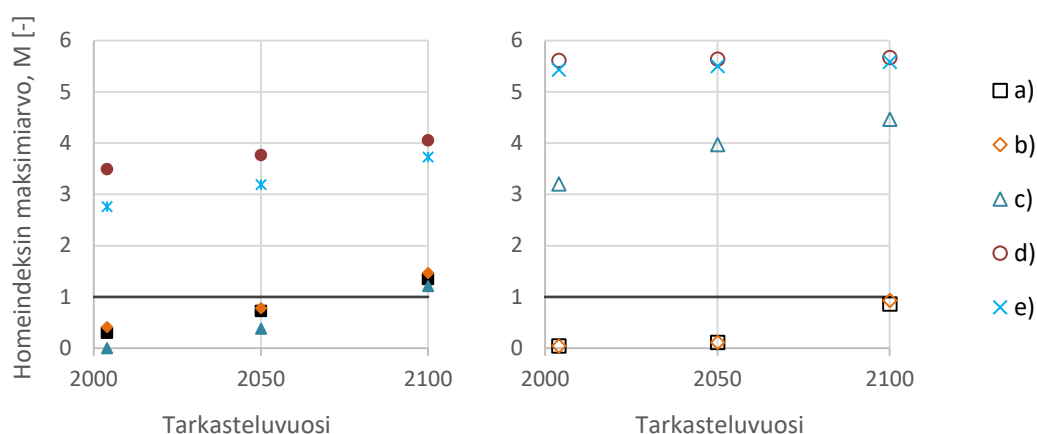
Nurkan tolpituksen vaikutuksia ulkonurkkaliitosten kosteustekniseen toimintaan tutkittiin kuvassa 4.19 esitetyillä nurkan tolpitus- ja koolausvaihtoehdoilla. Kuvassa a) on esitetty ulkonurkkien rakenneosien asettelun perustapaus, jota on käytetty edellä esitettyjen ulkonurkkaliitosten tulosten laskennassa. Kuva b) kuvaa tilannetta, jossa ulkonurkkaan on tuettu esimerkiksi katos, joka vaatii tuekseen useamman runkotolpan. Kuvassa c) runkotolpat on aseteltu toisin, jolloin sisäpuolisia koolauksia on tarvittu kaksi. Kuvissa d) ja e) ulkonurkassa on vain yksi sisäpuolinen koolaus, jota käytetään yleensä seinän vaakasuuntaisen sisäkoolauksen yhteydessä höyrynsulun liitoksen tiivistämiseen tai seinien kuormien välittämiseen nurkassa.



**Kuva 4.19.** Nurkan tolpitus- ja koolausvaihtoehdot.

Ulkonurkkaliitoksen runkotolppien asettelulla ja määrällä sekä sisäkoolauksen määrällä havaittiin olevan merkittävä vaikutus vain sisäkoolauksen nurkkien homeindeksin arvoihin (kuva 4.20).



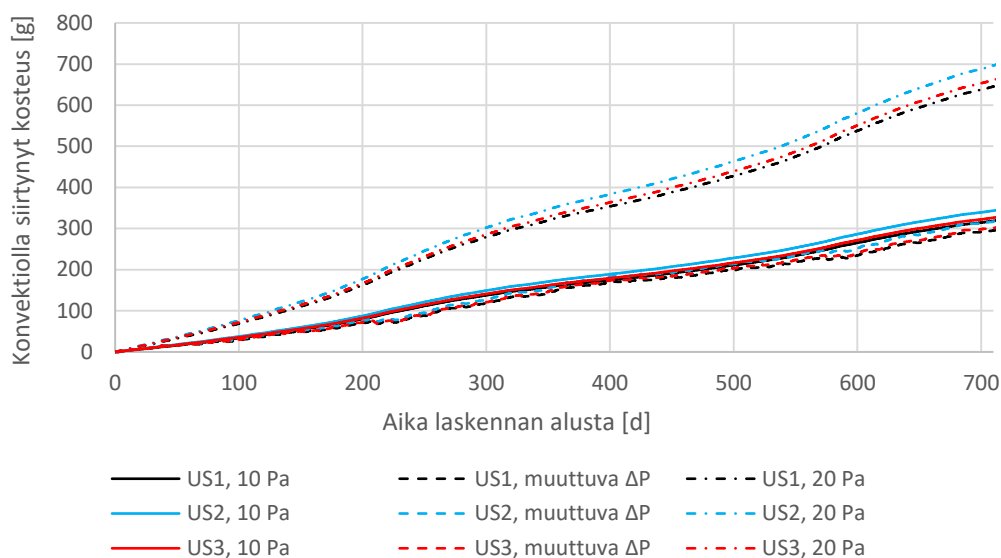


**Kuva 4.20.** Homeindeksin maksimi-arvot sisäkoolauksen nurkissa erilaisilla nurkan tolpi-tuksilla ja sisäkoolausten määrällä (HHL1). Vasemmalla tarkastelupiste un\_sk\_1 (täydet kuviot) ja oikealla tarkastelupiste un\_sk\_2 (tyhjät kuviot).

Kuvasta 4.20 nähdään, että runkotolppien lisääminen ulkonurkkaliitokseen ei vaikuttanut sisäkoolauksen nurkkien homeindeksin maksimi-arvoihin. Sisäkoolausten vähentäminen nurkassa sen sijaan nosti sisäkoolauksen nurkkien homeindeksin maksimi-arvoja huomattavasti, lähes homemallin maksimiin sisäkoolauksen pohjoisseinän vastaisessa nurkassa. Höyrynsulkukerroksen sijainnilla ja materiaalilla voitaisiin tässäkin tilanteessa vaikuttaa sisäkoolauksen nurkkien homeindeksien arvoihin, mutta tässä tutkimuksessa ei tarkasteltu höyrynsulkukerroksen muutoksia yhdistettynä nurkan tolpiteen ja sisäkoolauksen asetteluihin.

### Ilmavuodot puuverhottujen seinärakenteiden ulkonurkkaliitoksissa

Tutkimuksessa selvitettiin nurkkaliitosten vikasietoisuutta mallintamalla rakenteisiin ilmavuotoja. Ilmavuototarkasteluissa tarkasteltiin liitoksen toimintaa 6 m korkean ulkoseinän yläosassa. Kuvassa 4.21 on esitetty runkotolppien väliin mallinnetun raon (ilmavuotoreitti 1, kuva 3.31) läpi siirtyvä vesihöyry määrä seinärakenteissa, joissa tuulensuojakipsilevy on asennettu ideaalisesti, jolloin tuulensuojakipsilevyllä on käytetty ehjää levyä vastaavaa ilmanläpäisevyyttä. Ulkoilman olosuhteina on käytetty Jokioisten vuoden 2004 ilmasto-olosuhteita.



**Kuva 4.21.** Raon läpi konvektiolla siirtyneen kosteuden määrä eri ulkoseinärakenteilla ja paine-eroilla.

Lämpötilaeron ja tuulen aiheuttamaa paine-eroa (muuttava  $\Delta P$ ) käytettäessä konvektiolla raon läpi siirtyvän vesihöyryn määrä oli kaikilla tutkituilla seinärakenteilla lähes sama kuin 10 Pa vakiopaine-erolla siirtyvän vesihöyryn määrä. 20 Pa vakiopaine-erolla siirtyy noin kaksinkertainen määrä vesihöyryä verrattuna 10 Pa vakiopaine-eroon.

Taulukossa 4.1 on esitetty 10 Pa vakiopaine-erolla raon läpi siirtyvä vesihöyry- ja ilmamäärä Jokioisten vuoden 2004 ilmasto-olosuhteissa, kun ilmavuoto mallinnettiin runkotolppien väliin (ilmavuotoreitti 1).

**Taulukko 4.1.** Ulkonurkkaliitokseen runkotolppien väliin mallinnetun raon läpi siirtyvä vesihöyry- ja ilmamäärä, kun paine-ero oli 10 Pa.

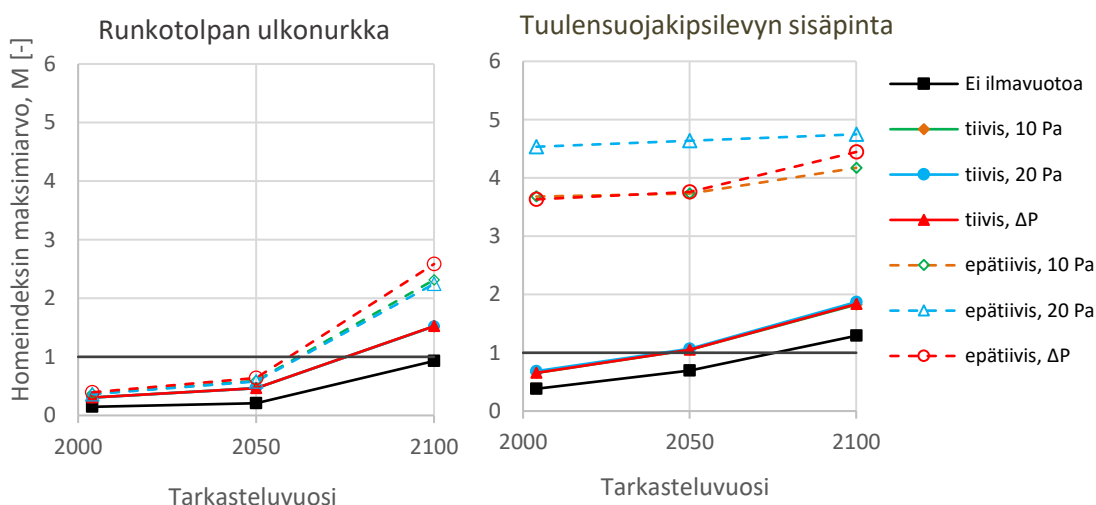
	Raon läpi siirtyvä vesihöyrymäärä [g/a]	Raon läpi siirtyvä ilmamäärä [dm <sup>3</sup> /min]
US1 - tiivis	163.1	0.0311
US2 - tiivis	176.0	0.0397
US3 - tiivis	167.2	0.0382
US1 - epätiivis	14869.6	2.835
US2 - epätiivis	14754.9	2.8124
US3 - epätiivis	12568.0	2.3965

Darcyn lain mukaan rakenteen läpäisevän ilman määrä on lineaarinen paine-eron suhteen, mutta todellisuudessa materiaalin ilmanläpäisevyys ei ole vakio paine-eron suhteen, vaan arvoissa tulisi näkyä neliöjuurimallin tyypistä käyttäytymistä. Heikosti asennettua tuulensuojakipsilevyä kuvaava ilmanläpäisevyyden satakertaistaminen lähes satakertaisti

konvektiolla siirtyvän vesihöyryn määrän. Rakenteessa suurin osa paine-eron pudotuksesta tapahtuu tuulensuojakipsilevyn yli, joten tuulensuojakipsilevyn ilmanläpäisevyydellä on myös suurin vaikutus rakenteen läpäisevän ilman määrään. Ilma läpäisee heikosti asennetun tuulensuojakipsilevy helpommin kuin huolellisesti asennettu tuulensuojalevy, joten raon läpi virtaa myös enemmän kosteutta.

Kalamees et al. (2017) ovat tutkineet rakenneliitosten ilmanpitävyyttä laboratoriossa mitauksilla. Tutkimuksessa ulkoseinän ulkonurkkaliitoksen läpi virtaavaksi ilmamääräksi mitattiin 10 Pa paine-erolla  $4,6 - 5,8 \text{ dm}^3/(\text{min}\cdot\text{m})$ . Laskentatarkasteluissa rakennemallin syvyys oli 1 metri, joten tutkimuksen tuloksia voidaan verrata suoraan laskennan tuloksiin. Taulukosta 4.1 nähdään, että Kalamees et al. (2017) tutkimuksessa mitatut ilmamäärät olivat suurempia kuin tässä tutkimuksessa lasketut, heikosti asennetun tuulensuojalevyllisen rakenteen raon läpi virtaavat ilmamäärät, joten rakenteiden tutkiminen myös tuulensuojakipsilevyn ilmanläpäisevyyttä suuremmalla ilmanläpäisevyyden arvolla on tarpeellista.

Kuvassa 4.22 on esitetty homeindeksin maksimi-arvot pohjoisseinän vastaisen runkotolpan nurkassa (un\_rt\_2) ja tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa (un\_ts\_2) seinärakenteella US1, kun ilmavuoto mallinnettiin runkotolppien väliin (ilmavuotoreitti 1).

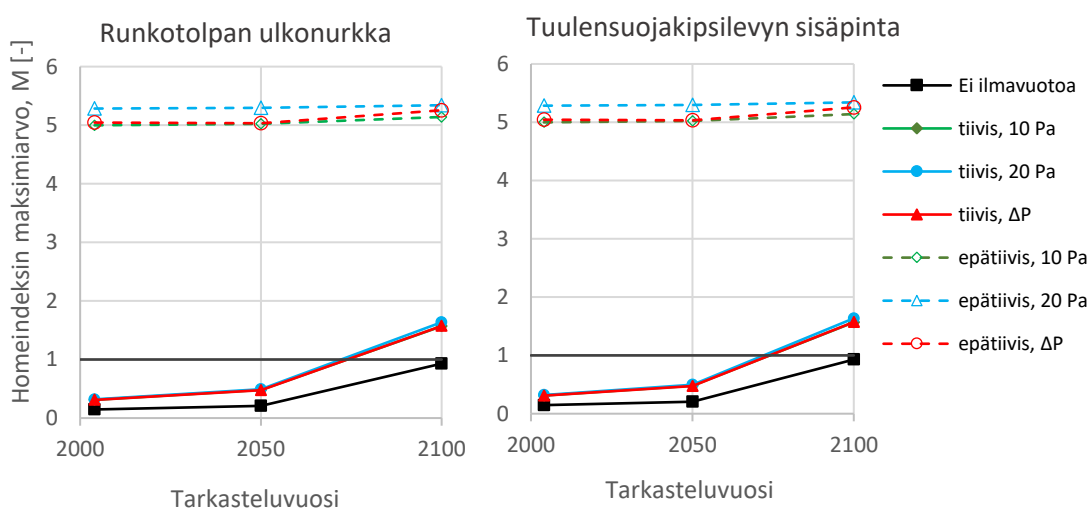


**Kuva 4.22.** Homeindeksin maksimi-arvo runkotolpan nurkassa (un\_rt\_2, HHL1) ja tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa (un\_ts\_2, HHL2). Ilmavuoto runkotolppien väliin. Seinärakenne US1.

Kun tuulensuojakipsilevy oli asennettu ideaalisen tiiviisti, homeindeksin maksimi-arvo ei noussut yli raja-arvon nykyilmastossa runkotolpan ulkonurkassa eikä tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa. Ilmastonmuutos lisää konvektiolla siirtyvän vesihöyryn määrää, koska sisäilman kosteus lasketaan kosteuslisänä ulkoilman kosteuteen ja ilmastonmuutoksen seurauksena ulkoilman suhteellinen kosteus kasvaa. Tiiviin rakenteen tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homeindeksi nousi juuri raja-arvon yläpuolelle vuoden 2050 ilmas-

tossa ja melkein arvoon 2,0 vuoden 2100 ilmastossa. Ideaalisen tiiviissä rakenteessa runkotolpan ulkonurkassa homeindeksin raja-arvo ylittyi vasta vuoden 2100 ilmastossa. Heikosti asennettu, epätiivis tuulensuojakipsilevy kasvatti tarkastelupisteiden homehtumisriskiä etenkin tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa, kun homeindeksi maksimiarvo nousi nykyilmastossakin yli arvon 3,0.

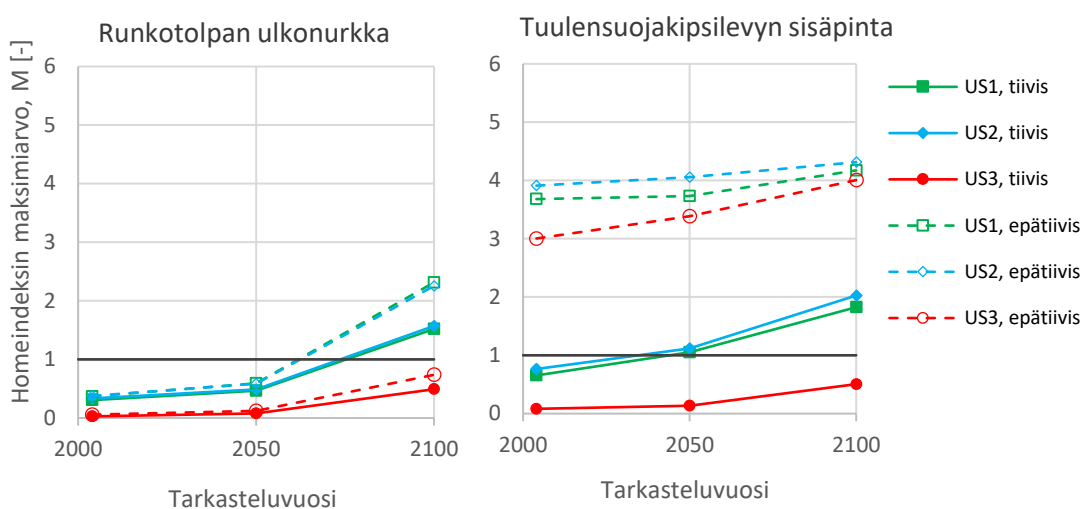
Seuraavaksi ilmavuoto mallinnettiin runkotolppien nurkkaan muodostamaan ”koteloon” (ilmavuotoreitti 2, ks. kuva 3.31). Ilmavuotoreitin muutoksen seurauksena raon ja tuulensuojan pinta-alojen suhde muuttui, mikä vaikutti ilmavuodon määrään ja sen seurauksena konvektiivisesti siirtyvän vesihöyryn määrään. Seinärakenteiden US1 ja US3 liitoksissa raon läpi konvektiivisesti siirtyvän vesihöyryn määrä väheni. Raon läpi siirtyvä vesihöyrymäärät ideaalisen tiiviisti asennetulla tuulensuojakipsilevyllä olivat taulukon 4.1 ensimmäistä saraketta vastaavasti 151,6 ja 160,6 g/a. Seinärakenteella US2 raon läpi siirtyvän vesihöyryn määrä kasvoi (250,7 g/a). Kuvassa 4.23 on esitetty uloimman runkotolpan ulkonurkan (un\_rt\_3) ja kotelon tuulensuojakipsilevyn sisäpinnan (un\_ts\_1) tarkastelupisteiden homeindeksien maksimiarvot ulkoseinärakenteen US1 ulkonurkassa.



**Kuva 4.23.** Homeindeksin maksimiarvo uloimman runkotolpan nurkassa (un\_rt\_3, HHL1) ja tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa (un\_ts\_1, HHL2). Ilmavuoto ”koteloon”. Seinärakenne US1.

Ideaalisen tiiviissä rakenteessa homeindeksin maksimiarvot runkotolpan nurkassa ja tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa olivat samoja kaikilla tarkastelluilla paine-eroilla. Kuvia 4.22 ja 4.23 vertaamalla nähdään, että tiiviissä rakenteessa homeindeksin maksimiarvot runkotolppien ulkonurkissa ja tuulensuojakipsilevyn sisäpinnoissa olivat lähellä toisiaan, vaikka tarkastelupisteiden paikat ja ilmavuotoreitit muuttuivat. Epätiivisissä rakenteissa sen sijaan ilmavuodon mallintaminen nurkan ”koteloon” nosti homeindeksin maksimiarvon molemmassa tarkastelupisteissä korkeammalle. Nurkan uloimmat osat ovat siis kriittisempiä ilmavuodoille, koska ne ovat pääsääntöisesti kylmemmissä olosuhteissa, suhteellinen kosteus on korkea ja kuivuminen hitaampaa.

Seinäarakenteen merkitystä ilmavuodollisten ulkonurkkaliitosten homeindekseihin on vertailtu kuvassa Kuva 4.24. Ilmavuoto mallinnettiin runkotolppien väliin (ilmavuotoreitti 1) ja paine-erona käytettiin 10 Pa vakioylipainetta.



**Kuva 4.24.** Homeindeksin maksimi-arvo eri seinäarakenteilla runkotolpan nurkassa (*un\_rt\_2*, HHL1) ja tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa (*un\_ts\_2*, HHL2). Ilmavuoto runkotolppien väliin. Paine-ero 10 Pa.

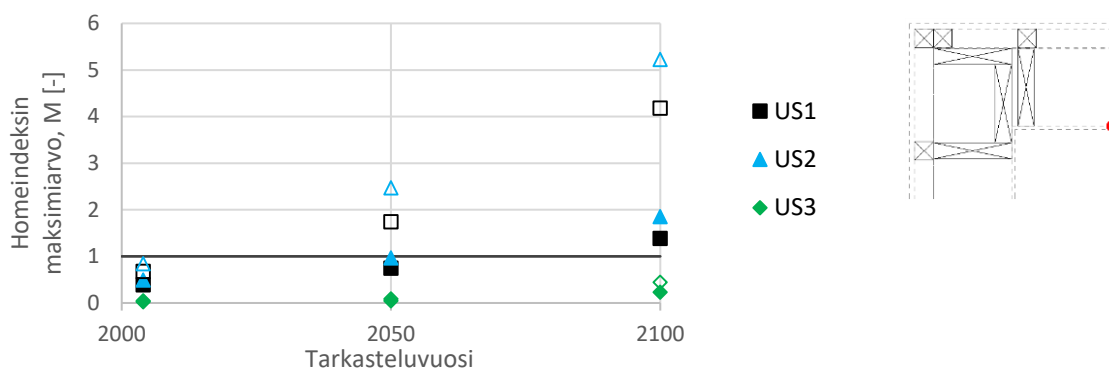
Seinäarakenteet US1 ja US2 käyttäytyivät lähes samoin tavoin ilmavuototarkasteluissa. Homeindeksin maksimi-arvo nousi yli sallitun raja-arvon ideaalisella tuulensuojakipsilevyn asennuksella runkotolpan ulkonurkassa tarkasteluvuonna 2100 ja tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa tarkasteluvuonna 2050. Rakenteellisen energiatehokkuuden vaatimuksen täyttävä seinärakenne (US2) ei ole perusrakenteeseen (US1) verrattuna merkittävästi heikompi rakenne, kun rakenteessa on ilmavuotoja.

30 mm paksun mineraalivillaan lisääminen tuulensuojakipsilevyn ulkopuolelle (US3) pienensi homeindeksin maksimi-arvoa ilmavuototarkasteluissa verrattuna seinäarakenteisiin US1 ja US2. Runkotolpan ulkonurkan homeindeksin maksimi-arvo ei noussut yli raja-arvon seinäarakenteella US3, vaikka tuulensuojakipsilevy mallinnettiin heikosti asennetuksi. Tuulensuojakipsilevyn sisäpinnan homeindeksin maksimi-arvoon asennuksen laadulla oli suurempi merkitys. Ideaalisesti asennetulla tuulensuojakipsilevyllä seinärakenne US3 täytti asetetut toimintakriteerit, vaikka höyrynsulkukerroksessa oli rako.

#### 4.1.4 Sisänurkkaliitos

Puuverhottujen seinärakenteiden sisänurkkaliitosten toimintaa tarkasteltiin vastaavasti kuin ulkonurkkaliitosten toimintaa tarkasteltiin. Tarkasteluissa tutkittiin seinärakenteen, höyrynsulun sijainnin ja materiaalin sekä liitososien vaikutuksia nurkan lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan. Tarkasteluja tehtiin ehjille ja ilmavuotoja sisältäville rakenteille.

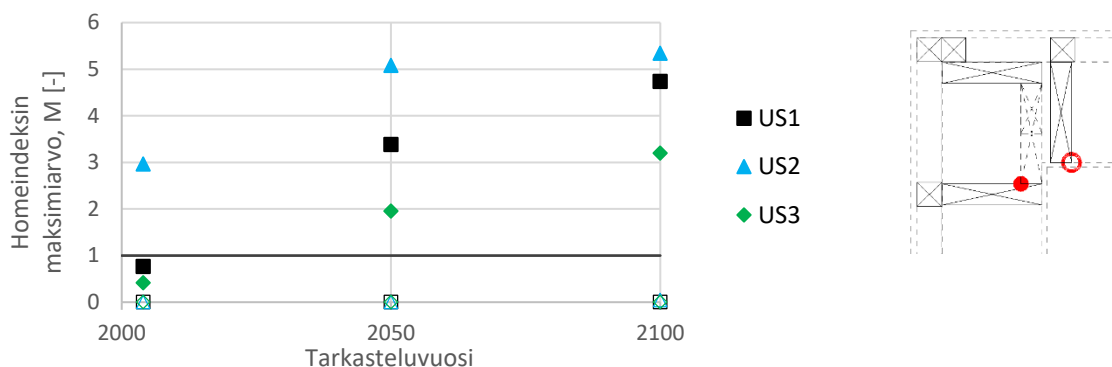
Kuvassa 4.25 on esitetty tuulensuojakipsilevyn sisäpinnan homeindeksin maksimi-arvot homehtumisherkkyyssluokissa 1 ja 2 laskettuna.



**Kuva 4.25.** Homeindeksin maksimi-arvot tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homehtumisherkkyyssluokissa 1 ja 2 (täydet kuviot HHL2, tyhjät kuviot HHL1).

Tuulensuojakipsilevyn sisäpinnan homeindeksin maksimi-arvo käyttäytyi sisänurkkaliitoksessa samalla tavalla kuin ulkonurkkaliitoksessa, mutta maksimi-arvot olivat sisänurkkaliitoksessa suurempia. Seinärakenteessa US3 tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa ei havaittu homehtumisriskiä edes tuulensuojakipsilevyn homehtumisherkkyyssluokalla 1.

Puuverhottujen seinärakenteiden sisänurkkaliitosten tuulensuojakipsilevyn sisäpintaa kriittisemmäksi pisteeksi osoittautui nurkan runkotolppien muodostaman ”kotelon” ulkonurkka (sn\_rt\_1) (ks. alaluku 3.6.3). Sisänurkkaliitoksessa runkotolpat muodostavat rakenteeseen heikosti vesihöyryä läpäisevän kerroksen rakenteen ulkopintaan, minkä seurauksena suhteellinen kosteus nousee kotelon ulkonurkassa ajoittain korkeaksi. Kuvassa 4.26 on esitetty homeindeksin maksimi-arvot sisänurkkaliitosten runkotolppien nurkissa.



**Kuva 4.26.** Homeindeksin maksimi-arvot runkotolppien ulkonurkissa (HHL1). Tarkastelupisteet *sn\_rt\_1* (täydet kuviot) ja *sn\_rt\_2* (tyhjät kuviot).

Runkotolppien muodostaman ”kotelon” ulkonurkassa homeindeksin maksimi-arvot nousivat korkeiksi kaikilla tutkituilla seinärakenteilla. Seinärakenteiden US1 ja US3 sisänurkkaliitoksissa homeindeksin maksimi-arvot eivät ylitä raja-arvoa nykyilmastossa, mutta tulevaisuuden ilmastossa raja-arvo ylittyy myös näillä rakenteilla. Eristekerroksen paksuuden kasvattaminen lisää tarkastelupisteen (*sn\_rt\_1*) homehtumisriskiä, kun taas eristäminen tuulensuojan ulkopuolelta vähentää sitä. Pohjoisseinän vastaisen runkotolpan ulkonurkassa homeindeksin maksimi-arvot pysyivät nollassa.

Päinvastoin kuin ulkonurkkaliitoksissa, sisänurkkaliitoksissa höyrynsulkukerroksen sijainnilla, materiaalilla tai sisäpuolisen koolauksen asettelulla ei havaittu olevan vaikutusta liitoksen osien kosteustekniseen toimintaan. Toisaalta sisänurkkaliitoksissa rakenneosien kosteustekniseen toimintaan voidaan vaikuttaa tolppien sijoittelulla. Runkotolppien muodostaman kotelon avaaminen esimerkiksi poistamalla tai vaihtamalla kuvassa 4.26 katkoviivalla esitetty runkotolppa kapeampaan muuttaa rakenteiden toimintaa niin, että homeindeksin maksimi-arvo ei nouse liitoksen osissa yli sallitun raja-arvon.

### Ilmavuodot puuverhottujen seinärakenteiden sisänurkkaliitoksissa

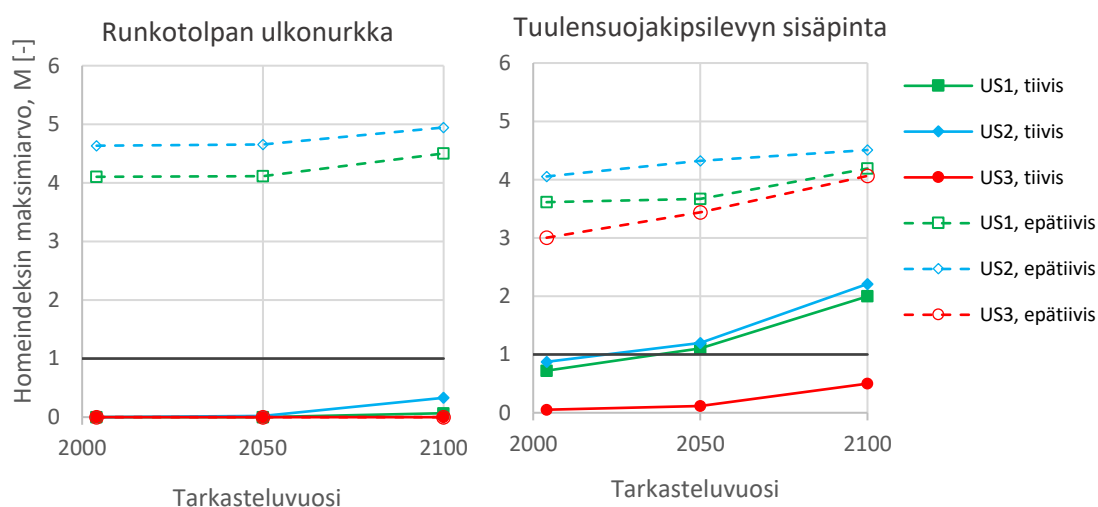
Ilmavuotojen vaikutuksia sisänurkkaliitosten kosteustekniseen toimintaan tarkasteltiin vastaavasti kuin edellä ulkonurkkaliitoksien kohdalla tarkasteltiin. Ilmavuoto tarkasteluissa tarkasteltiin liitoksen toimintaa 6 m korkean ulkoseinän yläosassa. Kun ilmavuoto mallinnettiin runkotolppien väliin, ilmavuodot käyttäytyivät sisänurkkaliitoksissa samalla tavoin kuin ulkonurkkaliitoksissa. Taulukossa 4.2 on esitetty 10 Pa vakiopaineerolla runkotolppien väliin mallinnetun raon läpi siirtyvä vesihöyry- ja ilmamäärä Joki-oisten vuoden 2004 ilmasto-olosuhteilla laskettuna.

**Taulukko 4.2.** Sisänurkkaliitokseen runkotolppien väliin mallinnetun raon läpi siirtyvä vesihöyry- ja ilmamäärä. Paine-ero 10 Pa.

	Raon läpi siirtyvä vesihöyrymäärä [g/a]	Raon läpi siirtyvä ilmamäärä [dm <sup>3</sup> /min]
US1 - tiivis	138.4	0.031
US2 - tiivis	145.2	0.032
US3 - tiivis	139.7	0.031
US1 - epätiivis	12571.6	2.396
US2 - epätiivis	13304.4	2.368
US3 - epätiivis	10036.6	1.912

Runkotolppien väliin mallinnetun raon läpi virtaavan ilman ja vesihöyryn määrät olivat hieman pienempiä puuverhottujen seinärakenteiden sisänurkkaliitoksissa kuin ulkonurkkaliitoksissa (vrt. taulukko 4.1).

Kuvassa 4.27 on esitetty homeindeksin maksimi-arvot pohjoisseinän vastaisen runkotolpan nurkassa (sn\_rt\_2) ja tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa (sn\_ts\_1) eri seinärakenteilla, kun ilmavuoto mallinnettiin runkotolppien väliin ja paine-erona käytettiin 10 Pa.



**Kuva 4.27.** Homeindeksin maksimi-arvo eri seinärakenteilla runkotolpan nurkassa (sn\_rt\_2, HHL1) ja tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa (sn\_ts\_1, HHL2). Ilmavuoto runkotolppien väliin. Paine-ero 10 Pa.

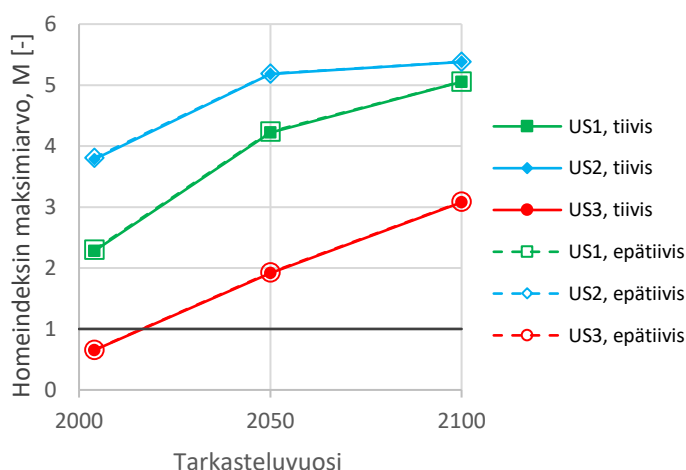
Sisänurkkaliitoksessa homeindeksin maksimi-arvot tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa olivat samalla tasolla ja käyttäytyivät samalla tavalla kuin ulkonurkkaliitoksessa (vrt. kuva 4.24). Sisänurkkaliitoksen runkotolpan ulkonurkassa homeindeksin maksimi-arvot jäivät alle raja-arvon kaikissa tiiviissä seinärakenteissa. Seinärakenne US3 täytti asetetut toimintakriteerit runkotolpan ulkonurkassa myös heikosti asennetun tuulensuojakipsilevyn tapauksessa. Ulkonurkkaliitoksissa tiiviistä seinärakenteista vain US3 oli hyväksyttävä.



Tuulensuojakipsilevyn epätiiviydet johtivat seinärakenteiden US1 ja US2 sisänurkkaliitoksen runkotolpan nurkassa korkeisiin homeindeksin maksimiarvoihin ja arvot nousivat ulkonurkkaliitokseen verrattuna korkeammiksi. Sisänurkkaliitoksessa tarkastelupisteen sn\_rt\_2 lämpötila ei laskenut tarkasteluvuoden aikana nollan alapuolelle eli tarkastelupiste oli homeen kasvulle otollisissa olosuhteissa aina, kun suhteellinen kosteus oli riittävän korkea, mikä nosti homeindeksin maksimiarvon korkeaksi.

Kun ilmavuodon reitti mallinnettiin sisänurkkaliitoksen runkotolppien muodostamaan ”koteloon”, ilmavuodon määrä väheni merkittävästi, koska runkotolppien liitokset mallinnettiin ideaalisen tiiviiksi. Samasta syystä myöskään tuulensuojakipsilevyn asennustyön laadulla ei ollut merkitystä rakenteen läpi virtaavan ilman määrään. Ilmavuodon määrän vähenemisen seurauksena myös konvektiivisesti rakenteen sisään siirtyvän vesihöyryn määrä väheni. Raon läpi siirtyvä vesihöyrymäärät 10 Pa paine-erolla ja huolellisesti asennetulla tuulensuojakipsilevyllä olivat taulukon 4.2 ensimmäistä saraketta vastaavasti US1: 30,7 g/a US2: 47,1 g/a, US3: 32,5 g/a.

Kuvassa 4.28 on esitetty sisänurkkaliitoksen ”kotelon” ulkonurkan (sn\_rt\_1) homeindeksin maksimiarvot 10 Pa paine-erolla laskettuna, kun ilmavuoto mallinnettiin ”koteloon”.



**Kuva 4.28.** Homeindeksin maksimiarvo eri seinärakenteilla sisänurkan ”kotelon” ulkonurkassa (sn\_rt\_1, HHL1). Ilmavuoto ”koteloon”. Paine-ero 10 Pa.

Ilmavuodon mallintaminen sisänurkkaliitoksen runkotolppien muodostamaan ”koteloon” ei vaikuttanut ”kotelon” ulkonurkan homeindeksin maksimiarvoon, koska ideaalisesti mallinnettujen runkotolppien liitosten johdosta rakenteeseen virtaavan vesihöyryn määrä oli pieni. Tilanne muuttuu, kun nurkan tolpitusta muutetaan avaamalla runkotolppien muodostama ”kotelo”. Tällöin ilmavuodon määrä kasvaa ja konvektiivisesti siirtyvä vesihöyry pääsee suoraan kylmään tuulensuojakipsilevyn sisäpintaan, jolloin se voi aiheuttaa homeen kasvulle otollisia olosuhteita. Tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan tarkasteltu ilmavuotojen vaikutuksia rakenteille, joissa nurkan tolpitusta on muutettu.

## 4.2 Tiiliverhotut seinärakenteet

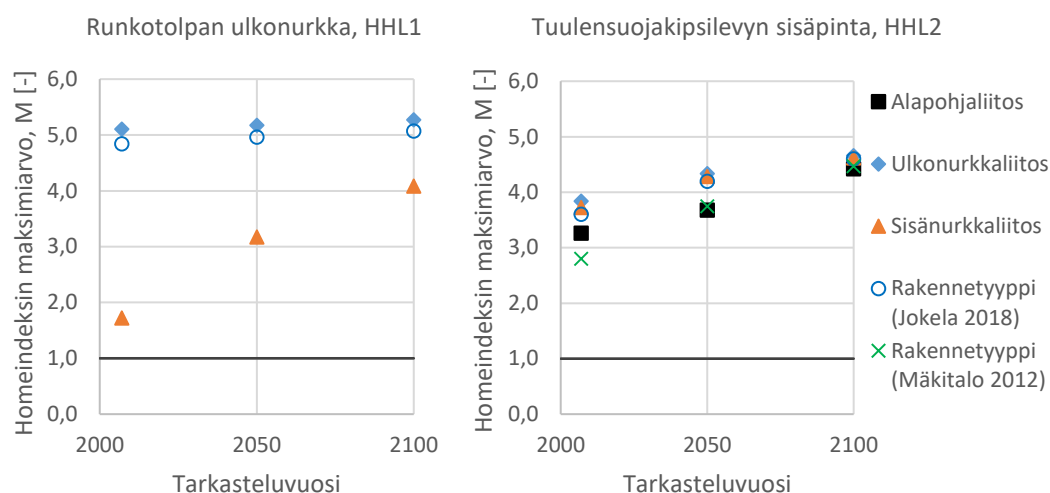
Tiiliverhottujen seinärakenteiden toiminta poikkeaa puuverhottujen seinärakenteiden toiminnasta, koska tiili on huokoinen ja kapillaarinen materiaali, jonka kapillaarinen vedenimukyky ja vedenimunopeus ovat suuria (Vinha et al. 2013). Toisin kuin puuverhottu julkisivu, tiiliverhottu julkisivu saattaa kyllästyä täysin vedellä siihen kohdistuvan viistosateen seurauksena. Tiiliverhouksesta sadevesi siirtyy seinärakenteen sisäosia kohti diffuusion seurauksena, mitä auringon säteilyn lämmittävä vaikutus entisestään voimistaa. Puuverhotuista rakenteista poiketen, tiiliverhotuissa rakenteissa kosteus pyrkii useammin ulkoa sisään päin, mikä aiheuttaa homeen kasvulle otolliset olosuhteet seinärakenteen ulko-osien lisäksi höyrynsulkukerroksen ulkopintaan.

FRAME-tutkimuksessa (Vinha et al. 2013) havaittiin, että olosuhteet tiiliverhotun rakenteen tuuletusvälissä ovat otolliset homeen kasvulle jo nykyilmastossa. Ilmaston lämpeneminen ja ilmaston muutoksen seurauksena lisääntyvä viistosaderasitus lisäävät homeen kasvulle otollisia olosuhteita. Tutkimuksessa selvitettiin, että matalien tiiliverhottujen seinärakenteiden toimintaa voidaan parantaa lisäämällä tuulensuojan lämmönvastusta. Tutkimuksen mukaan tuulensuojakipsilevyllä jäykistetyssä puurankarunkoisessa seinärakenteessa tuulensuojakipsilevyn ulkopuolisen lämmöneristeen lämmönvastuksen tulisi olla vähintään  $1,94 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$  vuoden 2050 ilmastossa ja vähintään  $3,07 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$  vuoden 2100 ilmastossa (Vinha et al. 2013, sivu 177). Suurimmassa osassa tämän tutkimuksen tiiliverhottujen seinärakenteiden tarkasteluja on käytetty lisäeristeenä 75 mm paksua tuulensuojamineraalivillaa (US5), jonka lämmönvastus on  $2,42 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$  (US5).

### 4.2.1 Rakennetyyppien ja liitososien vertailu

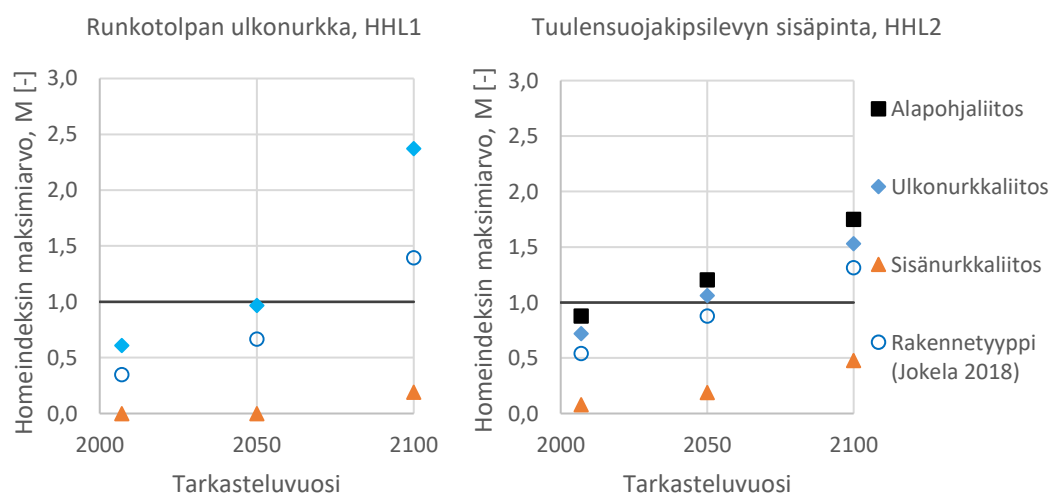
Kuten puuverhottujen seinärakenteiden kohdalla, ennen tiiliverhottujen seinärakenteiden liitosten tulosten esittelyä vertaillaan tämän tutkimuksen liitostarkastelujen tuloksia rakennetyyppien tutkimusten tuloksiin kahdella ulkoseinärakenteella: perusrakenne (US1) ja 75 mm paksulla tuulensuojamineraalivillalla lisäeristetty rakenne (US5). Aikaisemmin tiiliverhottujen seinärakenteiden rakennetyyppien lämpö- ja kosteusteknisestä toimintaa on tarkasteltu tutkimuksissa (Mäkitalo 2012, Vinha et al. 2013, Jokela 2018). Seuraavissa vertailuissa on tarkasteltu homeindeksin maksimiarvoa runkotolpan ulkonurkan tarkastelupisteissä (un\_rt\_2, sn\_rt\_2) ja tuulensuojakipsilevyn sisäpinnan tarkastelupisteissä (ap\_ts, un\_ts\_2 ja sn\_ts\_1) (ks. alaluku 3.6.3).

Kuvassa 4.29 on esitetty homeindeksin maksimiarvot liitosten ja rakennetyyppien tarkasteluissa runkotolpan ulkonurkassa ja tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa tiiliverhotulla ulkoseinärakenteella US1 ja kuvassa 4.30 ulkoseinärakenteella US5. Tutkimuksissa käytetyt laskentaohjelmat ja reunaehdot poikkeasivat vastaavasti kuin puuverhottujen seinärakenteiden yhteydessä esitettiin (ks. alaluku 4.1.1). Kuvassa 4.29 esitetyt Mäkitalon (2012) tuulensuojakipsilevyn tulokset on laskettu WUFI 1D-ohjelmalla ja runkotolpan ulkonurkan tulokset WUFI 2D-ohjelmalla.



**Kuva 4.29.** Homeindeksin maksimi-arvojen vertailu runkotolpan ulkonurkassa ja tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa tiiliverhotulla seinärakenteella US1.

Kuvasta 4.29 nähdään, että tiiliverhotulla seinärakenteella US1 homeindeksin maksimi-arvo nousi sekä runkotolpan ulkonurkassa että tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa reilusti yli sallitun raja-arvon rakennetyyppien ja -liitosten tutkimuksissa. Sisänurkkaliitoksen runkotolpan ulkonurkan tarkastelupisteessä laskettu homeindeksin maksimi-arvo jäi muita tarkasteluja alhaisemmaksi. Ero johtuu sisänurkan tarkastelupisteen lämpimämmistä olosuhteista suoraan seinään ja ulkonurkkaliitokseen verrattuna, mikä laskee tarkastelupisteen suhteellista kosteutta. Tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa sekä liitosten että rakennetyyppien tutkimuksista on saatu hyvin saman kaltaisia tuloksia.



**Kuva 4.30.** Homeindeksin maksimi-arvojen vertailu runkotolpan ulkonurkassa ja tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa tiiliverhotulla ulkoseinärakenteella US5.

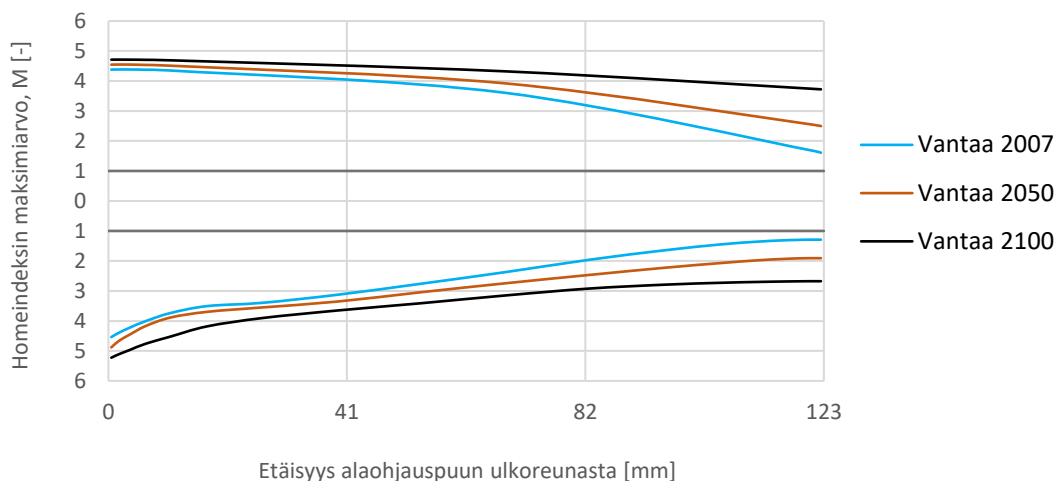
Tuulensuojakipsilevyn ulkopuolelta 75 mm paksulla tuulensuojamineraalivillalla eristetyssä tiiliverhotussa ulkoseinärakenteessa homeindeksin maksimiarvo ei noussut tutkimusten mukaan yli sallitun raja-arvon nykyilmastossa. Lisäeristäminen tuulensuojakipsilevyn ulkopuolelta parantaa tiiliverhottujen rakenteiden toimintaa, mutta lisäeristäminen ei riitä tulevaisuuden ilmastossa turvaamaan rakenteen kosteusteknistä toimintaa.

Tiiliverhottujen seinärakenteiden kohdalla voidaan todeta, kuten puuverhottujen seinärakenteiden kohdalla todettiin, homeindeksin maksimiarvot vastasivat kohtalaisen hyvin toisiaan tutkimusten ja rakenteiden kesken tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa. Tiiliverhottujen seinärakenteiden sisänurkkaliitoksessa tuulensuojakipsilevyn sisäpinnan tarkastelupiste oli puuverhotuista seinärakenteiden vertailuista poiketen vähemmän kriittinen verrattuna rakennetyyppien tutkimuksiin. Runkotolpan ulkonurkassa erot tutkimusten välillä olivat puuverhottujen seinärakenteiden tapaan suurempia.

#### **4.2.2 Alapohjaliitos**

Tiiliverhottujen seinärakenteiden alapohjaliitosten toimintaa tarkasteltiin seinärakenteella US5. Tarkastellun seinärakenteen rungon syvyys oli 123 mm, joten tiiliverhottujen seinärakenteiden perustapauksessa alaohjauspuuna käytettiin poikkileikkaukseltaan 48x123 mm<sup>2</sup> sahatavaraa. Tarkastellun tiiliverhotun seinärakenteen alapohjaliitoksen (kuva 3.3) toiminta poikkeaa puuverhotun seinärakenteen alapohjaliitoksen toiminnasta, koska tiiliverhous suojaa alaohjauspuuta paremmin ulkoilman olosuhteilta. Lisäksi perustapauksessa alaohjauspuu on lämmöneristetty ulkopuolelta, kun tuulensuojakipsilevyn ulkopuolella on 75 mm paksu tuulensuojamineraalivilla.

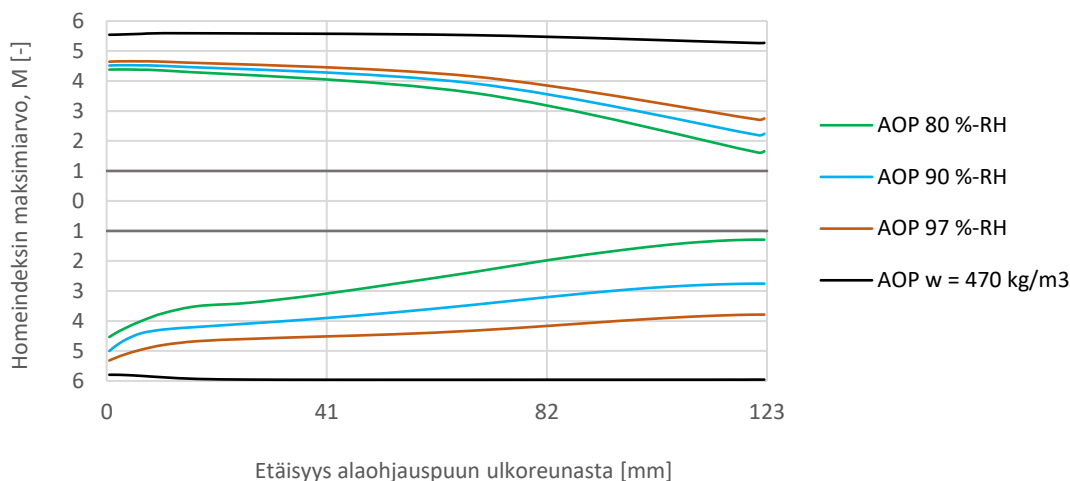
Kuvassa 4.31 on esitetty rakennusfysikaalisen testivuoden (ilmastonmuutoksen) vaikutus kuivan alaohjauspuun (80 % RH) ylä- ja alapintojen homeindeksin maksimiarvoihin. Kuvassa esitetyt homeindeksin maksimiarvot on laskettu tarkastelujakson toisen vuoden tuloksista.



**Kuva 4.31.** Rakennusfysikaalisen testivuoden (ilmastonmuutoksen) vaikutus kuivan alaohjauspuun (80 % RH, HHL1) pintojen toisen tarkasteluvuoden homeindeksin maksimiarvoihin. Alaohjauspuun alapinnan homeindeksin maksimiarvot  $x$ -akselin alapuolella ja yläpinnan yläpuolella. Seinärakenne US5.

Eristämättömän alaohjauspuun pintojen homeindeksin maksimiarvot nousivat yli sallitun raja-arvon koko alaohjauspuun alueella nyky- ja tulevaisuuden ilmastoissa. Homehtumisriskin kannalta kriittisimmät olosuhteet olivat alaohjauspuun ulkoreunassa, missä homeindeksin maksimiarvot nousivat yli arvon 4,0 alaohjauspuun ylä- ja alapinnassa. Olosuhteet paranivat lähempänä alaohjauspuun sisäreunaa, mutta homeindeksin maksimiarvo ei laskenut alaohjauspuun sisäreunassakaan alle raja-arvon 1,0. Ilmastonmuutos nosti entisestään korkeita alaohjauspuun pintojen homeindeksin maksimiarvoja.

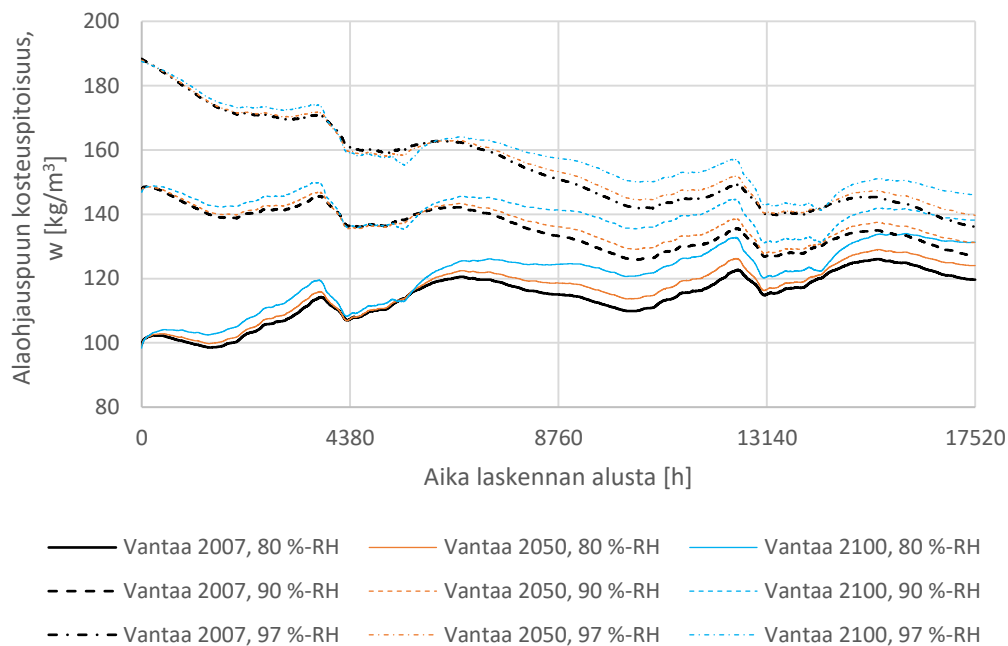
Kuvassa 4.32 on esitetty alaohjauspuun alkukosteuspitoisuuden vaikutus alaohjauspuun pintojen toisen vuoden homeindeksin maksimiarvoihin.



**Kuva 4.32.** Alaohjauspuun alkukosteuspitoisuuden vaikutus tarkastelujakson toisen vuoden homeindeksin maksimiarvoon Jokioisten vuoden 2004 säädatalla laskettuna (HHL1). Alaohjauspuun alapinnan homeindeksin maksimiarvot x-akselin alapuolella ja yläpinnan yläpuolella. Seinärakenne US5.

Kuvasta 4.32 nähdään, että alaohjauspuun alkukosteuspitoisuuden kasvattaminen nosti alaohjauspuun pintojen toisen laskentavuoden homeindeksin maksimiarvoja. Alkukosteuspitoisuus vaikutti eniten alaohjauspuun sisäreunan homeindeksin maksimiarvoon. Vesikontaktissa olleen alaohjauspuun ( $w=470 \text{ kg/m}^3$ ) pintojen homeindeksin maksimiarvot olivat lähellä homemallin ylärajaa 6,0.

Kuvassa 4.33 on esitetty eristämättömän alaohjauspuun kosteuspitoisuus tarkastelujakson aikana eri alkukosteuspitoisuuksilla ja eri tarkasteluvuosina laskettuna. Tiiliverhottujen seinärakenteiden alapohjaliitosten tarkasteluissa jouduttiin tyytymään 2 vuoden pituiseen tarkastelujaksoon, koska tiiliverhottujen rakenteiden laskenta oli hidasta puuverhottuihin rakenteisiin verrattuna.



**Kuva 4.33.** Rakennusfysikaalisen testivuoden (ilmastonmuutoksen) vaikutus eristämättömän alaohjauspuun kosteuspitoisuuteen. Seinärakenne US5.

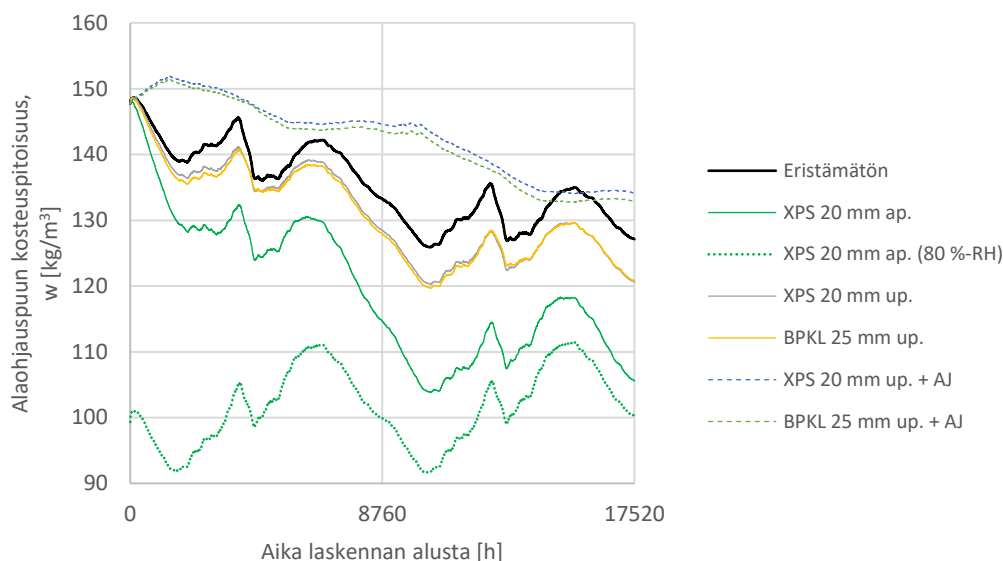
Kuvasta 4.33 nähdään, että kuivan alaohjauspuun (80 % RH) kosteuspitoisuus alkoi noustamaan ja kostean alaohjauspuun (90 % RH) kosteuspitoisuus alkoi hitaasti laskemaan laskennan edetessä. Tasoittuneessa tilanteessa eristämättömän alaohjauspuun kosteuspitoisuus laskentavuoden aikana vastasi siis 80 - 90 % RH huokosilman suhteellista kosteutta. Korkeaa huokosilman suhteellista kosteutta vastaava alaohjauspuun kosteuspitoisuus viittaa siihen, että alaohjauspuu on jatkuvasti homeen kasvulle otollisissa olosuhteissa, mikäli lämpötila on nollan yläpuolella. Tasoittuneen tilanteen korkea kosteuspitoisuus selittää korkeat homeindeksin maksimiavot alaohjauspuun pinnoilla kuvissa 4.31 ja 4.32.

Rakennusfysikaalisesta testivuodesta tai alaohjauspuun alkukosteuspitoisuudesta riippumatta alaohjauspuun pintojen homeindeksin maksimiavot olivat suurimmat alaohjauspuun ulkoreunassa. Eristämättömän alaohjauspuun homeindeksi nousi yli sallitun raja-arvon jo nykyilmastossa, joten rakenne ei ole hyväksyttävät ja rakennetta tulee muuttaa alaohjauspuun olosuhteiden parantamiseksi.

### Alaohjauspuun lämmöneristäminen

Tasoittuneen tilanteen alaohjauspuun kosteuspitoisuuden pienentämiseksi alaohjauspuun olosuhteita pyrittiin parantamaan samoilla lämmöneristysratkaisuilla kuin puuverhottujen seinärakenteiden kohdalla (kts. kuva 4.8). Kuvassa 4.34 on esitetty alaohjauspuun kosteuspitoisuus tarkastelujakson aikana eri alaohjauspuun eristysratkaisuilla Vantaan vuoden 2007 ilmasto-olosuhteissa laskettuna, kun alaohjauspuun alkukosteuspitoisuus oli 90

% RH. Lisäksi kuvassa on esitetty alaohjauspuun kosteuspitoisuus alkukosteuspitoisuudella 80 % RH laskettuna, kun alaohjauspuu oli eristetty alapuolelta 20 mm paksulla XPS-eristeellä.



**Kuva 4.34.** Alaohjauspuun kosteuspitoisuus tarkastelujakson aikana Vantaan vuoden 2007 säädatalla laskettuna. Seinärakenne US5. (Alaohjauspuun alkukosteuspitoisuus 90 % RH, lukuun ottamatta XPS 20 mm ap. eristettä, joka on esitetty myös 80 % RH)

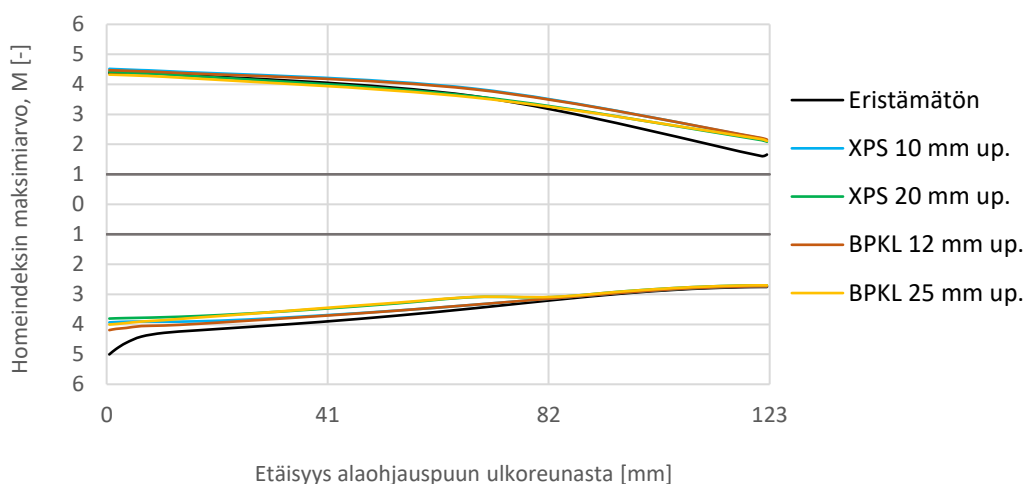
Alaohjauspuun lämmöneristyksestä huolimatta alaohjauspuun kosteuspitoisuus pysyi yli 80 % RH vastaavassa tasapainokosteuspitoisuudessa tarkastelujakson aikana. Alajuoksun lisääminen alaohjauspuun päälle hidasti alaohjauspuun kuivumista merkittävästi. Alaohjauspuun ja tuulensuojakipsilevyn välinen lämmöneriste nopeutti hieman alaohjauspuun kuivumista verrattuna eristämättömään alaohjauspuuhun. Alaohjauspuun ja tuulensuojakipsilevyn välisen XPS-eristeen ja bitumoidun puukuitulevyn välillä ei ollut merkittävää eroa alaohjauspuun kuivumisen kannalta. Eristäminen perusmuurin ja alaohjauspuun välistä XPS-eristeellä kuivatti rakennetta tarkastelluista vaihtoehdoista parhaiten.

Kuvasta 4.34 nähdään, että alaohjauspuun ja perusmuurin välistä 20 mm XPS-eristeellä eristetyn kastuneen (90 % RH) alaohjauspuun kosteuspitoisuus lähestyi kuivan (80 % RH) kosteuspitoisuutta laskennan edetessä. Kuivan alaohjauspuun kosteuspitoisuus näyttää vastaavan hyvin tasoittuneen tilanteen kosteuspitoisuutta, koska kosteuspitoisuus oli yhtä suuri laskentavuoden alussa ja lopussa.

Kuvassa 4.35 on esitetty alaohjauspuun ja tuulensuojakipsilevyn välisen eristyksen vaikutus alaohjauspuun pintojen homeindeksin maksimiarvoihin. Homeindeksin maksimiarvot on laskettu Vantaan vuoden 2007 ilmasto-olosuhteissa. Kuvasta 4.34 nähtiin, että alaohjauspuun ja tuulensuojakipsilevyn välistä eristetyissä alapohjaliitoksissa alaohjauspuun kosteuspitoisuus oli korkeampi kuin 80 % RH vastaava tasapainokosteuspitoisuus. Alaohjauspuun ja tuulensuojakipsilevyn välisen eristyksen vaikutusta homeindeksin



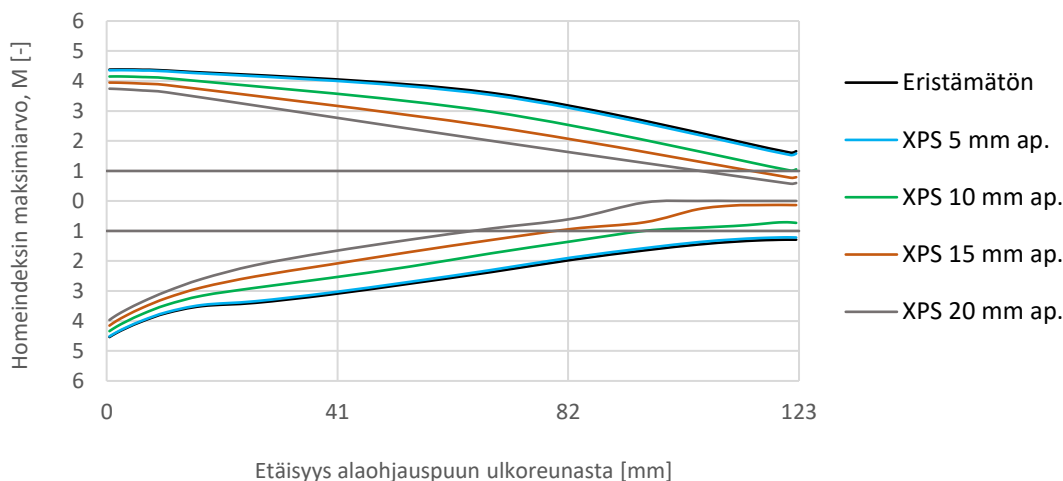
maksimi-arvoihin tarkasteltiin 90 % RH vastaavalla alkukosteuspitoisuudella, jotta tulokset ovat varmalla puolella.



**Kuva 4.35** Kastuneen alaohjauspuun (90 % RH, HHL1) pintojen toisen tarkasteluvuoden homeindeksin maksimi-arvo, kun alaohjauspuun ja tuulensuojalevyn välissä on eriste. Vantaa 2007. Alaohjauspuun alapinnan homeindeksin maksimi-arvot x-akselin alapuolella ja yläpinnan yläpuolella. Seinärakenne US5.

Alaohjauspuun ja tuulensuojakipsilevyn välisellä lämmöneristyksellä ei ollut merkittävää vaikutusta alaohjauspuun pintojen homeindeksien maksimi-arvoihin. Eristysratkaisun vähäinen vaikutus johtuu siitä, että tarkasteltava seinärakenne US5 on lämmöneristetty tuulensuojalevyn ulkopuolelta 75 mm paksulla mineraalivillalla. Alaohjauspuun ja tuulensuojakipsilevyn välinen lämmöneriste ei siten merkittävästi nosta alaohjauspuun lämpötilaa verrattuna eristämättömään rakenteeseen.

Kuvassa 4.36 on esitetty alaohjauspuun ja perusmuurin välisen lämmöneristyksen vaikutus alaohjauspuun pintojen homeindeksin maksimi-arvoihin. Alaohjauspuun alkukosteuspitoisuutena käytettiin 80 % RH vastaavaa tasapainokosteuspitoisuutta ja homeindeksin maksimi-arvot on laskettu Vantaan vuoden 2007 ilmasto-olosuhteissa.



**Kuva 4.36.** Alaohjauspuun (80 % RH, HHL1) pintojen toisen tarkasteluvuoden homeindeksin maksimiarvo, kun alaohjauspuun ja perusmuurin välissä on eriste. Vantaa 2007 Alaohjauspuun alapinnan homeindeksin maksimiarvot x-akselin alapuolella ja yläpinnan yläpuolella. Seinärakenne US5.

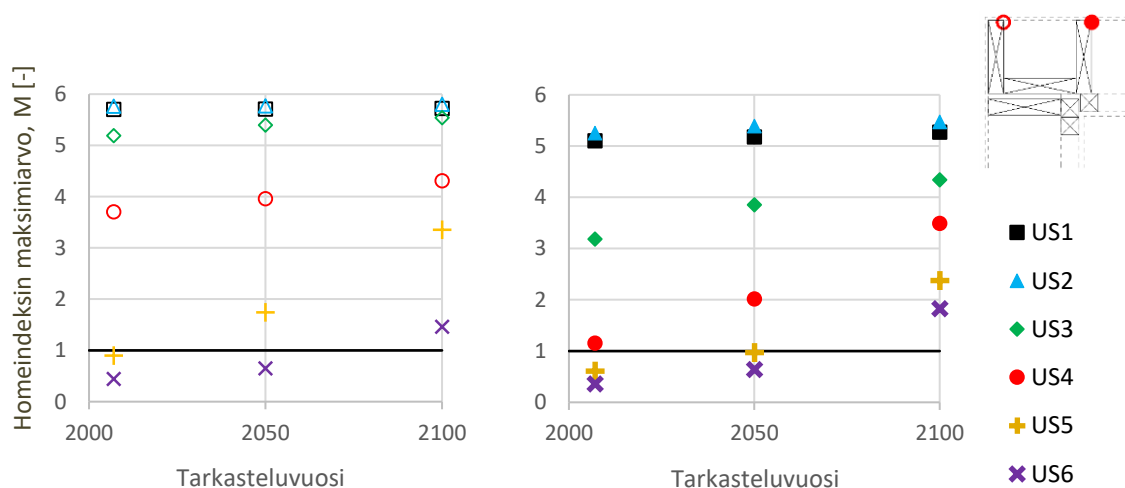
Eistäminen 20 mm paksulla XPS-eristeellä alaohjauspuun ja perusmuurin välistä pienensi homeindeksin maksimiarvoa alaohjauspuun ulko-osan ylä- ja alapinnassa noin 0,5 yksikköä. Alaohjauspuun keskiosassa ja sisäreunassa alaohjauspuun alapuolinen eristäminen laski homeindeksin maksimiarvoa alaohjauspuun pinnoilla noin 1,5 yksikköä. Lähellä alaohjauspuun sisäreunaa homeindeksin maksimiarvo laski alle raja-arvon, mutta suurimmassa osassa alaohjauspuun pinnoista homeindeksin arvo ylitti raja-arvon reilusti. Alaohjauspuun ja perusmuurin välisellä lämmöneristyksellä pystyttiin parantamaan alaohjauspuun olosuhteita, mutta eristyksen vaikutus ei ollut riittävä estämään homehtumisriskiä.

Tutkimuksessa tarkastellun tiiliverhotun seinärakenteen alapohjaliitoksessa alaohjauspuun pintojen homeindeksin maksimiarvoa ei saatu laskettua alle kriittisen raja-arvon tutkituilla eristysratkaisuilla. Alaohjauspuun pintojen homeindeksin maksimiarvot nousivat yli sallitun raja-arvon jo nykyilmaston olosuhteissa ja ilmastonmuutos lisäsi homehtumisriskiä.

### 4.2.3 Ulkonurkkaliitos

Tiiliverhottujen ulkonurkkaliitosten tarkasteluissa tutkittiin seinärakenteen, höyrynsulun sijainnin ja materiaalin sekä liitososien vaikutuksia nurkan lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan. Tarkasteluja tehtiin ideaalisille, ehjille rakenteille ja virheellisille rakenteille, joihin mallinnettiin ilmapuoto. Tiiliverhottujen nurkkaliitosten kuvissa ei ole esitetty tuulensuojakipsilevyn ulkopuolista eristettä.

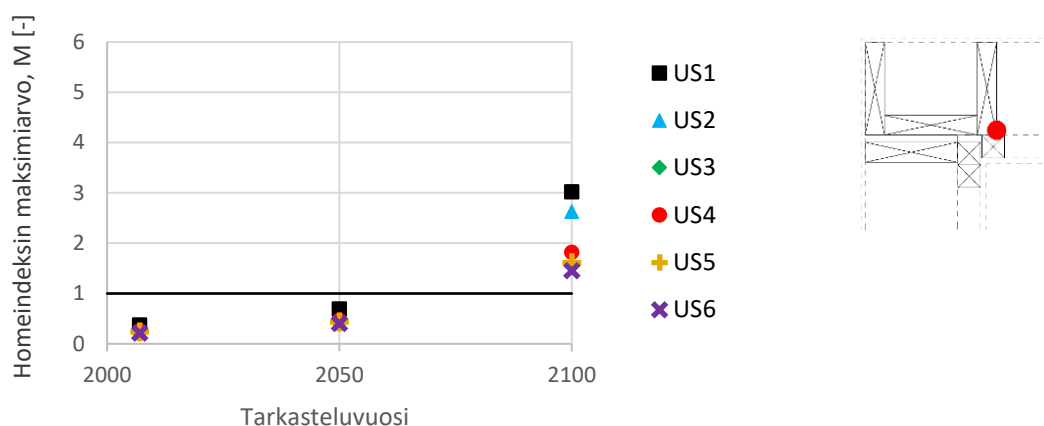
Seinärakenteen vaikutusta ulkonurkkaliitoksen kosteustekniseen toimintaan tarkasteltiin tiiliverhotuilla seinärakenteilla US1 - US6. Kuvassa 4.37 on esitetty homeindeksin maksimi-arvot ulkonurkkaliitoksen runkotolppien ulkonurkissa. Eteläseinän vastaisen runkotolpan ulkonurkan tarkastelupisteen (un\_rt\_2) homeindeksit on merkitty kuvaan täysillä kuvioilla ja nurkan uloimman runkotolpan ulkonurkan (un\_rt\_3) homeindeksit tyhjillä kuvioilla.



**Kuva 4.37.** Homeindeksin maksimi-arvot runkotolppien ulkonurkissa (HHL1). Tarkastelupisteet un\_rt\_2 (täydetyt kuviot) ja un\_rt\_3 (tyhjät kuviot).

Kuvasta 4.37 nähdään, että homeindeksin maksimi-arvot kasvavat korkeammiksi nurkan uloimman runkotolpan ulkonurkassa. Vantaan vuoden 2100 ilmastossa yksikään tutkituista rakenteista ei täyttänyt asetettuja toimintakriteerejä. Tuulensuojakipsilevyn ulkopuolinen lisäeristäminen 75 mm paksulla tuulensuojamineraalivillalla laskee homeindeksin maksimi-arvon alle sallitun raja-arvon nykyilmastossa, mutta vuoden 2050 ilmastossa vain 100 mm paksulla tuulensuojamineraalivillalla lisäeristetyn rakenteen toiminta oli hyväksyttävää.

Tiiliverhottujen ulkoseinärakenteiden ulkonurkkaliitoksissa havaittiin homeindeksin nousua runkotolpan sisänurkassa tarkastelupisteessä un\_rt\_1. Kuvassa 4.38 on esitetty runkotolpan sisänurkan homeindeksin maksimi-arvot seinärakenteilla US1 - US6.

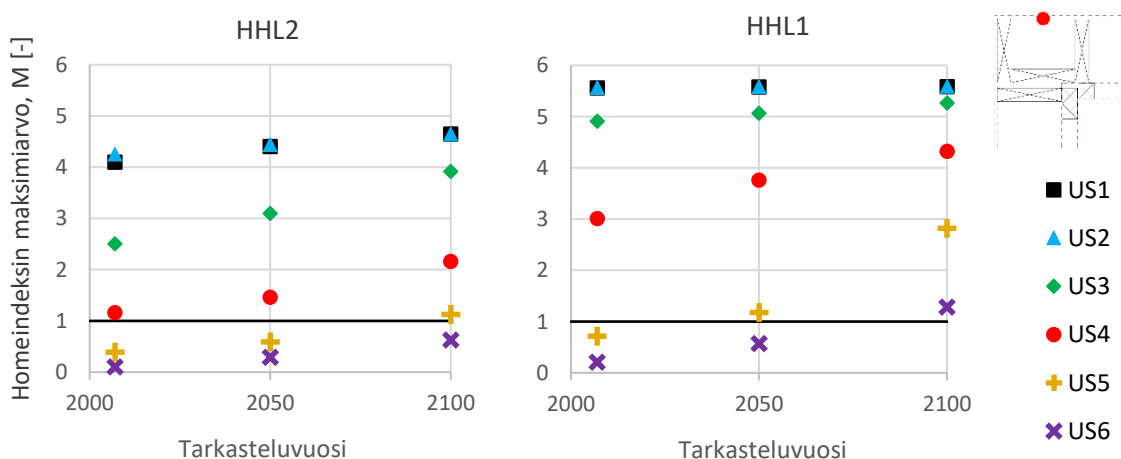


**Kuva 4.38.** Homeindeksin maksimi-arvot runkotolpan sisänurkassa (un\_rt\_1, HHL1).

Runkotolpan sisänurkassa homeindeksin maksimi-arvo nousi yli sallitun raja-arvon kaikilla tutkituilla rakenteilla Vantaan vuoden 2100 ilmastossa, mutta jäi alle sallitun raja-arvon nykyilmastossa ja vuoden 2050 ilmastossa.

Puuverhottujen seinärakenteiden ulkonurkkaliitoksessa olosuhteet ”kotelon” tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa tarkastelupisteessä (un\_ts\_1) olivat selkeästi paremmat kuin runkotolppien välisessä tuulensuojakipsilevyn tarkastelupisteessä (un\_ts\_2). Tiiliverhottujen seinärakenteiden ulkonurkkien tarkasteluissa havaittiin homeindeksin maksimi-arvon kasvua sekä nurkan ”kotelon” tarkastelupisteessä että runkotolppien välisessä tuulensuojakipsilevyn tarkastelupisteessä.

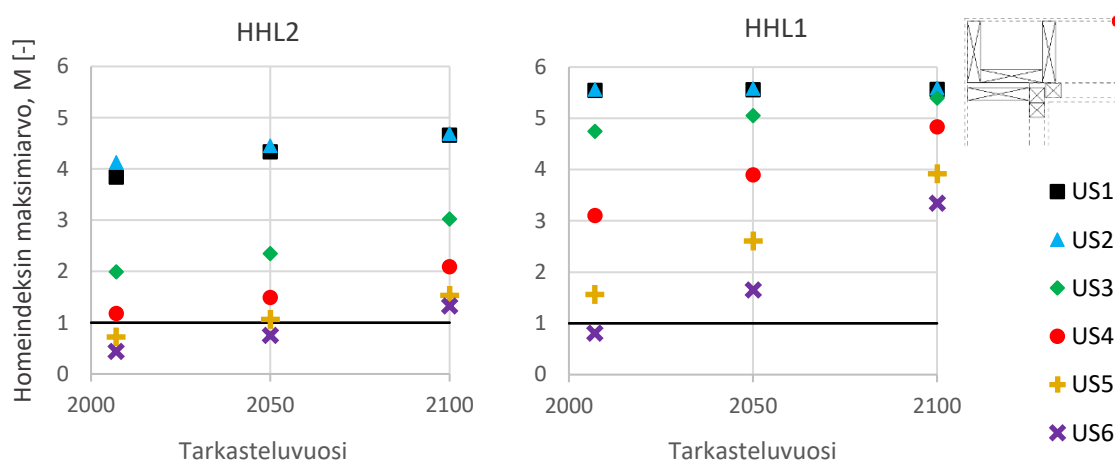
Kuvassa 4.39 on esitetty ulkonurkan ”kotelon” tuulensuojakipsilevyn sisäpinnan tarkastelupisteen homeindeksin maksimi-arvot homehtumisherkkyysluokissa 1 ja 2 laskettuna.



**Kuva 4.39.** Homeindeksin maksimi-arvot tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa nurkan ”kotelossa” (un\_ts\_1). Tuulensuojakipsilevyn HHL1 oikealla ja HHL2 vasemmalla.

Ulkonurkan ”kotelossa” tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homeindeksin maksimi-arvo nousi yli sallitun raja-arvon ulkoseinärakenteilla US1 - US4 tuulensuojakipsilevyn homehtumisherkkyyssluokasta riippumatta nyky- ja tulevaisuuden ilmastossa. Seinärakenteilla US5 ja US6 homeindeksin maksimi-arvo jäi alle raja-arvon nykyilmastossa ja vuoden 2050 ilmastossa, jos tuulensuojakipsilevy oletettiin homehtumisherkkyyssluokkaan 2. Homehtumisherkkyyssluokassa 1 tuulensuojakipsilevyn sisäpinnan homeindeksi nousi yli sallitun raja-arvon vuoden 2050 ilmastossa seinärakenteella US5 ja vuoden 2100 ilmastossa seinärakenteella US6.

Kuvassa 4.40 on esitetty runkotolppien välisen tuulensuojakipsilevyn sisäpinnan tarkastelupisteen homeindeksin maksimi-arvot homehtumisherkkyyssluokissa 1 ja 2 laskettuna.



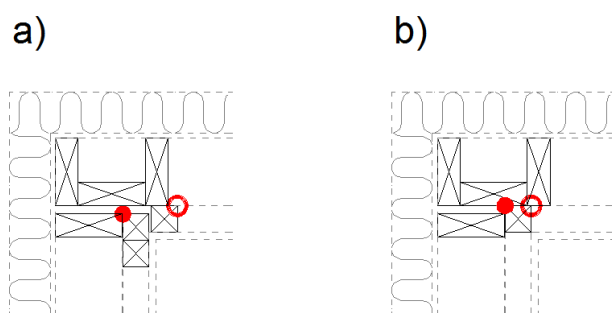
**Kuva 4.40.** Homeindeksin maksimi-arvot tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa runkotolppien välissä (un\_ts\_2) homehtumisherkkyyssluokissa 1 ja 2.

Kuten ulkonurkan ”kotelossa”, runkotolppien välissä tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa homeindeksin maksimi-arvo nousi yli sallitun raja-arvon ulkoseinärakenteilla US1 - US4 tuulensuojakipsilevyn homehtumisherkkyyssluokasta riippumatta nyky- ja tulevaisuuden ilmastossa. Kun tuulensuojakipsilevy oletettiin homehtumisherkkyyssluokkaan 2, homeindeksin maksimi-arvo pysyi alle sallitun raja-arvon nykyilmastossa seinärakenteilla US5 ja US6, mutta vuoden 2050 ilmastossa vain seinärakenteella US6. Tuulensuojakipsilevyn homehtumisherkkyyssluokan 1 mukaan laskettaessa vain seinärakenne US6 täytti toimintakriteerit vain nykyilmastossa.

Tuulensuojakipsilevyn ulkopuolelta lisäeristämättömillä rakenteilla (US1 ja US2) homeindeksin maksimi-arvo nousi runkotolppien välissä tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa samoihin arvoihin kuin nurkan ”kotelossa”. Seinärakenteilla US3 ja US4 homeindeksin maksimi-arvot jäivät pienemmiksi runkotolppien välissä kuin nurkan kotelossa. Seinärakenteilla US5 ja US6 homeindeksin maksimi-arvot tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa nousivat runkotolppien välissä korkeammiksi kuin nurkan ”kotelossa”.

Tiiliverhottujen ulkoseinärakenteiden ulkonurkkaliitoksessa havaittiin sama homeenkasvun riski kuin puuverhottujen ulkoseinärakenteiden ulkonurkkaliitoksessa. Homeindeksin arvo nousi sisäkoolauksen höyrynsulkua vasten olevissa nurkissa, kun sisäilman kosteus pääsee vaikuttamaan lähes esteettä sisäkoolauksiin, jotka ovat runkotolppien kautta yhteydessä rakenteen ulkopintaan.

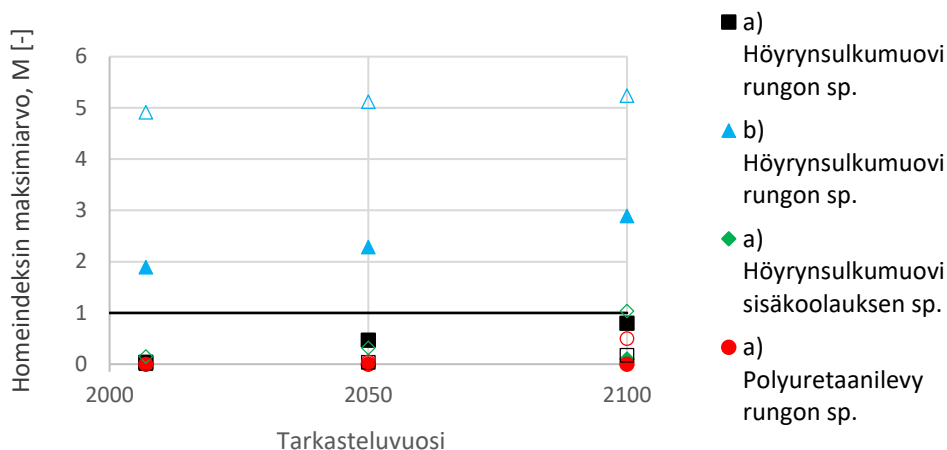
Tutkimuksessa tarkasteltiin höyrynsulkukerroksen sijainnin, materiaalin ja sisäpuolisen koolauksen sijoittelun vaikutuksia sisäpuolisen koolauksen nurkkien kosteustekniseen toimintaan. Höyrynsulkukerroksena käytettiin polyuretaanilevyä tai höyrynsulkumuovia, joka sijoitettiin rungon tai sisäkoolauksen sisäpintaan. Kuvassa 4.41 on esitetty tutkimuksessa käytetyt tiiliverhotun seinärakenteen US5 ulkonurkan sisäkoolauksen sijoitteluvaihtoehdot.



**Kuva 4.41.** Nurkan koolausvaihtoehdot. Seinärakenne US5.

Ulkonurkan sisäkoolauksen asetteluun vaikuttaa sisäpuolisen koolauksen suunta, jotta sisäverhous levy saadaan nurkassa kiinnitettyä asianmukaisesti. Kuvan 4.41 vaihtoehto a) on tyypillinen käytettäessä rungon sisäpuolista pystykoolausta. Vaihtoehto b), jossa ulkonurkassa on vain yksi pystykoolaus, on mahdollinen vain käytettäessä rungon sisäpuolista vaakakoolausta.

Kuvassa 4.42 on esitetty höyrynsulku- ja sisäkoolausvaihtoehtojen vaikutus ulkoseinärakenteen US5 ulkonurkan sisäpuolisen koolauksen tarkastelupisteiden homeindeksin maksimiarvoihin.



**Kuva 4.42.** Homeindeksin maksimi-arvot sisäkoolauksen nurkissa (HHL1). Tarkastelupiste *un\_sk\_1* (täydet kuviot), tarkastelupiste *un\_sk\_2* (tyhjät kuviot). a) ja b) viittaavat kuvan 4.41 koolausvaihtoehtoihin. Seinärakenne US5.

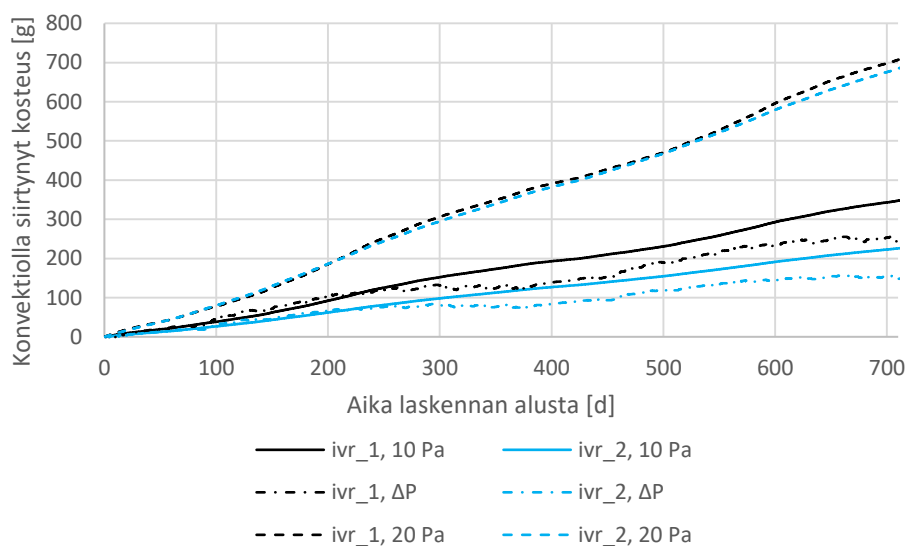
Sisäpuolisen koolauksen nurkkien homeindeksin maksimi-arvot pysyivät sallituissa rajoissa, kun ulkonurkassa käytettiin kolmea sisäkoolausta (kuva 4.41, vaihtoehto a)). Yhdellä sisäpuolisella koolauksella (kuva 4.41, vaihtoehto b)) sisäkoolauksen nurkkien homeindeksin maksimi-arvot nousivat sekä nyky- että tulevaisuuden ilmastossa yli sallitun raja-arvon. Tiiliverhotun seinärakenteen US5 ulkonurkkaliitoksessa höyrynsulkumuovin siirtäminen rungon sisäpinnasta sisäkoolauksen sisäpintaan ei vaikuttanut merkittävästi homeindeksin maksimi-arvoihin sisäkoolauksen nurkissa. Höyrynsulkumuovien siirtämisen vaikutusta ei tutkittu yhdessä yhden sisäpuolisen koolauksen kanssa (kuva 4.41, vaihtoehto b)).

Nykyilmastossa tiiliverhottujen seinärakenteiden US5 ja US6 ulkonurkkaliitosten tarkastelupisteissä homeindeksin maksimi-arvot pysyivät sallitun raja-arvon alapuolella, kun tuulensuojakipsilevy oletettiin homeutumisherkkyysluokkaan 2. Tuulensuojakipsilevyn homeutumisherkkyysluokalla 1 asetetut toimintakriteerit täyttyivät nykyilmastossa vain rakenteella US6. Vuoden 2050 ilmastossa homeindeksin maksimi-arvo ei ylittänyt raja-arvoa 1,0 vain rakenteella US6, kun tuulensuojakipsilevy oletettiin homeutumisherkkyysluokkaan 2. Tutkitut rakenteet eivät täyttäneet toimintakriteerejä vuoden 2100 ilmastossa.

## Ilmavuodot tiilverhottujen seinärakenteiden ulkonurkkaliitoksissa

Ilmavuodollisten tiilverhottujen ulkoseinärakenteiden ulkonurkkaliitosten toimintaa tarkasteltiin seinärakenteella US5. Ilmavuototarkasteluissa tarkasteltiin liitoksen toimintaa 6 m korkean ulkoseinän yläosassa. Ilmavuodottomien seinärakenteiden ulkonurkkaliitosten tarkasteluissa todettiin, että seinärakenteella US5 on edellytykset toimia nykyilmastossa, jos tuulensuojakipsilevy kuuluu homehtumisherkkyyssluokkaan 2.

Kuvassa 4.43 on esitetty raon läpi konvektiolla siirtyneen kosteuden määrä eri ilmavuotoreiteillä ja paine-eroilla tarkasteltuna, kun tuulensuojakipsilevyn asennus on ideallisen tiivis. Ideallisen tiiviin asennuksen tapauksessa tuulensuojakipsilevylle käytettiin materiaaliominaisuutta vastaavaa ilmanläpäisevyyttä. Ulkoilman olosuhteina on käytetty Vantaan vuoden 2007 ilmasto-olosuhteita.



**Kuva 4.43.** Raon läpi konvektiolla siirtyneen kosteuden määrä eri paine-eroilla, kun ilmavuoto on mallinnettu runkotolppien väliin (ilmavuotoreitti 1) tai nurkan ”koteloon” (ilmavuotoreitti 2). Ulkoseinärakenne tiivis, US5.

Lämpötilaeron ja tuulen aiheuttamaa paine-eroa ( $\Delta P$ ) käytettäessä konvektiolla raon läpi siirtyvän vesihöyryn määrä oli pienempi kuin 10 Pa vakiopaine-erolla laskettuna, mikä oli loogista, koska Vantaan vuoden 2007 ilmastodatan mukaan laskettuna 6 m korkean eteläseinän yläosan paine-eron keskiarvo oli 6,5 Pa. 20 Pa vakiopaine-erolla siirtyy noin kaksinkertainen määrä vesihöyryä verrattuna 10 Pa vakiopaine-eroon.

Taulukossa 4.3 on esitetty 10 Pa vakiopaine-erolla seinärakenteen US5 ulkonurkassa olevan raon läpi siirtynyt vesihöyry- ja ilmamäärä Vantaan vuoden 2007 ilmasto-olosuhteissa, kun ilmavuoto mallinnettiin runkotolppien väliin (ilmavuotoreitti 1). Idealisesti asennetussa, tiiviissä rakenteessa tuulensuojakipsilevylle on käytetty materiaaliominaisuutta vastaavaa ilmanläpäisevyyttä. Tuulensuojakipsilevyn asennuksen epätarkkuuksia



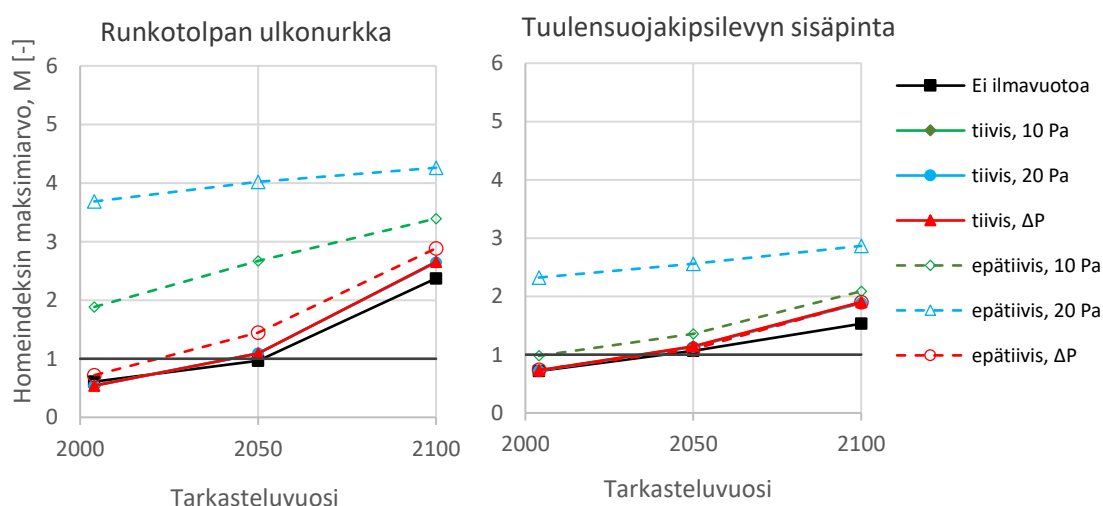
on huomioitu epätiivillä rakenteella, jossa tuulensuojakipsilevyn ilmanläpäisevyydelle on käytetty satakertaista arvoa.

**Taulukko 4.3.** Ulkonurkkaliitokseen runkotolppien väliin mallinnetun raon läpi siirtyvä vesihöyry- ja ilmamäärä, kun paine-ero oli 10 Pa.

	Raon läpi siirtyvä vesihöyry määrä [g/a]	Raon läpi siirtyvä ilmamäärä [dm <sup>3</sup> /min]
US5 - tiivis	177.9	0.036
US5 - epätiivis	10665.5	1.964

Puuverhotuissa seinärakenteissa tiiviin rakenteen raon läpi virtaavan vesihöyryn ja ilman määrät olivat lähes satakertaisia verrattuna epätiiviseen rakenteeseen, koska suurin osa paine-eron pudotuksesta tapahtui tuulensuojakipsilevyn yli. Tiiliverhottua ulkoseinä-rakennetta US5 tarkasteltaessa tuulensuojakipsilevyn ulkopuolella on 75 mm paksu tuulensuojamineraalivilla, joka vastustaa tuulensuojakipsilevyn lisäksi ilman virtausta. Ulkoseinä-rakenteessa US5 tuulensuojakipsilevyn ilmanläpäisevyyden satakertaistaminen siten kasvattanut raon läpi virtaavan vesihöyryn ja ilman määrää satakertaiseksi.

Kuvassa 4.44 on esitetty homeindeksin maksimi-arvot eteläseinän vastaisen runkotolpan ulkonurkassa (un\_rt\_2) ja tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa runkotolppien välissä (un\_ts\_2) seinärakenteella US5, kun ilmavuoto mallinnettiin runkotolppien väliin (ilmavuotoreitti 1).

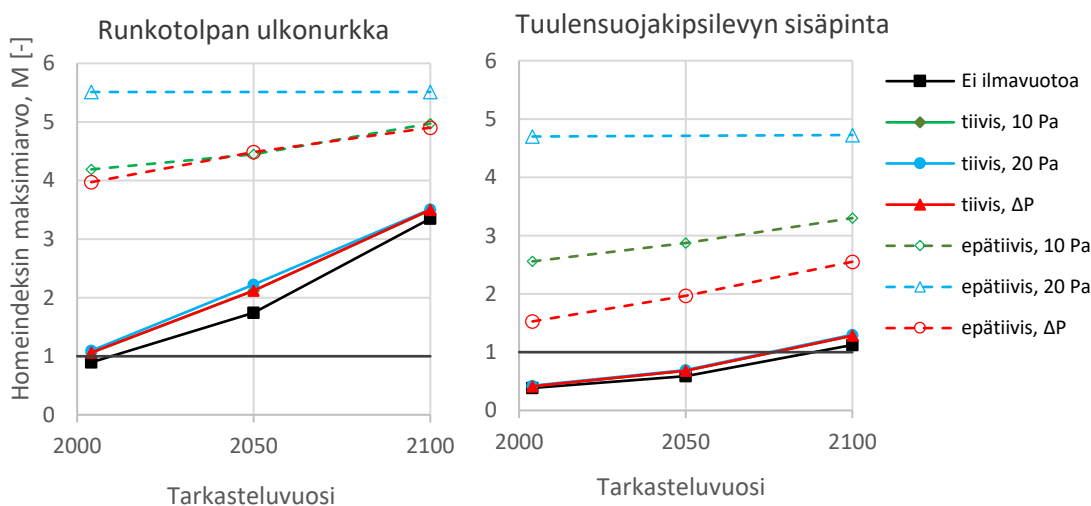


**Kuva 4.44.** Homeindeksin maksimi-arvo runkotolpan nurkassa (un\_rt\_2, HHL1) ja tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa (un\_ts\_2, HHL2). Ilmavuoto runkotolppien väliin. Seinärakenne US5.

Ideaalisen tiiviisti asennetulla tuulensuojakipsilevyllä tarkastelupisteiden homeindeksin maksimi-arvot eivät merkittävästi kasvaneet nykyilmastossa ja vuoden 2050 ilmastossa verrattuna ilmastuodottomaan tapaukseen. Vuoden 2100 ilmastossa homeindeksin maksimi-arvo nousi tarkastelupisteissä noin 0,5 yksikköä verrattuna ilmastuodottomaan tapaukseen. Ideaalisen tiiviin asennuksen tapauksessa paine-eron suuruudella ei ollut vaikutusta tarkastelupisteiden homeindeksin maksimi-arvoon. Tutkittu ulkoseinärakenne täytti toimintakriteerit nykyilmastossa ideaalisen tiiviillä tuulensuojakipsilevyn asennuksella.

Epätiiviillä tuulensuojakipsilevyn asennuksella paine-eron suuruus vaikutti homeindeksi maksimi-arvoihin enemmän. 20 Pa vakiopaine-erolla homeindeksin maksimi-arvo nousi runkotolpan ulkonurkassa lähelle arvoa 4,0 ja tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa yli arvon 2,0. Tutkittu ulkoseinärakenne täytti asetetut toimintakriteerit nykyilmastossa myös epätiiviillä tuulensuojakipsilevyn asennuksella, kun paine-erona käytettiin lämpötilaeron ja tuulen aiheuttamaa paine-eroa  $\Delta P$ .

Kun ilmavuoto mallinnettiin nurkan ”koteloon” (ilmavuotoreitti 2), raon läpi siirtyvät vesihöyrymäärät olivat taulukon 4.3 ensimmäistä saraketta vastaavassa järjestyksessä 115,8 g/a (US5-tiivis) ja 5765,1 g/a (US5-epätiivis). Kuvassa 4.44 on esitetty homeindeksin maksimi-arvot ulkonurkan uloimman runkotolpan nurkassa (un\_rt\_3) ja nurkan ”kotelon” tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa (un\_ts\_1) seinärakenteella US5, kun ilmavuoto mallinnettiin nurkan ”koteloon” (ilmavuotoreitti 2).



**Kuva 4.45.** Homeindeksin maksimi-arvo uloimman runkotolpan nurkassa (un\_rt\_3, HHL1) ja tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa (un\_ts\_1, HHL2). Ilmavuoto ”koteloon”. Seinärakenne US5.

Kuten edellä ilmavuotoreitin 1 kohdalla, ideaalisen tiiviillä tuulensuojakipsilevyn asennuksella ilmavuotojen vaikutus homeindeksin maksimi-arvoon oli vähäinen, kun ilma-

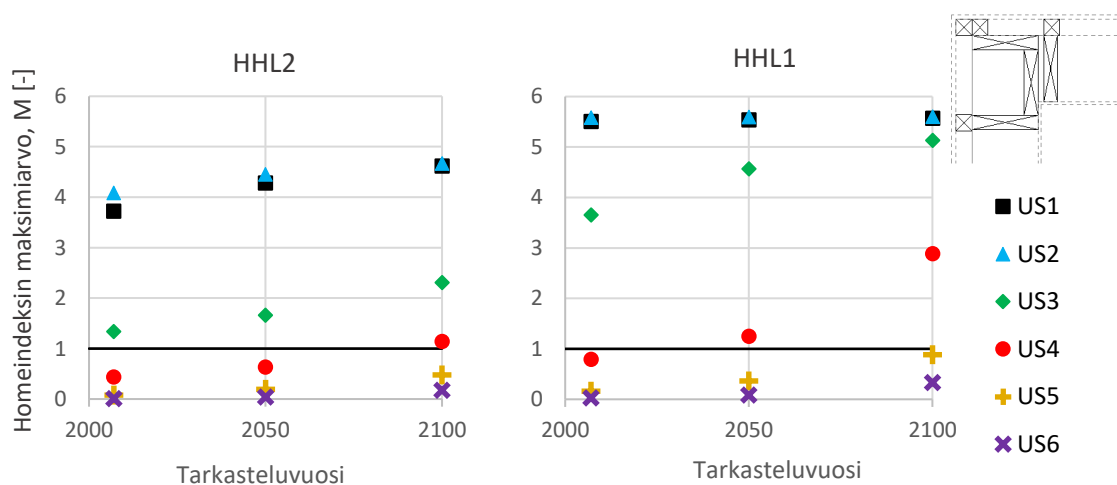
vuoto mallinnettiin nurkan ”koteloon” (ilmavuotoreitti 2). Runkotolpan ulkonurkan tarkastelupisteessä (un\_rt\_3) ilmavuodot kuitenkin nostavat homeindeksin maksimiarvon yli arvon 1,0 nykyilmastossa.

Ilmavuodoton seinärakenne US5 täytti asetetut toimintakriteerit nykyilmastossa. Kun tuulensuojakipsilevyn asennus oletettiin ideaaliseksi ja ilmavuoto mallinnettiin runkotolppien väliin, seinärakenteen US5 tarkastelupisteiden homeindeksin maksimiarvot pysyivät nykyilmastossa alle raja-arvon 1,0. Ilmavuodon mallintaminen nurkan ”koteloon” nosti tarkastelupisteiden homeindeksin maksimiarvot yli sallitun raja-arvon. Seinärakenne US5 ei täyttänyt toimintakriteerejä nykyilmastossa, kun tuulensuojakipsilevyn asennus mallinnettiin epätiiviiksi.

#### 4.2.4 Sisänurkkaliitos

Tiiliverhottujen seinärakenteiden sisänurkkaliitosten toimintaa tarkasteltiin vastaavasti kuin ulkonurkkaliitosten toimintaa tarkasteltiin. Tarkasteluissa tutkittiin seinärakenteiden, höyrynsulun sijainnin ja materiaalin sekä liitososien vaikutuksia nurkan lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan. Sisänurkkaliitosten tarkastelut tehtiin vain ehjille rakenteille. Tiiliverhottujen nurkkaliitosten kuvissa ei ole esitetty tuulensuojakipsilevyn ulkopuolista eristettä.

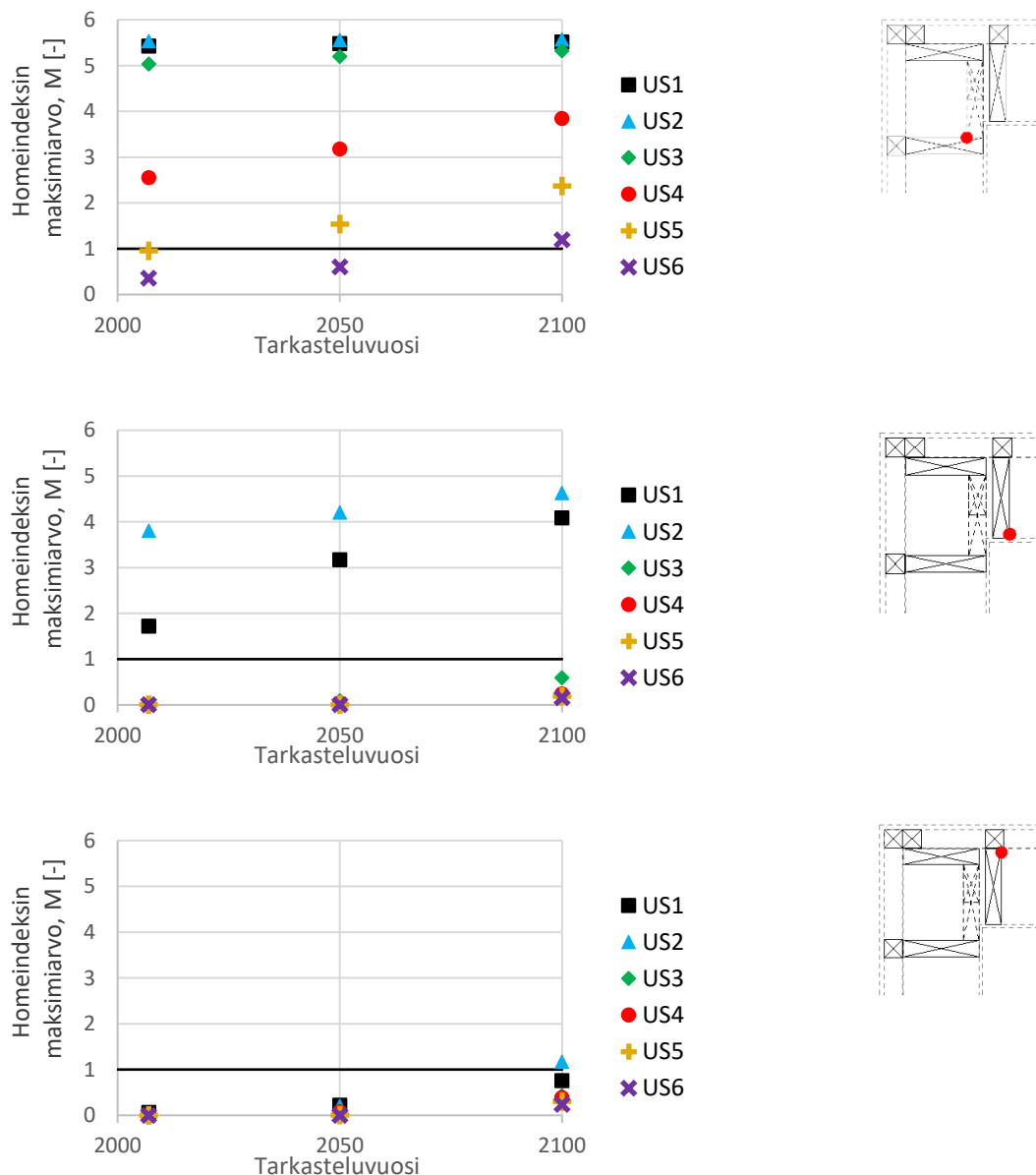
Kuvassa 4.46 on esitetty tuulensuojakipsilevyn sisäpinnan tarkastelupisteen homeindeksin maksimi-arvot homeutumisherkkyyssuokissa 1 ja 2 laskettuna.



**Kuva 4.46.** Homeindeksin maksimi-arvot tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa runkotolppien välissä (sn\_ts\_1) homeutumisherkkyyssuokissa 1 ja 2.

Tuulensuojakipsilevyn ulkopuolelta lisäeristämättömissä rakenteissa US1 ja US2 homeindeksin maksimi-arvo nousi tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa reilusti yli sallitun raja-arvon kaikkina tarkasteluvuosina. Tuulensuojamineraalivillan lisääminen tuulensuojakipsilevyn ulkopintaan paransi tuulensuojakipsilevyn sisäpinnan olosuhteita. Nykyilmastossa 50 mm tuulensuojamineraalivillan lisäys (US4) oli riittävä toimintakriteerien täyttymisen kannalta tuulensuojakipsilevyn homeutumisherkkyyssuokasta riippumatta, mutta tulevaisuuden ilmastoissa toimintakriteerit eivät täytyneet. Yli 75 mm paksulla tuulensuojamineraalivillalla eristetyissä seinärakenteissa homeindeksin maksimi-arvo ei ylittänyt raja-arvoa tulevaisuuden ilmastossa kummassakaan tuulensuojakipsilevyn homeutumisherkkyyssuokassa.

Kuvassa 4.47 on esitetty homeindeksin maksimi-arvot sisänurkkaliitoksen runkotolppien tarkastelupisteissä.



**Kuva 4.47.** Homeindeksin maksimi-arvot runkotolppien nurkissa (HHL1). Tarkastelupisteet sn\_rt\_1 (ylhäällä) ja sn\_rt\_2 (keskellä) ja sn\_rt\_4 (alhaalla).

Sisänurkkaliitoksessa runkotolppien muodostaman ”kotelon” nurkassa (sn\_rt\_1) homeindeksin maksimi-arvo nousi yli sallitun raja-arvon kaikilla tarkastelluilla rakenteilla vuoden 2100 ilmastossa. Nykyilmastossa tarkastelupisteen homeindeksin maksimi-arvo pysyi sallituissa rajoissa vain yli 75 mm paksulla tuulensuojamineraalivillalla eristetyissä rakenteissa.

Eteläseinän runkotolpan ulkonurkassa (sn\_rt\_2) homeindeksin maksimi-arvo nousi tuulensuojaeristeettömissä rakenteissa (US1-US2) yli sallitun raja-arvon kaikkina tarkasteluvuosina. Tuulensuojakipsilevyn ulkopuolelta lisäeristetyissä rakenteissa homeindeksin maksimi-arvot pysyivät alle sallitun raja-arvon.

Runkotolpan sisänurkassa (sn\_rt\_4) homeindeksin maksimiarvo nousi yli sallitun raja-arvon vain rakenteella US2 vuoden 2100 ilmastossa. Tiiliverhotun ulkoseinärakenteen ulkonurkkaliitoksessa homeindeksin maksimiarvo nousi vastaavassa tarkastelupisteessä kaikilla rakenteilla yli sallitun raja-arvon. Sisänurkkaliitoksessa runkotolpan sisänurkan lämpötila on ulkonurkkaliitoksen runkotolpan sisänurkkaa korkeampi minkä seurauksena homeindeksin maksimiarvo jää alhaisemmaksi.

Tiiliverhottujen seinärakenteiden sisänurkkaliitosten tarkasteluissa tutkittiin lisäksi höyrynsulkukerroksen sijainnin, materiaalin ja sisäpuolisen koolauksen asettelun vaikutusta liitoksen osien kosteustekniseen toimintaan. Rakenteen toimintaa tarkasteltiin korvaamalla höyrynsulkumuovi polyuretaanilevyllä sekä siirtämällä höyrynsulkumuovi sisäkoolauksen sisäpintaan. Edellä mainittujen muutosten ei havaittu vaikuttavan sisänurkkaliitoksen kosteustekniseen toimintaan.

### 4.3 Virhearviointi

Laskentatarkasteluihin liittyvät virhelähteet tulee tunnistaa, jotta laskentatuloksia osataan arvioida oikein. Jokainen rakenteiden kosteusteknisen analysointimenetelmän osa-alue (ks. alaluku 3.1.2) sisältää omat virhelähteensä. Sisä- ja ulkoilman olosuhteet ovat luonnonilmiöitä, joista materiaaliominaisuudet ja toimintakriteerit ovat riippuvia. Fysikaalisten ilmiöiden laskennallinen mallintaminen sisältää yksinkertaistuksia. (Vinha et al. 2013)

Laskentamallien merkittävimpiä yksinkertaistuksia ovat oletus paikallisesta tasapainotilanteesta sekä materiaalien olettaminen homogeenisiksi ja isotrooppisiksi. Materiaaliominaisuuksiin liittyvät epätarkkuudet johtuvat määrittämisen vaikeudesta, mittaustarkkuudesta sekä vaihtelusta. FRAME-tutkimuksessa (Vinha et al. 2013) vertailtiin laskenta- ja laboratoriokoetulosten vastaavuutta. Vertailuissa havaittiin, että lämpötilan kohdalla laskenta- ja mittaustulokset vastaavat toisiaan hyvin, mutta suhteellisen kosteuden tulosten kohdalla olisi parannettavaa. Lämpötilan laskenta- ja mittaustulosten hyvästä vastaavuudesta voidaan päätellä, että kosteuden siirtymiseen ja varastoitumiseen liittyvät materiaaliominaisuudet vaativat tarkennusta.

Laskennallisissa tarkasteluissa lähtötiedoissa ei voida soveltaa varmuuskertoimia, joten varmuus joudutaan ottamaan huomioon muilla tavoin. Tässä tutkimuksessa on tehty valintoja, jotka liittyvät laskennan lähtötietojen määrittelyyn ja laskentaohjelman ominaisuuksiin. Kuivumistarkasteluissa rakennusfysikaalisten testivuosien käyttö useana vuonna peräkkäin aiheuttaa rakenteelle todennäköisesti todellisuutta kriittisemmät olosuhteet, mutta toisaalta tällä tavoin saatu laskentatulos on varmallalla puolella. Viistosateen laskentaan vaikuttava maasto oletettiin avoimeksi ja viistosateen oletettiin kiinnittyvän seinäpintaan kokonaan. Laskentaohjelman ominaisuuksista johtuen ilman siirtyminen mallinnettiin laminaarisena virtauksena. Kosteuden jäätyminen mallintaminen rakenteiden sisälle on mahdollista käytetyllä laskentaohjelmalla, mutta ilmiö jätettiin huomioidamatta, koska se hidastaa laskentaa.

Nurkkaliitosten ilmavuototarkasteluissa käytettiin vakiopaine-eroa sekä ulkoilman olosuhteiden mukaan muuttuvaa paine-eroa. Ulkoilman olosuhteiden mukaan muuttava paine-ero laskettiin käyttämällä ulkopuolisina painekertoimina standardin SFS-EN 1991-1-4+AC+A1 (2011) mukaan määritettyjä rakenneosien painekertoimia. Sisäpuolisena painekertoimena käytettiin ulkopuolisen painekertoimen mukaan vaihtelevia arvoja, mikä lisäsi ja voimisti sisäpuolisia ylipainetilanteita. Rakennusten paine-ero-olosuhteita paremmin vastaava tapa olisi käyttää sisäpuoliselle painekertoimelle vakioarvoa, mutta tutkimuksessa tehty valinta oli rakenteiden toiminnan kannalta kriittinen.

Homeen kasvun laskennalliseen mallintamiseen käytettyyn suomalaiseen homemalliin liittyy epävarmuuksia. Laskentamalli vaatii edelleen tarkentamista homehtumisherkkyysluokkien sekä taantuman voimakkuuden osalta.

## 5. YHTEENVETO

Tutkimuksessa tarkasteltiin laskennallisesti puurankarunkoisten pientalojen ulkoseinien alapohja-, ulkonurkka- ja sisänurkkaliitosten lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa. Tutkimuksessa keskityttiin avohuokoisella lämmöneristeellä eristettyihin puu- ja tiiliverhottuihin seinärakenteisiin, joissa tuulensuojana käytettiin tuulensuojakipsilevyä. Tutkimuksessa tarkasteltiin ilmatiiviiden sekä ilmavuotoja sisältävien rakenteiden toimintaa.

Laskentatarkasteluissa noudatettiin TTY:llä kehitettyä rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmää. Tutkimuksen laskentatarkastelut suoritettiin Delphin-laskentaohjelman versiolla 5.8.3. Rakenteiden toimintakriteerinä käytettiin homehtumisriskiä. Homeenkasvun alkamista ei sallittu tuulensuojakerroksen sisäpuolisissa rakenteissa, jolloin Suomalaisen homemallin mukaan lasketun homeindeksin maksimiarvon ( $M_{max}$ ) tulee olla pienempi kuin 1,0.

Suomalaisen homemallin mukaan tuulensuojakipsilevy kuuluu homehtumisherkkyysluokkaan 2. TTY:llä tehtyjen homehtumiskokeiden perusteella on olemassa viitteitä siitä, että tavanomainen tuulensuojakipsilevy homehtuu voimakkaammin verrattuna homehtumisherkkyysluokan 2 materiaalille määritettyihin laskennallisiin arvoihin. Laskentatarkastelujen tuloksia on esitelty tuulensuojakipsilevyn osalta molempien homehtumisherkkyysluokkien mukaan laskettuna.

Ilmavuodot kasvattavat puurunkoisten vaipparakenteiden kosteusongelmariskiä, koska pienetkin ilmavuodot kuljettavat rakenteisiin enemmän kosteutta kuin diffuusio. Ilmavuotoja sisältävien rakenteiden tarkasteluja varten tutkimuksessa tehtiin kirjallisuusselvitys ilmavuotojen ja niiden vaikutusten mallintamisesta rakennusfysikaalisilla laskentaohjelmilla. Ilmanvirtaus on seurausta paine-erosta, joten tutkimuksessa selvitettiin myös tarkasteluihin soveltuvia tapoja määrittää rakennuksen vaipan yli vallitsevia paine-eroja.

Rakennuksen vaipan yli vallitsee tyypillisesti jatkuvasti vaihteleva ilmanpaine-ero, joka muodostuu ulko- ja sisäilman lämpötilaerosta, tuulesta sekä ilmanvaihtojärjestelmän aiheuttamasta paine-erosta. Tuulesta aiheutuva ilmanpaine-ero laskettiin ilmastodatasta käyttämällä ulkopuolisena painekertoimena  $c_{p,e}$  standardin SFS-EN 1991-1-4+AC+A1 (2011) mukaisia rakenneyksityiskohtien arvoja, koska tutkimuksessa tarkasteltiin rakenteiden liitoksia. Tutkimuksessa sisäpuolisena painekertoimena  $c_{p,i}$  käytettiin tuulen suunnan mukaan vaihtelevaa painekerrointa, mutta suositeltavaa on käyttää tasatiiviin rakennuksen sisäpuolista painekerrointa ( $c_{p,i} = -0,3$ ) tai laskea sisäpuolinen painekerroin tapauskohtaisilla vaipan ilmatiiviyslukujen avulla. Tuulesta aiheutuvien ylipainetilanteiden jakautuminen rakennuksen seinille ei ollut tasaista johtuen etelästä ja lounaasta puhaltavien tuulten suuremmasta osuudesta.



Rakennusfysikaalisten lämpö- ja kosteuslaskelmien näkökulmasta katsottuna ylipaineen kasvattaminen lisää rakenteisiin kohdistuvia kosteuskuormia, joten tarkempien tietojen puuttuessa suuremman ylipaineen tuottavien arvojen valitseminen parantaa laskennan varmuutta esiintyviin olosuhteisiin nähden. Pidemmällä aikavälillä on kuitenkin suositeltavaa arvioida paine-erolaskennan tarkkuutta todellisiin kohteisiin verrattuna, jotta ylipaineen aiheuttamien kosteuskuormien lisäksi myös muiden tekijöiden vaikutukset saadaan otettua sopivassa suhteessa huomioon.

Ilman siirtymisen mallintaminen rakennusfysikaalisissa laskentatarkasteluissa on haasteellista johtuen ilman siirtymisen nopeudesta verrattuna lämmön ja kosteuden siirtymiseen. Ilmavuotojen tai niiden vaikutusten mallintamistapa riippuu käytettävissä olevan laskentaohjelman ominaisuuksista. Tarkin tapa ilmavuotojen mallintamiseen on virtauslaskenta, kun taas kevyin tapa mallintaa ilmavuotoja on asettaa rakenteeseen ilmavuotoa vastaava kosteuslähde. Tämän tutkimuksen laskentatarkasteluissa ilman siirtyminen on mallinnettu laminaarisena ilman virtauksena Delphin-laskentaohjelman ominaisuuksista johtuen. Laminaarisesta ilman virtauksesta johtuen rakenteeseen mallinnetun raon koolla ei juurikaan ollut vaikutusta rakenteen läpi virtaavan ilman määrään, koska suurin osa paine-eron pudotuksesta tapahtui tuulensuojakipsilevyn kohdalla.

Rakennuksen paine-eron säätäminen pieneksi tai tarkasti kaikkialla rakennuksessa voi olla vaikeaa eikä mikään rakenne ole täysin ilmatiivis, joten rakenteilla tulee olla kosteudensietokykyä. Saksalaisen standardin DIN 68800-2 (2012) mukaan puurakenteisten yläpohjarakenteiden kuivumispotentiaalin tulisi olla vähintään  $250 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  ja seinärakenteiden  $100 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ . Rakenneliitosten kohdalla ilmavuodolle alttiin pinta-alan määrittäminen oli hankalaa. Ideaalisen tiiviillä tuulensuojakipsilevyn asennuksella rakenteisiin raon läpi virtaavan kosteuden määräksi laskettiin  $138 - 180 \text{ g/a}$ . Ilmavuototarkasteluissa havaittiin, että rakenne ei kuivunut sisään päin konvektion vaikutuksesta, vaan kuivuminen tapahtui diffuusiolla rakenteesta ulospäin. Tästä johtuen ilmavuototarkasteluissa saatiin lähes samoja tuloksia vaihtelevalla paine-erolla ja vuoden paine-eron keskiarvoa lähellä olevalla vakio paine-erolla.

Laskentatarkastelujen tuloksia ei pystytty suoraan vertaamaan aikaisempiin rakenneliitosten tutkimustuloksiin. Ulkoseinien rakenneliitosten laskentatuloksia vertailtiin vastaavien seinärakenteiden rakennetyyppien tutkimuksiin, jotta varmistuttiin siitä, että tulokset käyttäytyvät samalla tavalla kuin aikaisemmissa rakennetyyppien tutkimuksissa saadut tulokset. Yleinen huomio tuloksista on, että kukin rakenneratkaisu liittokseen tulee käsitellä omana kokonaisuutenaan, ellei eri tapausten yhdistämiselle ole erityisiä perusteita. Varsinkin liitososat voivat sisältää runsaasti yksityiskohtia, jolloin lopputuloksen arviointi voi olla vaikeaa. Tämä huomioon ottaen nyt tarkasteltujen tapausten tulokset ovat kuitenkin jälkikäteen arvioituna melko samansuuntaisia aikaisemmin kirjallisuudessa esitettyjen rakennetyyppien tarkastelujen tulosten kanssa.

## 5.1 Puuverhotut seinärakenteet

Puuverhottujen ulkoseinärakenteiden toimintaa tarkasteltiin seinärakenteilla US1-US3 (ks. liite 3). Puuverhotuilla seinärakenteilla rakennetyyppien ja -liitosten vastaavien tarkastelupisteiden homeindeksien maksimiarvot vastasivat tutkimusten ja rakenteiden kesken kohtalaisen hyvin toisiaan tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa. Runkotolpan ulkonurkan homeindeksin maksimiarvoissa havaitut erot liitosten ja rakennetyyppien tarkastelujen välillä olivat keskenään loogisia ja erojen syyt selitettävissä.

Alapohjaliitoksissa perusmuurin kapillaarikatkoa vasten tuleva alaohjauspuu voi rakennusaikaisesta kosteudesta kastuessaan pysyä kosteana useita vuosia puun alapinnan keskialueelta. Tutkittujen alaohjauspuun lämmöneristysratkaisujen ei havaittu merkittävästi nopeuttavan alaohjauspuun kuivumista. Alaohjauspuun eristäminen alapuolelta kuivatti rakennetta kuitenkin hieman nopeammin kuin eristäminen alaohjauspuun ja tuulensuojakipsilevyn välistä. Elementtiliitoksille tyypillisen alajuoksun lisääminen alaohjauspuun päälle pidensi kuivumisaikaa huomattavasti, mikä näkyi erityisesti alaohjauspuun yläpinnan korkeampana kosteuspitoisuutena. Rakennusaikaisen kosteuden määrä alaohjauspuussa tulee pitää hyvin pienenä, koska ylimääräinen kosteus pääsee siirtymään alaohjauspuun läpi ulkoilmaan hitaasti.

Puuverhotun ulkoseinärakenteen alaohjauspuun homehtumisen kannalta kriittiset pisteet olivat alaohjauspuun ulkopinnan nurkissa ja alapinnassa noin 60 mm etäisyydellä alaohjauspuun ulkopinnasta. Alaohjauspuun alapuolinen lämmöneristäminen vaikutti vain vähän kriittisten pisteiden homeindeksin maksimiarvoon, mutta alaohjauspuun ja tuulensuojakipsilevyn välinen eristäminen paransi alkutilanteessa kuivan alaohjauspuun käytön aikaisia olosuhteita jo hyvin pienelläkin eristepaksuudella. Alaohjauspuun homehtumisherkkyyden parantamista voidaan suositella, jotta homeenkasvu ei alkaisi rakennusaikaisen kosteuden seurauksena rakennuksen ensimmäisinä käyttövuosina ennen alaohjauspuun rakennusaikaisen kosteuden kuivumista.

Ilmavuodottoman puuverhotun ulkoseinärakenteen ulko- ja sisänurkkaliitokset täyttivät homeindeksin maksimiarvolle asetetun vaatimuksen  $M_{\max} < 1,0$  nykyisessä ja vuoden 2050 -ilmastossa U-arvotasolle 0,12 W/(m<sup>2</sup>·K) asti, kun tuulensuojakipsilevy oletettiin homehtumisherkkyydsluokkaan 2. Tuulensuojakipsilevyn homehtumisherkkyydsluokassa 1 asetettu vaatimus täyttyi ulkoseinärakenteen ulko- ja sisänurkkaliitoksissa vain nykyilmastossa. Avohuokoisen tuulensuojamineraalivillan lisääminen tuulensuojakipsilevyn ulkopuolelle paransi puuverhotun ulkoseinärakenteen siten, että vaatimus täyttyi myös vuoden 2100 ilmastossa tuulensuojakipsilevyn homehtumisherkkyydsluokasta riippumatta.

Puuverhottujen seinärakenteiden ulkonurkkaliitoksissa tulee välttää tilannetta, jossa sisäpuolinen koolaus ja lämmöneristekerroksen taakse viety höyrünsulkukalvo on suoraan

kylmäsiirtimien toimivan puurangan kautta kytköksissä ulkoilmaan. Mikäli rakenteessa halutaan käyttää sisäänvedettyä höyrynsulkua, on höyrynsulku suositeltavaa siirtää ulkonurkkaliitoksessa mahdollisimman lähelle sisäverhouskerrosta. Sisänurkkaliitoksessa tulee vastaavasti välttää puurangan asettamista nurkka-alueella lämmöneristekerroksen ulkopintaan siten, että lämmöneristeen kylmälle puolelle muodostuu suuren diffuusiovastuksen omaava umpinainen kotelo.

Ilmavuotojen aiheuttamien kosteusrasitusten suhteen puuverhotulla ulkoseinärakenteella on pieni kapasiteetti. Nurkkaliitosten uloisimmat osat ovat suoran seinän rakenneosia kriittisempiä ilmavuodoille, koska ne ovat pääsääntöisesti kylmemmissä olosuhteissa, suhteellinen kosteus on korkea ja kuivuminen hitaampaa. Ilmavuotojen aiheuttamien kosteusrasitusten sietokykyä voitiin parantaa lisäämällä avojuokseista lämmöneristettä tuulensuojakipsilevyn ulkopuolelle. Merkittävämpi vaikutus rakenteen toimivuudelle on höyrynsulkukerroksen ja tuulensuojakerroksen tiiveydellä.

## 5.2 Tiiliverhotut seinärakenteet

Tiiliverhottujen ulkoseinärakenteiden toimintaa tarkasteltiin seinärakenteilla US1-US6 (ks. liite 3). Tiiliverhottujen seinärakenteiden kohdalla voidaan todeta, kuten puuverhottujen seinärakenteiden kohdalla todettiin, homeindeksin maksimiarvot vastasivat kohtalaisen hyvin toisiaan tutkimusten ja rakenteiden kesken tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa. Tiiliverhottujen seinärakenteiden sisänurkkaliitoksessa tuulensuojakipsilevyn sisäpinnan tarkastelupiste oli puuverhotuista seinärakenteiden vertailuista poiketen vähemmän kriittinen verrattuna rakennetyyppien tutkimuksiin. Runkotolpan ulkonurkassa erot rakennetyyppien ja -liitosten tutkimusten välillä olivat puuverhottujen seinärakenteiden tapaan suurempia.

Tiiliverhotun ulkoseinärakenteen alapohjaliitoksen toimintaa tarkasteltiin seinärakenteella US5, missä tuulensuojakipsilevyn ulkopuolella käytettiin 75 mm paksua tuulensuojamineraalivillaa. Eristämättömän alaohjauspuun kosteuspitoisuus vastasi laskentavuoden aikana tasoittuneessa tilanteessa 80 - 90 % RH huokosilman suhteellista kosteutta, mikä altisti alaohjauspuun jatkuvasti homeenkasvulle otollisille olosuhteille, kun alaohjauspuun lämpötila oli nollan yläpuolella. Eristäminen alaohjauspuun ja perusmuurin välistä kuivatti alaohjauspuuta nopeammin kuin eristäminen alaohjauspuun ja tuulensuojakipsilevyn välistä. Eristäminen alaohjauspuun ulkopuolelta nosti alaohjauspuun lämpötilaa ja laski alaohjauspuun kosteuspitoisuutta tasoittuneessa tilanteessa.

Tiiliverhotun seinärakenteen alaohjauspuun homeindeksin maksimiarvo nousi alaohjauspuun ala- ja yläpinnassa korkeaksi, vaikka alaohjauspuu oli alkutilanteessa kuiva. Vantaan ilmasto-olosuhteista ja tiiliverhotun seinärakenteen ominaisuuksista johtuen alaohjauspuun kosteuspitoisuus pysyi korkeana läpi tarkastelujakson.

Alaohjauspuun ja tuulensuojakipsilevyn välisellä lämmöneristyksellä ei ollut merkittävää vaikutusta alaohjauspuun pintojen homeindeksien maksimiarvoihin, koska tarkasteltava seinärakenne US5 oli lämmöneristetty tuulensuojalevyn ulkopuolelta mineraalivillalla. Alaohjauspuun ja tuulensuojakipsilevyn välinen lämmöneriste ei siten merkittävästi nostanut alaohjauspuun lämpötilaa verrattuna eristämättömään alaohjauspuuhun. Alaohjauspuun ja perusmuurin välinen lämmöneriste paransi olosuhteita alaohjauspuun sisäpinnassa, mutta eristeen vaikutus alaohjauspuun ulkopinnan olosuhteisiin oli vähäinen. Tutkimuksessa tarkastellun tiiliverhotun seinärakenteen alapohjaliitoksessa alaohjauspuun pintojen homeindeksin maksimiarvoa ei saatu laskettua alle kriittisen raja-arvon tutkituilla eristysratkaisuilla.

Ilmavuodottoman tiiliverhotun ulkoseinärakenteen ulko- ja sisänurkkaliitosten rakennesienien olosuhteet olivat odotetusti sitä paremmat mitä suurempi määrä eristettä tuulensuojakipsilevyn ulkopuolelle asetettiin. 100 mm paksulla tuulensuojamineraalivillalla lisäeristetyin seinärakenteen (US6) liitokset täyttivät homeindeksin maksimiarvolle asetetun vaatimuksen  $M_{\max} < 1,0$  nykyilmastossa ja vuoden 2050 ilmastossa, kun tuulensuojakipsilevyn homeutumisherkkyyssluokka oli 2 ja vain nykyilmastossa, kun tuulensuojakipsilevyn homeutumisherkkyyssluokka oli 1. 75 mm paksulla tuulensuojamineraalivillalla eristetyin seinärakenteen (US5) liitokset täyttivät vaatimukset vain nykyilmastossa, kun tuulensuojakipsilevyn homeutumisherkkyyssluokka oli 2. Tutkittujen seinärakenteiden liitokset eivät täyttäneet toimintakriteerejä vuoden 2100 ilmastossa.

Tiiliverhottujen ulkoseinärakenteiden ulkonurkkaliitoksessa höyrynsulkumuovin siirtäminen rungon sisäpinnasta sisäkoolauksen sisäpintaan ei vaikuttanut merkittävästi homeindeksin maksimiarvoihin sisäkoolauksen nurkissa. Tiiliverhotuissa rakenteissa tiiliverhoukseen imeytynyt sadevesi siirtyy diffuusion seurauksena kohti rakenteen sisäosia, mikä havaittiin tarkasteluissa runkotolpan sisänurkan homeindeksin kasvuna. Höyrynsulkumuovin siirtäminen rungon sisäpinnasta sisäkoolauksen sisäpintaan altistaa sisäkoolauksen ulkoilman aiheuttamalle kosteusrasitukselle.

Tiiliverhottujen ulkoseinärakenteiden ilmavuototarkastelut tehtiin seinärakenteen US5 ulkonurkkaliitoksille. Seinärakenteen ulkonurkkaliitos ei täyttänyt asetettuja vaatimuksia nyky- eikä tulevaisuuden ilmastossa, koska ilmavuodot nostivat ulkonurkan uloimpien osien homeindeksin maksimiarvon yli sallitun raja-arvon 1,0.

## LÄHTEET

Aho, H. & Korpi, M. (2009). Ilmanpitävien rakenteiden ja liitosten toteutus asuinrakennuksissa, Tutkimusraportti 141, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Tampere, 100 s.

Arfvidsson, J., Harderup, L. & Samuelson, I. (2017). Fukthandbok: praktik och teori, 4. ed., Svensk Byggtjänst, Stockholm, 504 p.

ASHRAE Handbook Fundamentals (2017). Fundamentals, SI ed., American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta.

ASHRAE Standard 160 (2016). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, 20 p.

Belleudy, C., Woloszyn, M., Chhay, M. & Cosnier, M. (2016). A 2D model for Coupled Heat, Air, and Moisture Transfer Through Porous Media in Contact with Air Channels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 95. pp. 453-465.

Björkholtz, D. (1997). Lämpö ja kosteus, *Rakennusfysiikka*, 3. painos, Rakennustieto Oy, Helsinki, 150 s.

Derome, D. (2005). Moisture Accumulation in Cellulose Insulation Caused by Air Leakage in Flat Wood Frame Roofs, *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, Vol. 28(3), pp. 269-287.

DIN 68800-2 (2012). Wood preservation - Part 2: Preventive constructional measures in buildings. Deutsches Institut für Normung (German Institute for Standardization), Germany, 50 p.

Energiatohokkuus, Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta, Ohjeet (2017). Suomen rakentamismääräyskokoelma, Ympäristöministeriö, Helsinki, 80 s.

Etheridge, D. & Sandberg, M. (1996). *Building Ventilation: Theory and Measurement*, John Wiley & Sons, Chichester, 724 p.

Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (2017). 2014 ed., World Meteorological Organization (WMO), Switzerland, 1177 p.

Hagentoft, C. (2001). *Introduction to Building Physics*, Studentlitteratur, Lund, 422 p.

Hens, H. (2007). *Building Physics - Heat, Air and Moisture*, Ernst & Sohn, Berlin, 270 p.

Hukka, A. & Viitanen, H.A. (1999). A mathematical Model of Mould Growth on Wooden Material, *Wood Science and Technology*, Vol. 33(6), pp. 475-485.

Ilmakehä-ABC, Ilmatieteenlaitos, verkkosivu.

Saatavissa (viitattu 16.8.2018): <http://ilmatieteenlaitos.fi/ilmakeha-abc>

Janssens, A. & Hens, H. (2003). Interstitial Condensation Due to Air Leakage: A Sensitivity Analysis, *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, Vol. 27(1), pp. 15-29.

Jokela, T. (2018). Kipsilevytuulensuojallisten puurankarunkoisten ulkoseinien rakennusfysikaalinen toiminta, Tampereen teknillinen yliopisto, 113 s. + 29 liites.

Jussila, H (2018). Ilmatiiveys ja vuotokohdat uusissa rakennuksissa 1/2018, Vertia Oy, verkkosivu.

Saatavissa (viitattu 8.1.2019): <https://vertia.fi/tiiveysmittaus/ilmanvuotoluku/>

Kalamees, T. (2007). Air Tightness and Air Leakages of New Lightweight Single-Family Detached Houses in Estonia, *Building and Environment*, Vol. 42(6), pp. 2369-2377.

Kalamees, T., Alev, Ü & Pärnalaas, M. (2017). Air Leakage Levels in Timber Frame Building Envelope Joints, *Building and Environment*, Vol. 116 pp. 121-129.

Kalamees, T. & Kurnitski, J. (2010). Moisture Convection Performance of External Walls and Roofs, *Journal of Building Physics*, Vol. 33(3), pp. 225-247.

Kalamees, T., Kurnitski, J., Jokisalo, J., Eskola, L., Jokiranta, K. & Vinha, J. (2007). Air Pressure Conditions in Finnish Residences, *Proceedings of Clima 2007 WellBeing Indoors*, 8 p.

Karagiozis, A. & Küenzel, H. (2009). The Effect of Air Cavity Convection on the Wetting and Drying Behavior of Wood-Frame Walls Using a Multi-Physics Approach, *Journal of ASTM International*, Vol. 6(10), pp. 15.

Karjalainen, M. (2018). Puurakentamisen asema ja mahdollisuudet Suomessa, Puuinfo, Puutieto, verkkosivu.

Saatavissa (viitattu 1.7.2019): <https://www.puuinfo.fi/puutieto/puurakentaminen/puurakentamisen-asema-ja-mahdollisuudet-suomessa>

Karttunen, H., Koistinen, J., Saltikoff, E. & Manner, O. (2008). Ilmakehä, sää ja ilmasto, Ursa r.y., Helsinki, 497 p.

Keller, F.J., Gettys, W.E. & Skove, M.J. (1993). *Physics: Classical and Modern*, 2nd ed., McGraw-Hill Inc., New York. 1147 p.

Kumaran, M.K. (2001). Hygrothermal Properties of Building Materials, *ASTM Manual 40: Moisture Analysis and Condensation Control in Building Envelopes*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA, pp. 29-65.

Kumaran, M.K. (2009). *Fundamentals of Transport and Storage of Moisture in Building Materials and Components, Moisture Control in Buildings - The Key Factor in Mold Prevention (2nd edition)*, American Society for Testing and Materials, Baltimore, MD, pp. 1-15.

Künzel, H.M. (1995). Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters, Fraunhofer Institute of Building Physics, Fraunhofer IRB, Stuttgart, 65 p.

Künzel, H.M., Zirkelback, D. & Schafaczek, B. (2012). Modelling the Effect of Air Leakage in Hygrothermal Envelope Simulation, Proceedings BEST3 (Buildings Enclosure Science and Technology), Atlanta, National Institute of Building Science, Atlanta, 13 p.

Langmans, J., Klein, R. & Roels, S. (2012a). 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., Nicolai, A., Klein, R. & Roels, S. (2012b). A quasi-steady state implementation of air convection in a transient heat and moisture building component model, Building and Environment, Vol. 58, pp. 208-218.

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.

Liddament, M.W. (1996). A Guide to Energy Efficient Ventilation, Air Infiltration and Ventilation Centre, Iso-Britannia, 250 p. + 24 ap.

Mills, A.F. (1999). Basic Heat and Mass Transfer, 2nd edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1000 p.

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

Delphin 5 (2006). User Manual and Program Reference, University of Technology in Dresden, 116 p.

Ojanen, T., Airaksinen, M. & Tuomaala, P. (2016). Energiatohokkaiden uudisrakennusten rakenteiden kosteustekninen toimivuus, Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, Espoo, 28 s. + 3 liites.

Ojanen, T., Viitanen, H., Peuhkuri, R., Lähdesmäki, K., Vinha, J. & Salminen, K. (2010). Mold Growth Modeling of Building Structures Using Sensitivity Classes of Materials, Proceedings of Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XI International Conference, Buildings XI, Clearwater Beach, Florida, USA, December 5–9. Session II-B, 10 p.

Online help for WUFI-2D, version 3.2.0 (2007). Fraunhofer Institute of Building Physics.

Opas asuinrakennusten ilmanvaihdon mitoitukseen (2017). The Finnish Association of HVAC Societies, FINVAC r.y., Helsinki, 12 s.

- Pedersen, C.R. (1990). Combined heat and moisture transfer in building constructions, Technical University of Denmark, Lyngby, 132 p.
- Pihelo, P., Kikkas, H. & Kalamees, T. (2016). Hygrothermal Performance of Highly Insulated Timber-frame External Wall, *Energy Procedia*, Vol. 96, pp. 685-695.
- RIL 250-2011 (2011). Kosteudenhallinta ja homevaurioiden estäminen, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y., Helsinki, 243 s.
- RIL 107-2012 (2012). Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y., Helsinki, 219 s.
- RIL 255-1-2014 (2014). Rakennusfysiikka 1, Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset, Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL r.y., Helsinki, 384 s. + 116 liites.
- RIL 249-2015 (2015). Energiatehokas asuinrakennus - kohti lähes nollaenergiarakentamista, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y., Helsinki, 250 s.
- RT 07-11299 (2018). Sisäilmastoluokitus 2018. Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset, Rakennustietosäätiö RTS, 24 s.
- RT 80-10974 (2009). Teollisesti valmistettujen asuinrakennusten ilmanpitävyyden laadunvarmistusohje, Rakennustietosäätiö RTS, 24 s.
- Ruosteenoja, K., Jylhä, K., Mäkelä, H., Hyvänen, R., Pirinen, P. & Lehtonen, I. (2013). Rakennusfysiikan testivuosisien sääaineistot havaitussa ja arvioidussa tulevaisuuden ilmastossa. REFI-B-hankkeen tuloksia, Raportteja 2013:1, Ilmatieteen Laitos, Helsinki, 48 s.
- Sanders, C. (1996). IEA. Annex 24. Heat, Air and Moisture Transfer Through New and Retrofitted Insulated Envelope Parts (HAMTIE). Final report. 2: Task 2: Environmental Conditions, K.U.-Leuven. Department of Civil Engineering, Laboratory of Building Physics, 96 p.
- SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1 (2011). Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-4: Yleiset kuormat. Tuulikuormat, Suomen Standardisoimisliitto SFS, Helsinki.
- SFS-EN ISO 10211 (2017). Thermal bridges in building construction. Heat Flows and Surface temperatures. Detailed calculations, Suomen Standardisoimisliitto SFS, Helsinki.
- SFS-EN ISO 10456 + AC (2008). Rakennusaineet ja -tuotteet. Lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet. Taulukoidut suunnittelu-arvot ja menetelmät ilmoitetun lämpöteknisen arvon ja lämpöteknisen suunnittelu-arvon määrittämiseksi., Suomen standardisoimisliitto SFS, Helsinki.
- SFS-EN ISO 13788 (2012). Hygrothermal performance of building components and building elements. Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation. Calculation methods, Suomen Standardisoimisliitto SFS, Helsinki.



SFS-EN ISO 15927-3 (2009). Hygrothermal performance of buildings. Calculation and presentation of climatic data. Part 3: Calculation of a driving rain index for vertical surfaces from hourly wind and rain data, Suomen Standardisoimisliitto SFS, Helsinki.

SFS-EN ISO 6946 (2017). Building components and building elements. Thermal resistance and thermal transmittance. Calculation methods, Suomen Standardisoimisliitto SFS, Helsinki.

SFS-EN ISO 9972 (2015). Thermal performance of buildings. Determination of air permeability of buildings. Fan pressurization method, Suomen Standardisoimisliitto SFS, Helsinki.

Siikanen, U. (2016). Puurakentaminen, 2. uudistettu painos, Rakennustieto Oy, Helsinki, 367 s.

Siikanen, U. (2014). Rakennusfysiikka, Perusteet ja sovelluksia, Rakennustieto Oy, Helsinki, 256 s.

Suomen rakentamismääräyskokoelma D2 (2012). Rakennuksen sisäilmasto ja ilmanvaihto, määräykset ja ohjeet, Ympäristöministeriö, Helsinki.

Suomen rakentamismääräyskokoelma D3 (2010). Rakennusten energiatehokkuus, määräykset ja ohjeet, Ympäristöministeriö, Helsinki.

Swami, M.V. & Chandra, S. (1988). Correlations for pressure distribution on buildings and calculation of natural ventilation airflow, ASHRAE Transactions, Vol. 94(1), 27 p.

Swami, M.V. & Chandra, S. (1987). Procedures for Calculating Natural Ventilation Airflow Rates in Buildings, Florida, 130 p.

Tasauslaskentaopas 2018 (2017). Rakennuksen lämpöhäviön määräystenmukaisuuden osoittaminen, Ympäristöministeriö, Helsinki, 31 s. + 69 liites.

Tiiveys pientaloissa (2016). Tilastot 2016, Oulun rakennusvalvonta, Oulu.

Toimivat katot 2013 (2013). Kattoliitto r.y., Helsinki, 118 s.

Tuominen, E, Ruusala, A, Laukkarinen, A, Pätsi, S, Pessi, A-M & Vinha, J (2019). Huokoisten puukuitu- ja kipsilevytuulensuojalevyjen homeutumisherkyys, Rakennusfysiikka 2019: Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut. 28.-30.10.2019, Tampere. vol. Seminaarijulkaisu 6, Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka, Tampere, pp. 517-524.

Saatavissa (viitattu 15.3.2020): <http://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202002202254>

Viitanen, H., Peuhkuri, R., Tanskanen, K. & Ojanen, T. (2008). Lausunto rakenteiden energiatehokkuuden parantamisen vaikutuksista rakenteiden kosteustekniseen toimivuuteen, Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, Espoo, 21 s. + 1 liites.

Vinha, J., Valovirta, I., Korpi, M., Mikkilä, A. & Käkelä, P. (2005a). Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, Tutkimusraportti 129, 101 s. + 211 liites.

Vinha, J., Korpi, M., Kalamees, T., Eskola, L., Palojen, J., Kurnitski, J., Valovirta, I., Mikkilä, A. & Jokisalo, J. (2005b). Puurunkoisten pientalojen kosteus- ja lämpötilaolosuhteet, ilmanvaihto ja ilmatiiviys. Tutkimusraportti 131, Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Talonrakennustekniikan laboratorio, 102 s. + 10 liites.

Vinha, J. (2007). Hygrothermal Performance of Timber-Framed External Walls in Finnish Climatic Conditions: A Method for Determining the Sufficient Water Vapour Resistance of the Interior Lining of a Wall Assembly, Tampere University of Technology, Tampere, 380 p.

Vinha, J., Korpi, M., Kalamees, T., Jokisalo, J., Eskola, L., Palonen, J., Kurnitski, J., Aho, H., Salminen, M., Salminen, K. & Keto, M. (2009). Asuinrakennusten ilmanpitävyys, sisäilmasto ja energiatalous, Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Rakennetekniikka, Tutkimusraportti 140, 148 s. + 19 liites.

Vinha, J. (2011). Rakennusfysiikka, luentomoniste, Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, 767 p.

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. (2013). Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden ja rakennusten rakennusfysikaalisessa toiminnassa, Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Rakennetekniikka, Tutkimusraportti 159, 354 s. + 43 liites.

Wang, L. & Ge, H. (2017). Effect of air leakage on the hygrothermal performance of highly insulated wood frame walls: Comparison of air leakage modelling methods, *Building and Environment*, Vol. 123, pp. 363-377.

WTA Merkblatt 6-2 (2014). Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse (engl. Simulation of Heat and Moisture Transfer), WTA, Wissenschaftlich- Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V, München, Germany, 32 p.

Ympäristöministeriön asetus rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta (2017). (YMa 782/2017), Ympäristöministeriö, Helsinki.

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiategokkuudesta (2017). (YMa 1010/2017), Ympäristöministeriö, Helsinki.

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta (2017). (YMa 1009/2017), Ympäristöministeriö, Helsinki.

Ympäristöopas 2016 (2016). Rakennusten kosteus ja sisäilmatekninen kuntotutkimus, Ympäristöministeriö, Helsinki, 202 s. + 36 liites.

Zirkelbach, D., M Künzel, H., Schafaczek, B. & Borsch-Laaks, R. (2009). Dampfkongvektion wird berechenbar – Instationäres Modell zur Berücksichtigung von konvektivem Feuchteintrag bei der Simulation von Leichtbaukonstruktionen, Proceedings in AIVC-BUILD AIR, Berlin, Germany, 8 p.

## LIITEET

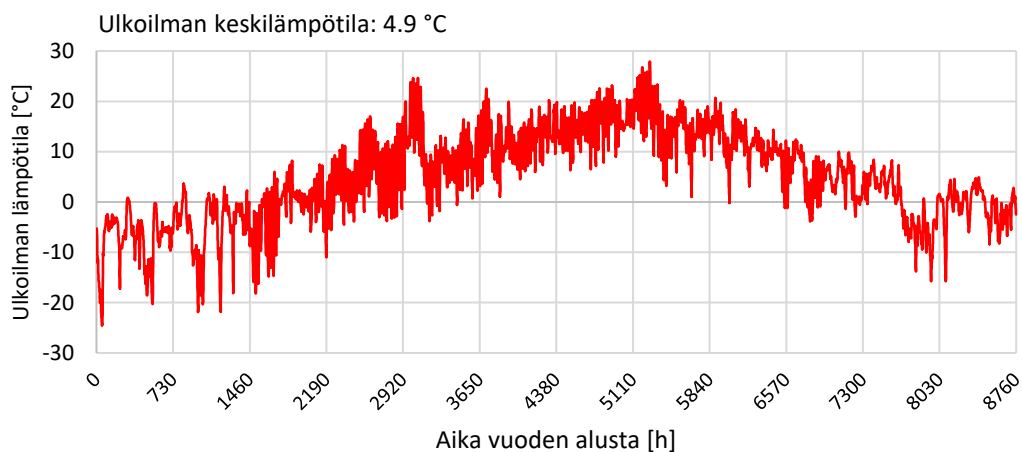
LIITE 1: RAKENNUSFYSIKAALISET TESTIVUODET	6 s.
LIITE 2: MATERIAALIOMINAISUUDET	18 s.
LIITE 3: TARKASTELTAVAT SEINÄRAKENTEET	3 s.

Liitteessä 1 on esitetty nykyilmastoa kuvaavien rakennusfysikaalisten testivuosien (Jokioinen 2004 ja Vantaa 2007) mitatut säätiedot kuvaajina ja tulevaisuuden ilmastoja kuvaavien rakennusfysikaalisten testivuosien (2050 ja 2100) säätiedot vuosia kuvaavina lukuina taulukossa. Rakennusfysikaalisten testivuodet on määritetty Tampereen teknillisen yliopiston rakennusfysiikan tutkimusryhmän toimesta osana FRAME-tutkimusta (Vinha et al. 2013). Rakennusfysikaalisten testivuosien säädädata on vapaasti saatavilla ilmatieteen laitoksen internet-sivuilla:

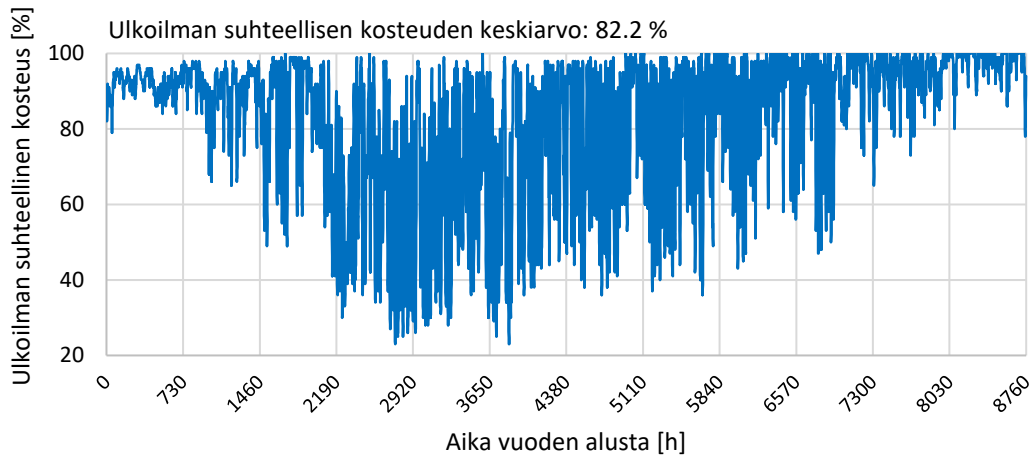
<https://ilmatieteenlaitos.fi/rakennusfysiikan-ilmastolliset-testivuodet>

## JOKIOINEN

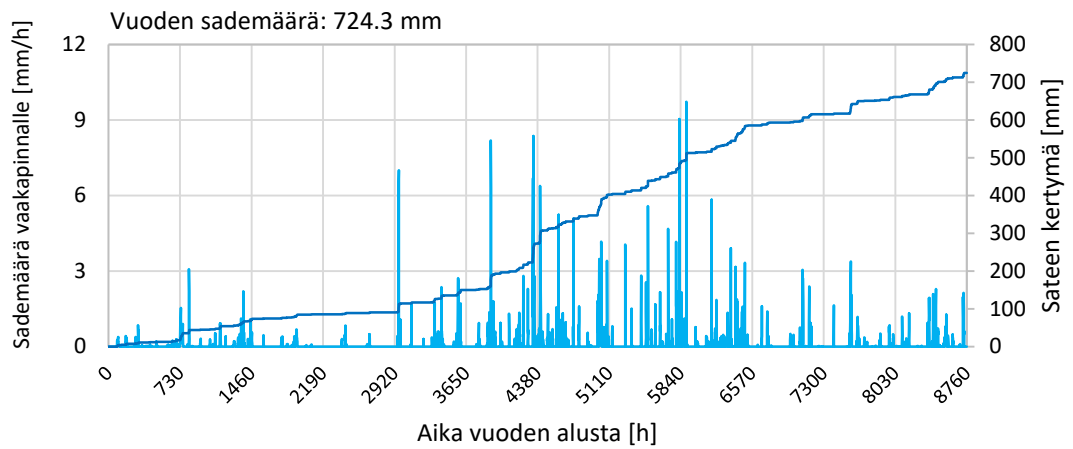
### Ulkoilman lämpötila - Jokioinen 2004



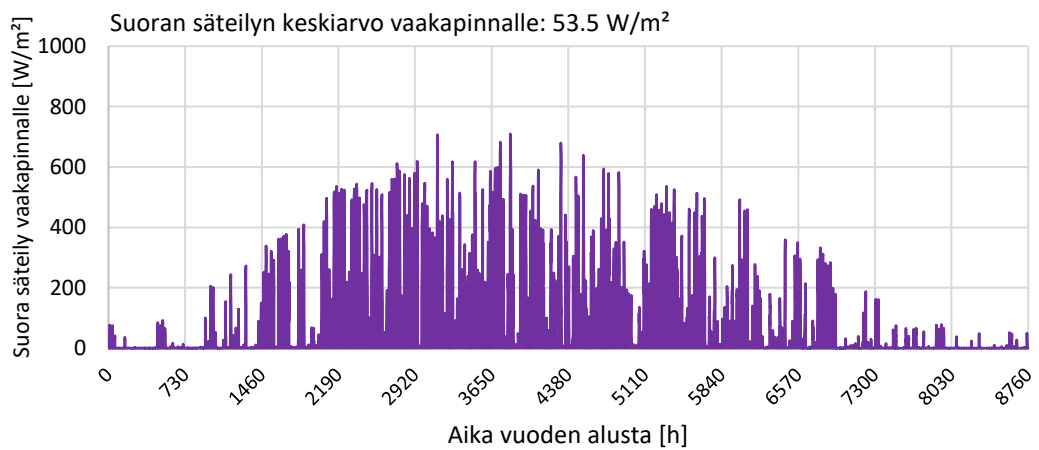
### Ulkoilman suhteellinen kosteus - Jokioinen 2004



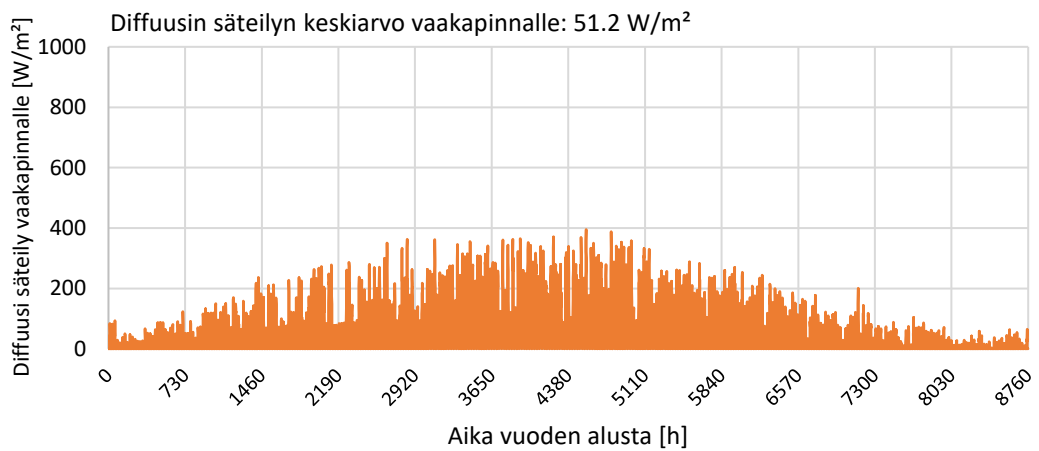
## Sademäärä vaakapinnalle - Jokioinen 2004



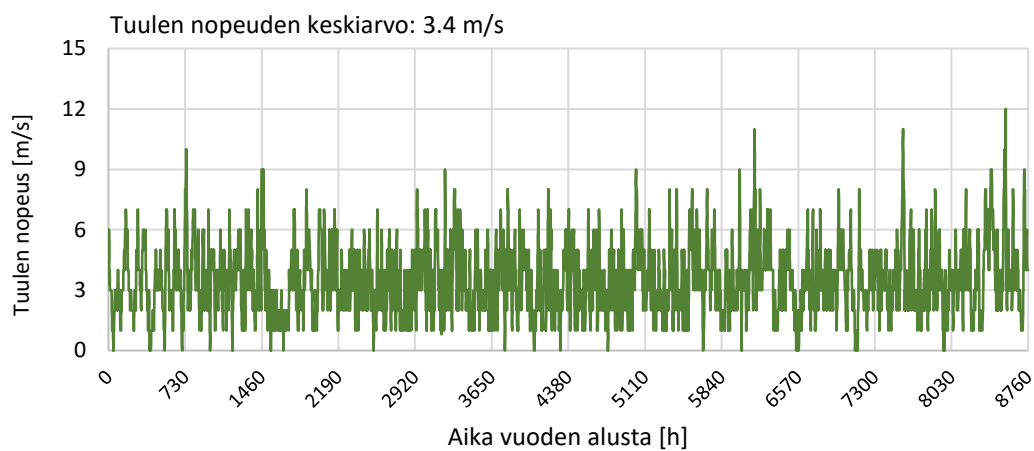
## Suora säteily vaakapinnalle - Jokioinen 2004



## Diffuusi säteily vaakapinnalle - Jokioinen 2004

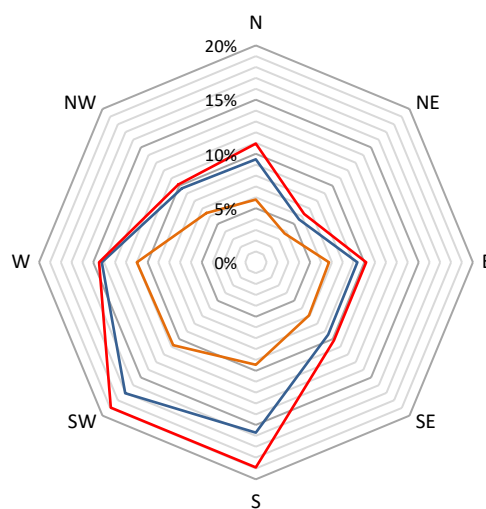


## Tuulen nopeus - Jokioinen 2004



## Tuuliruusu - Jokioinen 2004

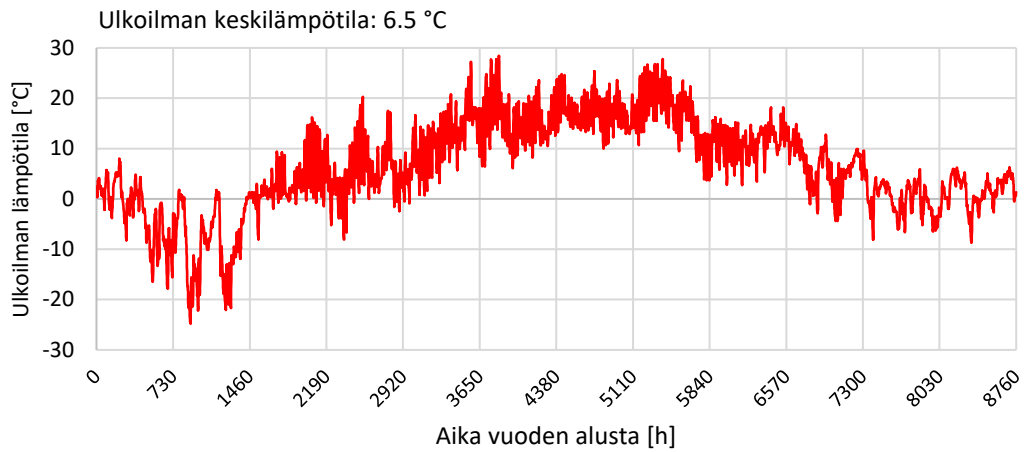
- Tuulen nopeus 0 - 4 m/s
- Tuulen nopeus 0 - 6 m/s
- Tuulen nopeus 0 - inf. m/s



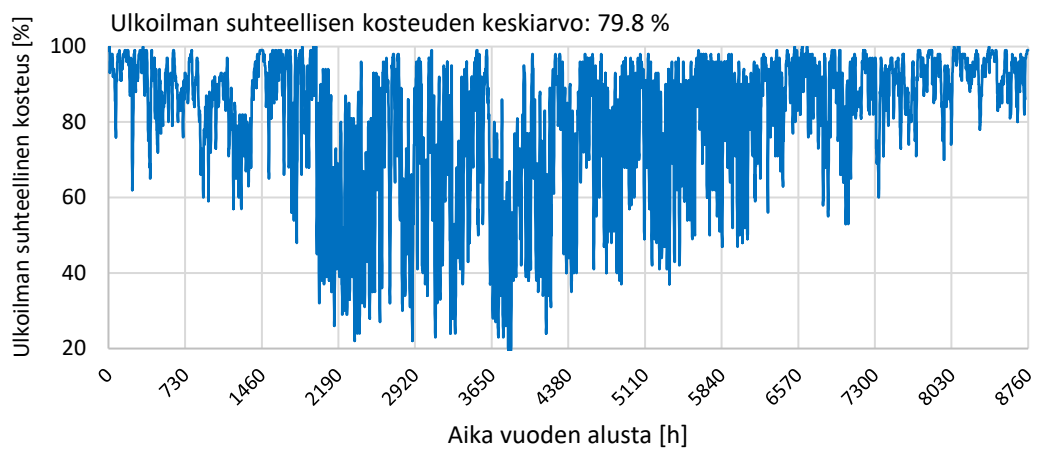
	Ulkoilman lämpötila (ka.)	Ulkoilman suhteellinen kosteus (ka.)	Suora auringonsäteily vaakapinnalle (ka.)	Diffuusi auringonsäteily vaakapinnalle (ka.)	Tuulen nopeus (ka.)	Vuoden sademäärä
	$T_e$	$RH_e$	$R_{dir}$	$R_{dif}$	$v_{wind}$	$r$
	[°C]	[%]	[W/m <sup>2</sup> ]	[W/m <sup>2</sup> ]	[m/s]	[mm]
Jokioinen 2004	4.9	82.2	53.5	51.2	3.4	724.3
Jokioinen 2050	6.9	82.5	52.8	51.0	3.5	772.7
Jokioinen 2100	9.8	83.3	51.2	50.6	3.6	851.9

## VANTAA

Ulkoilman lämpötila - Vantaa 2007

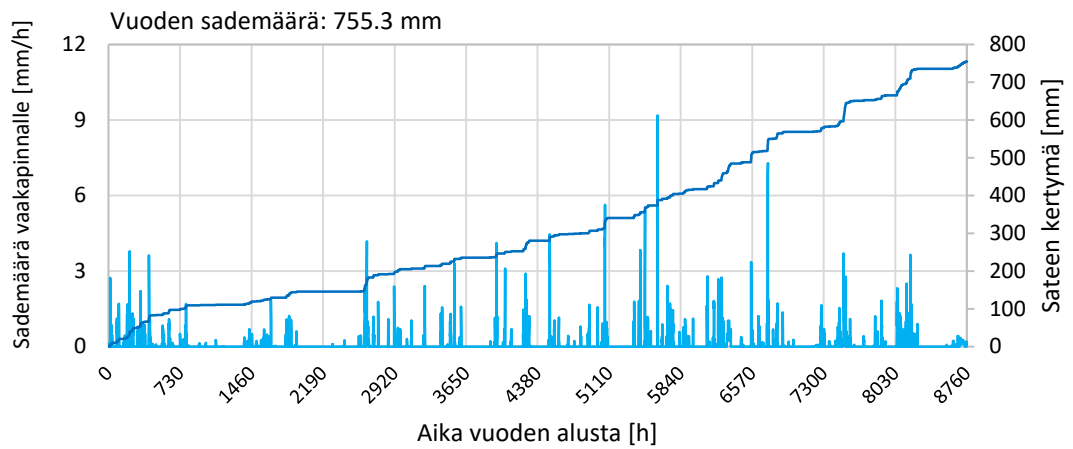


Ulkoilman suhteellinen kosteus - Vantaa 2007

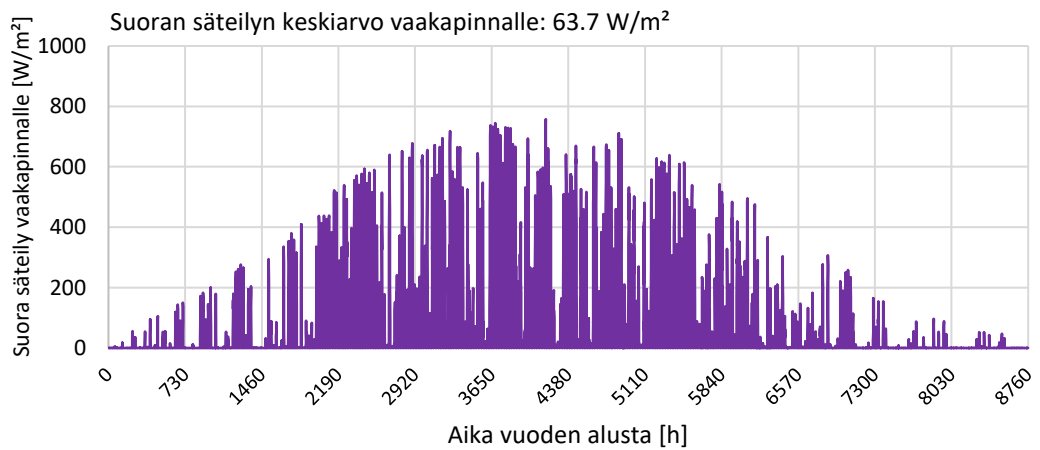




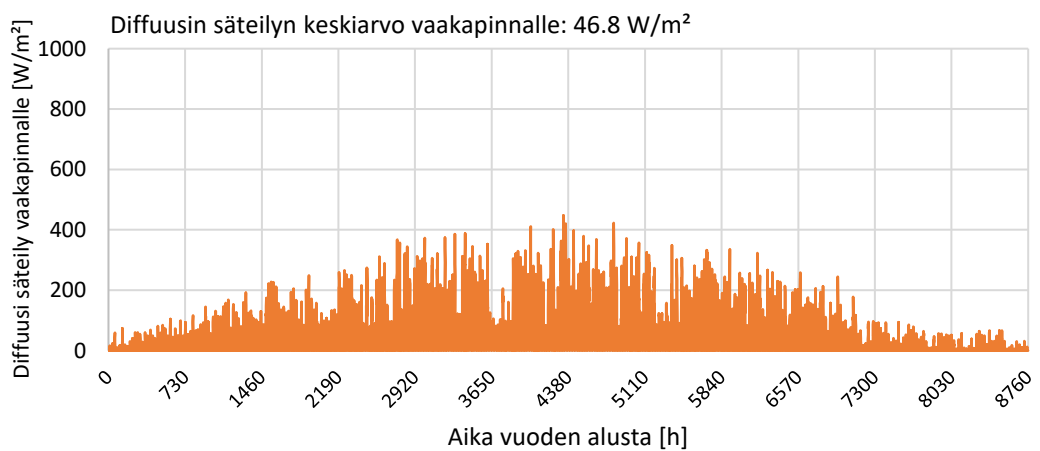
## Sademäärä vaakapinnalle - Vantaa 2007



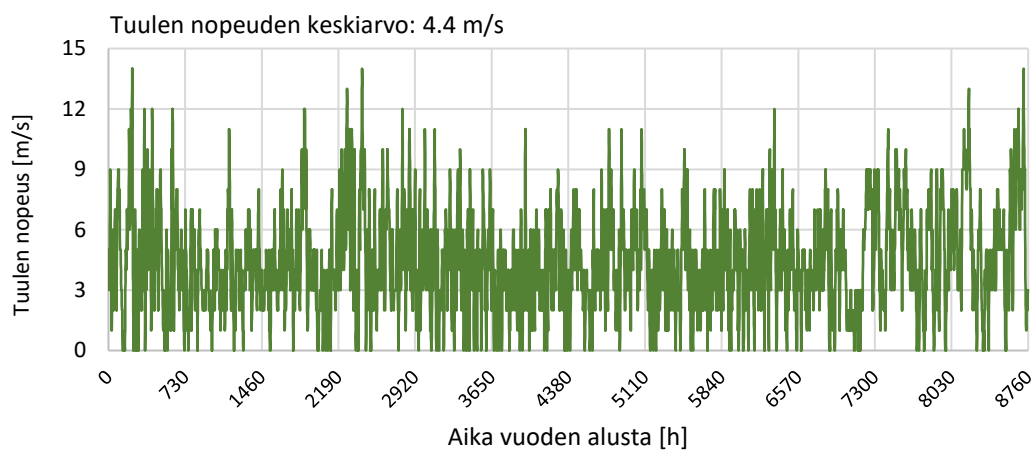
## Suora säteily vaakapinnalle - Vantaa 2007



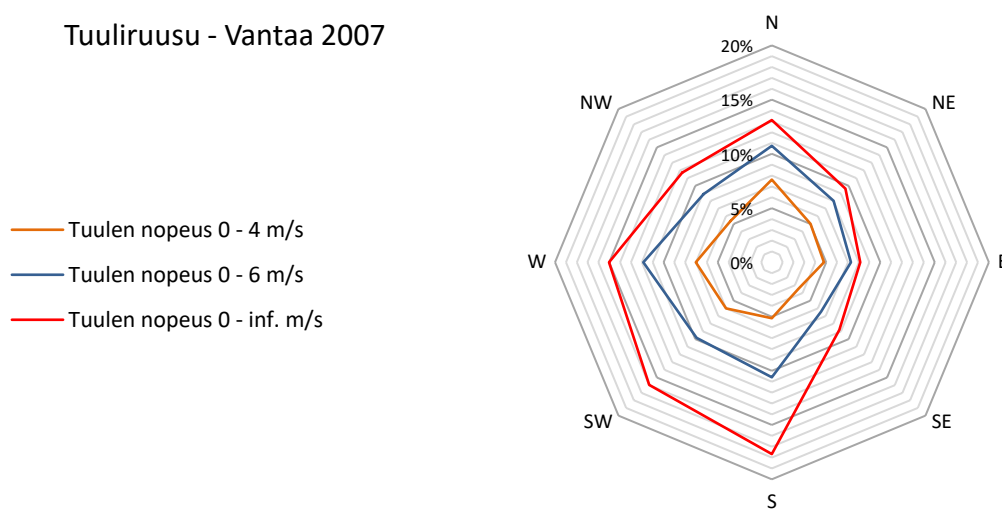
## Diffuusi säteily vaakapinnalle - Vantaa 2007



## Tuulen nopeus - Vantaa 2007



## Tuuliruuusu - Vantaa 2007



	Ulkoilman lämpötila (ka.)	Ulkoilman suhteellinen kosteus (ka.)	Suora auringonsäteily vaakapinnalle (ka.)	Diffuusi auringonsäteily vaakapinnalle (ka.)	Tuulen nopeus (ka.)	Vuoden sademäärä
	$T_e$ [°C]	$RH_e$ [%]	$R_{dir}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$R_{dif}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$v_{wind}$ [m/s]	$r$ [mm]
Vantaa 2007	6.5	79.8	63.7	46.8	4.4	755.3
Vantaa 2050	8.5	80.3	62.9	46.6	4.4	830.8
Vantaa 2100	11.4	81.1	61.2	46.1	4.5	945.1

Merkintöjen selitykset:

Tunnus	Selitys	Yksikkö
NAME	Nimi	
FLAGS	Erytisominaisuudet	
RHO	Tiheys	kg/m <sup>3</sup>
CE	Ominaislämpökapasiteetti	J/(kg·K)
THETA_POR	Huokoisuus	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_EFF	Kosteuspitoisuus vesiupotuksessa	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_CAP	Kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_80	Kosteuspitoisuus 80 % RH suhteellisessa kosteudessa	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
LAMBDA	Lämmönjohtavuus	W/(m·K)
AW	Vedenimeytymiskerroin	kg/(m <sup>2</sup> ·s <sup>0.5</sup> )
MEW	Diffusiovastuskerroin	-
KLEFF	Kosteudenjohtavuus vesiupotusta vastaavassa kosteuspitoisuudessa	s
KG	Ilmanläpäisevyys	s
pC	Veden huokosalipaineen kymmenkantainen logaritmi	lg(Pa)
THETA_I	Kosteuspitoisuus	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
lgKl	Kosteudenjohtavuuden kymmenkantainen logaritmi	lg(s)

Lähde:
FRAME-loppuraportti
Delphin materiaalikirjasto
Muu lähde

NAME	A1 Gypsum board
FLAGS	
RHO	774 kg/m <sup>3</sup>
CE	1100 J/(kg·K)
THETA_POR	0,604 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_EFF	0,604 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_CAP	0,5 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_80	0,01 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
LAMBDA	0,19 W/(m·K)
AW	0,076 kg/(m <sup>2</sup> ·s <sup>0.5</sup> )
MEW	7,9 -
KLEFF	1,00E-09 s
KG	2,20E-07 s

A1 Gypsum board			
THETA_I	pC	THETA_I	IgKl
0,604	0	0	-21
0,60399209	0,01	0,00604	-20,2249
0,60398427	0,11	0,01208	-19,3396
0,60397088	0,21	0,01812	-18,6288
0,60395666	0,31	0,02416	-18,0158
0,60393325	0,41	0,0302	-17,4744
0,60390849	0,51	0,03624	-16,9915
0,6038689	0,61	0,04228	-16,5587
0,6038272	0,71	0,04832	-16,1703
0,6037624	0,81	0,05436	-15,8215
0,60369444	0,91	0,0604	-15,5084
0,60359182	1,01	0,06644	-15,2279
0,60348464	1,11	0,07248	-14,9768
0,60332739	1,21	0,07852	-14,7526
0,60316381	1,31	0,08456	-14,5528
0,60293065	1,41	0,0906	-14,375
0,60268905	1,51	0,09664	-14,2173
0,60235453	1,61	0,10268	-14,0777
0,60200916	1,71	0,10872	-13,9543
0,60154457	1,81	0,11476	-13,8455
0,60106662	1,91	0,1208	-13,7497
0,60044171	2,01	0,12684	-13,6654
0,59980094	2,11	0,13288	-13,5912
0,59898571	2,21	0,13892	-13,5258
0,59815219	2,31	0,14496	-13,4681
0,59711755	2,41	0,151	-13,4169
0,59606202	2,51	0,15704	-13,3712
0,59477665	2,61	0,16308	-13,3301
0,59346669	2,71	0,16912	-13,2926
0,59188593	2,81	0,17516	-13,258
0,59027372	2,91	0,1812	-13,2255
0,58831524	3,01	0,18724	-13,1944
0,58631187	3,11	0,19328	-13,1642
0,58381468	3,21	0,19932	-13,1342
0,58124813	3,31	0,20536	-13,1041
0,5779183	3,41	0,2114	-13,0733
0,57447926	3,51	0,21744	-13,0415
0,56983839	3,61	0,22348	-13,0084
0,56503165	3,71	0,22952	-12,9736
0,55839973	3,81	0,23556	-12,937
0,55153315	3,91	0,2416	-12,8984
0,54208469	4,01	0,24764	-12,8575
0,5323335	4,11	0,25368	-12,8143

A1 Gypsum board			
THETA_I	pC	THETA_I	IgKl
0,51925151	4,21	0,25972	-12,7688
0,50581904	4,31	0,26576	-12,7208
0,48853011	4,41	0,2718	-12,6704
0,47088373	4,51	0,27784	-12,6176
0,44930423	4,61	0,28388	-12,5625
0,42741411	4,71	0,28992	-12,5051
0,40210622	4,81	0,29596	-12,4455
0,37658721	4,91	0,302	-12,3839
0,34874511	5,01	0,30804	-12,3204
0,32082796	5,11	0,31408	-12,2552
0,2920851	5,21	0,32012	-12,1884
0,26341464	5,31	0,32616	-12,1203
0,23554087	5,41	0,3322	-12,0509
0,20787247	5,51	0,33824	-11,9807
0,18246373	5,61	0,34428	-11,9096
0,15735898	5,71	0,35032	-11,8381
0,13559914	5,81	0,35636	-11,7662
0,1141965	5,91	0,3624	-11,6943
0,09672441	6,01	0,36844	-11,6225
0,07961522	6,11	0,37448	-11,551
0,06649916	6,21	0,38052	-11,4801
0,05371039	6,31	0,38656	-11,41
0,04452285	6,41	0,3926	-11,3407
0,03559892	6,51	0,39864	-11,2726
0,02957578	6,61	0,40468	-11,2057
0,0238	6,61940204	0,41072	-11,1403
0,0182	6,99644471	0,41676	-11,0763
0,0114	7,40596524	0,4228	-11,014
0,00965	7,59459624	0,42884	-10,9534
0,00825	7,91226623	0,43488	-10,8945
0,00615	8,18048285	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

NAME	A4 Glass wool board + weather membrane
FLAGS	WATER_TIGHT
RHO	104 kg/m <sup>3</sup>
CE	850 J/(kg·K)
THETA_POR	0,9 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_EFF	0,9 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_CAP	0,003 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_80	0,0017 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
LAMBDA	0,031 W/(m·K)
AW	- kg/(m <sup>2</sup> ·s <sup>0.5</sup> )
MEW	1,8 -
KLEFF	- s
KG	3,00E-06 s

A4 Glass wool board + weather membrane	
THETA_I	pC
0,9	0
0,89998377	3,2
0,89996893	3,3
0,89991241	3,4
0,89984026	3,5
0,89959595	3,6
0,89929758	3,7
0,89840411	3,8
0,89735476	3,9
0,8945901	4
0,89145273	4,1
0,88421441	4,2
0,87624323	4,3
0,86020794	4,4
0,84300433	4,5
0,81294537	4,6
0,78141837	4,7
0,73373801	4,8
0,68469804	4,9
0,62069784	5
0,55597328	5,1
0,4832783	5,2
0,41081838	5,3
0,3409451	5,4
0,2721582	5,5
0,21532517	5,6
0,15996803	5,7
0,12085066	5,8
0,0830941	5,9
0,06031108	6
0,03849067	6,1
0,02726228	6,2
0,01657922	6,3
0,01189652	6,4
0,00746606	6,5
0,00581111	6,6
0,00542411	6,6149802
0,00472098	6,99202287
0,00170759	7,40154341
0,0010346	7,5901744
0,00089397	7,90784439
0,00078348	8,17606101
0	10

NAME	C1 Gypsum board
FLAGS	
RHO	574 kg/m <sup>3</sup>
CE	1100 J/(kg·K)
THETA_POR	0,77 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_EFF	0,77 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_CAP	0,5 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_80	0,013655 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
LAMBDA	0,19 W/(m·K)
AW	0,076 kg/(m <sup>2</sup> ·s <sup>0.5</sup> )
MEW	6,9 -
KLEFF	1,00E-09 s
KG	3,50E-09 s

C1 Gypsum board			
THETA_I	pC	THETA_I	lgKl
0,77	0	0	-21
0,76998991	0,0178044	0,0077	-20,2249
0,76997995	0,114555	0,0154	-19,3396
0,76996288	0,214288	0,0231	-18,6288
0,76994474	0,312606	0,0308	-18,0158
0,76991491	0,412464	0,0385	-17,4744
0,76988335	0,51254	0,0462	-16,9915
0,76983287	0,611463	0,0539	-16,5587
0,76977971	0,71	0,0616	-16,1703
0,7696971	0,81	0,0693	-15,8215
0,76961046	0,91	0,077	-15,5084
0,76947963	1,01	0,0847	-15,2279
0,76934301	1,11	0,0924	-14,9768
0,76914253	1,21	0,1001	-14,7526
0,768934	1,31	0,1078	-14,5528
0,76863676	1,41	0,1155	-14,375
0,76832876	1,51	0,1232	-14,2173
0,7679023	1,61	0,1309	-14,0777
0,76746201	1,71	0,1386	-13,9543
0,76686973	1,81	0,1463	-13,8455
0,76626043	1,91	0,154	-13,7497
0,76546377	2,01	0,1617	-13,6654
0,7646469	2,11	0,1694	-13,5912
0,76360761	2,21	0,1771	-13,5258
0,76254501	2,31	0,1848	-13,4681
0,76122601	2,41	0,1925	-13,4169
0,75988038	2,51	0,2002	-13,3712
0,75824176	2,61	0,2079	-13,3301
0,75657177	2,71	0,2156	-13,2926
0,75455657	2,81	0,2233	-13,258
0,75250126	2,91	0,231	-13,2255
0,75000452	3,01	0,2387	-13,1944
0,74745057	3,11	0,2464	-13,1642
0,74426706	3,21	0,2541	-13,1342
0,74099513	3,31	0,2618	-13,1041
0,73675015	3,41	0,2695	-13,0733
0,73236594	3,51	0,2772	-13,0415
0,72644961	3,61	0,2849	-13,0084
0,72032181	3,71	0,2926	-12,9736
0,7118672	3,81	0,3003	-12,937
0,70311346	3,91	0,308	-12,8984
0,69106822	4,01	0,3157	-12,8575
0,67863708	4,11	0,3234	-12,8143

C1 Gypsum board			
THETA_I	pC	THETA_I	lgKl
0,66195971	4,21	0,3311	-12,7688
0,64483553	4,31	0,3388	-12,7208
0,62279501	4,41	0,3465	-12,6704
0,6002988	4,51	0,3542	-12,6176
0,5727885	4,61	0,3619	-12,5625
0,54488222	4,71	0,3696	-12,5051
0,51261885	4,81	0,3773	-12,4455
0,48008634	4,91	0,385	-12,3839
0,44459227	5,01	0,3927	-12,3204
0,40900253	5,11	0,4004	-12,2552
0,37236014	5,21	0,4081	-12,1884
0,33581005	5,31	0,4158	-12,1203
0,30027561	5,41	0,4235	-12,0509
0,26500298	5,51	0,4312	-11,9807
0,23261105	5,61	0,4389	-11,9096
0,20060665	5,71	0,4466	-11,8381
0,17286645	5,81	0,4543	-11,7662
0,14558163	5,91	0,462	-11,6943
0,12330761	6,01	0,4697	-11,6225
0,10149623	6,11	0,4774	-11,551
0,08477542	6,21	0,4851	-11,4801
0,06847186	6,31	0,4928	-11,41
0,05675926	6,41	0,5005	-11,3407
0,04538273	6,51	0,5082	-11,2726
0,03770422	6,61	0,5159	-11,2057
0,03034106	6,61940204	0,5236	-11,1403
0,02320199	6,99644471	0,5313	-11,0763
0,01453311	7,40596524	0,539	-11,014
0,01230215	7,59459624	0,5467	-10,9534
0,01051738	7,91226623	0,5544	-10,8945
0,00784023	8,18048285	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

NAME	C11 Plastic film 0.2 mm
FLAGS	AIR_TIGHT, WATER_TIGHT
RHO	980 kg/m <sup>3</sup>
CE	2300 J/(kg·K)
THETA_POR	0,001 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_EFF	0,001 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_CAP	0,0001 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_80	3,87E-05 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
LAMBDA	0,15 W/(m·K)
AW	- kg/(m <sup>2</sup> ·s <sup>0.5</sup> )
MEW	89000 -
KLEFF	- s
KG	- s

C11 Plastic film 0.2 mm	
THETA_I	pC
7,07E-05	8,4
5,2616E-05	8,5
3,5183E-05	8,6
2,5018E-05	8,7
1,5293E-05	8,8
1,0416E-05	8,9
5,7792E-06	9
3,7813E-06	9,1
1,8917E-06	9,2
1,1928E-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_I	pC
0,001	0
0,00099998	4,2
0,00099994	4,3
0,00099989	4,4
0,00099973	4,5
0,00099953	4,6
0,00099898	4,7
0,00099833	4,8
0,0009967	4,9
0,00099485	5
0,00099073	5,1
0,00098621	5,2
0,00097733	5,3
0,00096784	5,4
0,00095153	5,5
0,00093444	5,6
0,00090885	5,7
0,00088253	5,8
0,00084821	5,9
0,00081348	6
0,00077416	6,1
0,00073489	6,2
0,00069624	6,3
0,00065807	6,4
0,00062509	6,5
0,00059275	6,6
0,00056729	6,7
0,00054227	6,8
0,00052221	6,9
0,00050218	7
0,00048266	7,1
0,00046277	7,2
0,00043868	7,3
0,00041398	7,4
0,00038251	7,5
0,00035051	7,6
0,00031267	7,7
0,00027469	7,8
0,00023502	7,9
0,00019568	8
0,00015997	8,1
0,00012493	8,2
9,743E-05	8,3

NAME	C13 Pine across grain
FLAGS	
RHO	532 kg/m <sup>3</sup>
CE	2000 J/(kg·K)
THETA_POR	0,7 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_EFF	0,67 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_CAP	0,55 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_80	0,09 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
LAMBDA	0,12 W/(m·K)
AW	0,004 kg/(m <sup>2</sup> ·s <sup>0.5</sup> )
MEW	84 -
KLEFF	3,00E-13 s
KG	1,00E-12 s

C13 Pine across grain			
THETA_I	pC	THETA_I	lgKl
0,66999747	0	0	-22,5229
0,66996717	1,11	0,0067	-20,9486
0,66993596	1,21	0,0134	-20,2327
0,6698947	1,31	0,0201	-19,5899
0,66985235	1,41	0,0268	-19,0165
0,66979808	1,51	0,0335	-18,5082
0,66974248	1,61	0,0402	-18,0612
0,66967234	1,71	0,0469	-17,6715
0,66960063	1,81	0,0536	-17,335
0,66951159	1,91	0,0603	-17,0477
0,66942072	2,01	0,067	-16,8057
0,66930967	2,11	0,0737	-16,6049
0,66919654	2,21	0,0804	-16,4413
0,66906049	2,31	0,0871	-16,3109
0,66892212	2,41	0,0938	-16,2098
0,66875835	2,51	0,1005	-16,1338
0,66859209	2,61	0,1072	-16,0791
0,66839843	2,71	0,1139	-16,0416
0,66820217	2,81	0,1206	-16,0173
0,6679772	2,91	0,1273	-16,0022
0,66774958	3,01	0,134	-15,9923
0,66749279	3,11	0,1407	-15,9836
0,6672334	3,21	0,1474	-15,9721
0,6669452	3,31	0,1541	-15,9537
0,66665437	3,41	0,1608	-15,9246
0,66633468	3,51	0,1675	-15,8806
0,66601166	3,61	0,1742	-15,8179
0,66565212	3,71	0,1809	-15,7945
0,66528508	3,81	0,1876	-15,7712
0,66483551	3,91	0,1943	-15,7478
0,66436162	4,01	0,201	-15,7244
0,66362025	4,11	0,2077	-15,7011
0,66280305	4,21	0,2144	-15,6777
0,66115144	4,31	0,2211	-15,6544
0,6593021	4,41	0,2278	-15,631
0,6552772	4,51	0,2345	-15,6077
0,65083783	4,61	0,2412	-15,5843
0,64183798	4,71	0,2479	-15,561
0,63215584	4,81	0,2546	-15,5376
0,61496633	4,91	0,2613	-15,5143
0,59692715	5,01	0,268	-15,4909
0,56953855	5,11	0,2747	-15,4676
0,54142226	5,21	0,2814	-15,4442

C13 Pine across grain			
THETA_I	pC	THETA_I	lgKl
0,50529885	5,31	0,2881	-15,4209
0,46890745	5,41	0,2948	-15,3975
0,42956724	5,51	0,3015	-15,3742
0,39055765	5,61	0,3082	-15,3508
0,35518596	5,71	0,3149	-15,3275
0,3205631	5,81	0,3216	-15,3041
0,2941798	5,91	0,3283	-15,2808
0,26857615	6,01	0,335	-15,2574
0,25155123	6,11	0,3417	-15,2341
0,23495219	6,21	0,3484	-15,2107
0,22303918	6,31	0,3551	-15,1874
0,21110235	6,41	0,3618	-15,164
0,19890344	6,51	0,3685	-15,1407
0,18664794	6,61	0,3752	-15,1173
0,185	6,6149802	0,3819	-15,094
0,169	6,99202287	0,3886	-15,0706
0,10805	7,40154341	0,3953	-15,0473
0,0801	7,5901744	0,402	-15,0239
0,04495	7,90784439	0,4087	-14,9872
0,0323	8,17606101	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



NAME	D1 Mineral wool
FLAGS	WATER_TIGHT
RHO	22 kg/m <sup>3</sup>
CE	850 J/(kg·K)
THETA_POR	0,98 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_EFF	0,98 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_CAP	0,003 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_80	1,00E-03 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
LAMBDA	0,035 W/(m·K)
AW	0 kg/(m <sup>2</sup> ·s <sup>0.5</sup> )
MEW	1,2 -
KLEFF	- s
KG	2,70E-04 s

D1 Mineral wool	
THETA_I	RH
0	0
0,00045	0,33
0,00054	0,55
0,00066	0,65
0,00078	0,75
0,00098	0,8
0,001	0,83
0,0013	0,86
0,0019	0,93
0,0024	0,97
0,98	1

NAME	Bitumen impregnated - wood fibre board
FLAGS	
RHO	280 kg/m <sup>3</sup>
CE	1500 J/(kg·K)
THETA_POR	0,85 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_EFF	0,65 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_CAP	0,14 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_80	0,035 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
LAMBDA	0,052 W/(m·K)
AW	0,005 kg/(m <sup>2</sup> ·s <sup>0.5</sup> )
MEW	13 -
KLEFF	2,00E-12 s
KG	1,20E-07 s

Bitumen impregnated - wood fibre board			
THETA_I	pC	THETA_I	lgKl
0,0402	7,40596524	0,2795	-13,6564
0,02815	7,59459624	0,286	-13,5621
0,02005	7,91226623	0,2925	-13,4721
0,01225	8,18048285	0,299	-13,3863
0	10	0,3055	-13,3047
		0,312	-13,2271
		0,3185	-13,1534
		0,325	-13,0834
		0,3315	-13,017
		0,338	-12,9542
		0,3445	-12,8947
		0,351	-12,8386
		0,3575	-12,7855
		0,364	-12,7355
		0,3705	-12,6884
		0,377	-12,6441
		0,3835	-12,6024
		0,39	-12,5633
		0,3965	-12,5266
		0,403	-12,4922
		0,4095	-12,46
		0,416	-12,4299
		0,4225	-12,4017
		0,429	-12,3754
		0,4355	-12,3507
		0,442	-12,3277
		0,4485	-12,3061
		0,455	-12,2859
		0,4615	-12,2669
		0,468	-12,249
		0,4745	-12,2322
		0,481	-12,2162
		0,4875	-12,201
		0,494	-12,1865
		0,5005	-12,1726
		0,507	-12,159
		0,5135	-12,1458
		0,52	-12,1327
		0,5265	-12,1198
		0,533	-12,1068
		0,5395	-12,0937
		0,546	-12,0803
		0,5525	-12,0665
		0,559	-12,0523
		0,5655	-12,0375
		0,572	-12,0219
		0,5785	-12,0055
		0,585	-11,9882
		0,5915	-11,9699
		0,598	-11,9504
		0,6045	-11,9296
		0,611	-11,9074
		0,6175	-11,8837
		0,624	-11,8584
		0,6305	-11,8314
		0,637	-11,8026
		0,6435	-11,7718
		0,65	-11,699

Bitumen impregnated - wood fibre board			
THETA_I	pC	THETA_I	lgKl
0,65	0	0	-20,199
0,64998536	2,71	0,0065	-19,7513
0,64994869	2,81	0,013	-18,9803
0,64988766	2,91	0,0195	-18,4556
0,64955866	3,01	0,026	-18,0825
0,64907818	3,11	0,0325	-17,8175
0,64693108	3,21	0,039	-17,6296
0,64418554	3,31	0,0455	-17,4927
0,63485514	3,41	0,052	-17,383
0,62408982	3,51	0,0585	-17,2776
0,59753548	3,61	0,065	-17,1545
0,56908207	3,71	0,0715	-16,9922
0,51973263	3,81	0,078	-16,9471
0,46950187	3,91	0,0845	-16,8466
0,40957367	4,01	0,091	-16,7422
0,35065722	4,11	0,0975	-16,6435
0,30287359	4,21	0,104	-16,547
0,2569398	4,31	0,1105	-16,4523
0,23136049	4,41	0,117	-16,3594
0,20705363	4,51	0,1235	-16,268
0,19674796	4,61	0,13	-16,178
0,18689195	4,71	0,1365	-16,0893
0,18198379	4,81	0,143	-16,0019
0,17711747	4,91	0,1495	-15,9155
0,1727116	5,01	0,156	-15,8303
0,16824157	5,11	0,1625	-15,746
0,16306573	5,21	0,169	-15,6626
0,15782064	5,31	0,1755	-15,5802
0,15181366	5,41	0,182	-15,4986
0,14575857	5,51	0,1885	-15,4178
0,13917411	5,61	0,195	-15,3378
0,13257193	5,71	0,2015	-15,1752
0,1257747	5,81	0,208	-15,0185
0,11899239	5,91	0,2145	-14,8678
0,11237419	6,01	0,221	-14,7229
0,10579944	6,11	0,2275	-14,5836
0,09970277	6,21	0,234	-14,4498
0,09366883	6,31	0,2405	-14,3213
0,08832506	6,41	0,247	-14,1981
0,08305146	6,51	0,2535	-14,0801
0,07855012	6,61	0,26	-13,967
0,0748	6,61940204	0,2665	-13,8588
0,0648	6,99644471	0,273	-13,7553

NAME	Polystyrene board - expanded
FLAGS	AIR_TIGHT, WATER_TIGHT
RHO	23 kg/m <sup>3</sup>
CE	1500 J/(kg·K)
THETA_POR	0,93 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_EFF	0,92 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_CAP	- m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_80	0,006 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
LAMBDA	0,036 W/(m·K)
AW	1,00E-05 kg/(m <sup>2</sup> ·s <sup>0.5</sup> )
MEW	96 -
KLEFF	- s
KG	- s

Polystyrene board - expanded	
THETA_I	pC
0,92	0
0,91996875	0,3
0,9199541	0,4
0,91993135	0,5
0,91990749	0,6
0,91987147	0,7
0,91983383	0,8
0,91977863	0,9
0,91972119	1
0,91963935	1,1
0,91955454	1,2
0,91943713	1,3
0,91931592	1,4
0,91915295	1,5
0,91898533	1,6
0,91876648	1,7
0,91854217	1,8
0,91825779	1,9
0,91796732	2
0,91760978	2,1
0,9172458	2,2
0,91681086	2,3
0,91636951	2,4
0,91585757	2,5
0,91533971	2,6
0,91475668	2,7
0,9141687	2,8
0,91352625	2,9
0,91288024	3
0,91219524	3,1
0,91150844	3,2
0,91080171	3,3
0,91009504	3,4
0,90938902	3,5
0,90868466	3,6
0,90799856	3,7
0,90731411	3,8
0,9066479	3,9
0,90597679	4
0,90525177	4,1
0,90449303	4,2
0,90336352	4,3
0,90211129	4,4

Polystyrene board - expanded	
THETA_I	pC
0,89950872	4,5
0,89657062	4,6
0,8899406	4,7
0,8825863	4,8
0,86726243	4,9
0,8507044	5
0,82056668	5,1
0,78881044	5,2
0,73924502	5,3
0,68815754	5,4
0,62032202	5,5
0,55171099	5,6
0,47456682	5,7
0,39777932	5,8
0,32491633	5,9
0,25336245	6
0,19621333	6,1
0,14072406	6,2
0,10349861	6,3
0,06769607	6,4
0,04755034	6,5
0,02832709	6,6
0,01925451	6,7
0,01065275	6,8
0,0072318	6,9
0,00400355	7
0,00289587	7,1
0,00185201	7,2
0,00151058	7,3
0,00118638	7,4
0,00105159	7,5
0,00092072	7,6
0,00083293	7,7
0,00074618	7,8
0,00067078	7,9
0,00059607	8
0,0005289	8,1
0,0004625	8,2
0,00040466	8,3
0,00034768	8,4
0,00030015	8,5
0,00025348	8,6
0,00021628	8,7
0,00017988	8,8
0,00015216	8,9
0,00012512	9
0,00010546	9,1
8,6333E-05	9,2
7,3057E-05	9,3
0	10

NAME	Polystyrene board - extruded
FLAGS	AIR_TIGHT, WATER_TIGHT
RHO	40 kg/m <sup>3</sup>
CE	1500 J/(kg·K)
THETA_POR	0,951 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_EFF	0,95 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_CAP	- m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_80	1,00E-05 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
LAMBDA	0,03 W/(m·K)
AW	8,00E-06 kg/(m <sup>2</sup> ·s <sup>0.5</sup> )
MEW	150 -
KLEFF	- s
KG	- s

Polystyrene board - extruded	
THETA_I	pC
0,95	0
0,94996773	0,3
0,9499526	0,4
0,94992911	0,5
0,94990448	0,6
0,94986728	0,7
0,94982841	0,8
0,94977141	0,9
0,9497121	1
0,94962759	1,1
0,94954001	1,2
0,94941877	1,3
0,94929361	1,4
0,94912533	1,5
0,94895225	1,6
0,94872626	1,7
0,94849463	1,8
0,94820098	1,9
0,94790103	2
0,94753184	2,1
0,94715599	2,2
0,94670686	2,3
0,94625112	2,4
0,94572249	2,5
0,94518775	2,6
0,9445857	2,7
0,94397855	2,8
0,94331514	2,9
0,94264807	3
0,94194074	3,1
0,94123154	3,2
0,94050177	3,3
0,93977205	3,4
0,93904301	3,5
0,93831568	3,6
0,93760721	3,7
0,93690044	3,8
0,93621251	3,9
0,93551951	4
0,93477084	4,1
0,93398737	4,2
0,93282103	4,3
0,93152796	4,4

Polystyrene board - extruded	
THETA_I	pC
0,92884053	4,5
0,92580662	4,6
0,9189604	4,7
0,91136628	4,8
0,89554272	4,9
0,87844477	5
0,84732429	5,1
0,81453252	5,2
0,76335084	5,3
0,71059746	5,4
0,64054991	5,5
0,56970157	5,6
0,49004183	5,7
0,41075039	5,8
0,33551142	5,9
0,26162427	6
0,20261159	6,1
0,14531288	6,2
0,10687357	6,3
0,06990356	6,4
0,04910089	6,5
0,0292508	6,6
0,01988237	6,7
0,01100013	6,8
0,00746762	6,9
0,00413411	7
0,0029903	7,1
0,0019124	7,2
0,00155984	7,3
0,00122506	7,4
0,00108588	7,5
0,00095074	7,6
0,00086009	7,7
0,00077052	7,8
0,00069265	7,9
0,00061551	8
0,00054615	8,1
0,00047758	8,2
0,00041786	8,3
0,00035901	8,4
0,00030994	8,5
0,00026174	8,6
0,00022334	8,7
0,00018574	8,8
0,00015712	8,9
0,0001292	9
0,0001089	9,1
8,9148E-05	9,2
7,544E-05	9,3
0	10

NAME	Polyurethane foam
FLAGS	AIR_TIGHT, WATER_TIGHT
RHO	45 kg/m <sup>3</sup>
CE	1500 J/(kg·K)
THETA_POR	0,92 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_EFF	0,92 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_CAP	- m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_80	1,00E-03 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
LAMBDA	0,029 W/(m·K)
AW	1,00E-04 kg/(m <sup>2</sup> ·s <sup>0.5</sup> )
MEW	104 -
KLEFF	- s
KG	- s

Polyurethane foam	
THETA_I	pC
0,92	0
0,91996875	0,3
0,9199541	0,4
0,91993135	0,5
0,91990749	0,6
0,91987147	0,7
0,91983383	0,8
0,91977863	0,9
0,91972119	1
0,91963935	1,1
0,91955454	1,2
0,91943713	1,3
0,91931592	1,4
0,91915295	1,5
0,91898533	1,6
0,91876648	1,7
0,91854217	1,8
0,91825779	1,9
0,91796732	2
0,91760978	2,1
0,9172458	2,2
0,91681086	2,3
0,91636951	2,4
0,91585757	2,5
0,91533971	2,6
0,91475668	2,7
0,9141687	2,8
0,91352625	2,9
0,91288024	3
0,91219524	3,1
0,91150844	3,2
0,91080171	3,3
0,91009504	3,4
0,90938902	3,5
0,90868466	3,6
0,90799856	3,7
0,90731411	3,8
0,9066479	3,9
0,90597679	4
0,90525177	4,1
0,90449303	4,2
0,90336352	4,3
0,90211129	4,4

Polyurethane foam	
THETA_I	pC
0,89950872	4,5
0,89657062	4,6
0,8899406	4,7
0,8825863	4,8
0,86726243	4,9
0,8507044	5
0,82056668	5,1
0,78881044	5,2
0,73924502	5,3
0,68815754	5,4
0,62032202	5,5
0,55171099	5,6
0,47456682	5,7
0,39777932	5,8
0,32491633	5,9
0,25336245	6
0,19621333	6,1
0,14072406	6,2
0,10349861	6,3
0,06769607	6,4
0,04755034	6,5
0,02832709	6,6
0,01925451	6,7
0,01065275	6,8
0,0072318	6,9
0,00400355	7
0,00289587	7,1
0,00185201	7,2
0,00151058	7,3
0,00118638	7,4
0,00105159	7,5
0,00092072	7,6
0,00083293	7,7
0,00074618	7,8
0,00067078	7,9
0,00059607	8
0,0005289	8,1
0,0004625	8,2
0,00040466	8,3
0,00034768	8,4
0,00030015	8,5
0,00025348	8,6
0,00021628	8,7
0,00017988	8,8
0,00015216	8,9
0,00012512	9
0,00010546	9,1
8,6333E-05	9,2
7,3057E-05	9,3
0	10

NAME	PVC foam
FLAGS	AIR_TIGHT, WATER_TIGHT
RHO	40 kg/m <sup>3</sup>
CE	1500 J/(kg·K)
THETA_POR	0,945 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_EFF	0,945 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_CAP	- m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_80	0,001 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
LAMBDA	0,036 W/(m·K)
AW	1,00E-06 kg/(m <sup>2</sup> ·s <sup>0.5</sup> )
MEW	175 -
KLEFF	- s
KG	- s

PVC foam	
THETA_I	pC
0,92395189	4,5
0,92093395	4,6
0,91412377	4,7
0,90656962	4,8
0,89082934	4,9
0,87382137	5
0,84286468	5,1
0,8102455	5,2
0,7593332	5,3
0,70685748	5,4
0,63717859	5,5
0,56670314	5,6
0,48746266	5,7
0,40858854	5,8
0,33374557	5,9
0,2602473	6
0,20154522	6,1
0,14454808	6,2
0,10631107	6,3
0,06953564	6,4
0,04884247	6,5
0,02909685	6,6
0,01977773	6,7
0,01094223	6,8
0,00742831	6,9
0,00411235	7
0,00297456	7,1
0,00190233	7,2
0,00155163	7,3
0,00121862	7,4
0,00108016	7,5
0,00094574	7,6
0,00085557	7,7
0,00076646	7,8
0,00068901	7,9
0,00061227	8
0,00054327	8,1
0,00047507	8,2
0,00041566	8,3
0,00035712	8,4
0,00030831	8,5
0,00026037	8,6
0,00022216	8,7
0,00018477	8,8
0,00015629	8,9
0,00012852	9
0,00010833	9,1
8,8679E-05	9,2
7,5042E-05	9,3
0	10

PVC foam	
THETA_I	pC
0,945	0
0,9449679	0,3
0,94495285	0,4
0,94492948	0,5
0,94490498	0,6
0,94486797	0,7
0,94482931	0,8
0,94477261	0,9
0,94471362	1
0,94462955	1,1
0,94454243	1,2
0,94442183	1,3
0,94429733	1,4
0,94412993	1,5
0,94395776	1,6
0,94373296	1,7
0,94350255	1,8
0,94321044	1,9
0,94291208	2
0,94254483	2,1
0,94217095	2,2
0,9417242	2,3
0,94127085	2,4
0,94074501	2,5
0,94021307	2,6
0,9396142	2,7
0,93901024	2,8
0,93835033	2,9
0,93768677	3
0,93698316	3,1
0,93627769	3,2
0,93555176	3,3
0,93482588	3,4
0,93410068	3,5
0,93337718	3,6
0,93267244	3,7
0,93196939	3,8
0,93128507	3,9
0,93059572	4
0,929851	4,1
0,92907165	4,2
0,92791144	4,3
0,92662518	4,4

NAME	Bitumen
FLAGS	AIR_TIGHT, WATER_TIGHT
RHO	1200 kg/m <sup>3</sup>
CE	1500 J/(kg·K)
THETA_POR	0,0026 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_EFF	0,0025 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_CAP	0,0025 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_80	1,37E-05 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
LAMBDA	0,145 W/(m·K)
AW	1,00E-10 kg/(m <sup>2</sup> ·s <sup>0.5</sup> )
MEW	15000 -
KLEFF	- s
KG	- s

Bitumen	
THETA_I	pC
5,2095E-07	8,3
3,6348E-07	8,4
2,686E-07	8,5
1,7733E-07	8,6
1,2585E-07	8,7
0	10

Bitumen	
THETA_I	pC
0,0025	0
0,00249994	4,1
0,00249988	4,2
0,00249968	4,3
0,00249944	4,4
0,00249864	4,5
0,00249767	4,6
0,0024949	4,7
0,00249168	4,8
0,00248351	4,9
0,0024743	5
0,00245369	5,1
0,00243111	5,2
0,00238678	5,3
0,00233935	5,4
0,00225789	5,5
0,00217255	5,6
0,00204472	5,7
0,00191326	5,8
0,00174197	5,9
0,00156861	6
0,00137261	6,1
0,00117697	6,2
0,00098544	6,3
0,00079655	6,4
0,00063673	6,5
0,00048073	6,6
0,00036684	6,7
0,00025666	6,8
0,00018733	6,9
0,00012078	7
8,4707E-05	7,1
5,0305E-05	7,2
3,4225E-05	7,3
1,8968E-05	7,4
1,2764E-05	7,5
6,8984E-06	7,6
4,7533E-06	7,7
2,7253E-06	7,8
1,9868E-06	7,9
1,2842E-06	8
9,7823E-07	8,1
6,8413E-07	8,2

NAME	Concrete B25
FLAGS	AIR_TIGHT
RHO	2320 kg/m <sup>3</sup>
CE	850 J/(kg·K)
THETA_POR	0,143 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_EFF	0,14299 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_CAP	0,136 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_80	0,0582 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
LAMBDA	2,1 W/(m·K)
AW	0,00833 kg/(m <sup>2</sup> ·s <sup>0.5</sup> )
MEW	110 -
KLEFF	4,40E-11 s
KG	- s

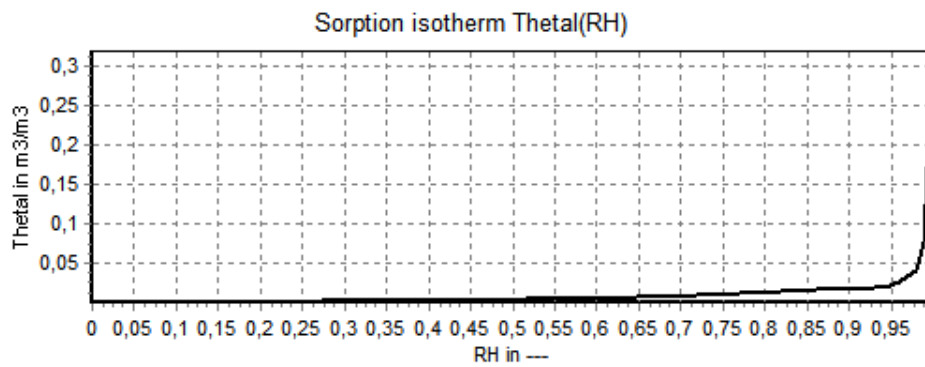
Concrete B25			
THETA_I	pC	THETA_I	lgKl
0,14299	0	0	-30,3564
0,14298375	0,5	0,0014299	-30,3564
0,142981	0,6	0,0028598	-30,3564
0,14297597	0,7	0,0042897	-30,3564
0,14297059	0,8	0,0057196	-30,3564
0,14296126	0,9	0,0071495	-30,3564
0,14295135	1	0,0085794	-30,3564
0,14293508	1,1	0,0100093	-30,3564
0,14291794	1,2	0,0114392	-30,3564
0,14289126	1,3	0,0128691	-30,3564
0,14286338	1,4	0,014299	-30,3564
0,14282226	1,5	0,0157289	-19,8105
0,1427796	1,6	0,0171588	-19,5063
0,14271999	1,7	0,0185887	-19,2701
0,14265858	1,8	0,0200186	-19,0698
0,14257724	1,9	0,0214485	-18,8921
0,14249397	2	0,0228784	-18,7299
0,14238932	2,1	0,0243083	-18,5794
0,14228278	2,2	0,0257382	-18,4377
0,14215542	2,3	0,0271681	-18,3032
0,14202636	2,4	0,028598	-18,1743
0,14187875	2,5	0,0300279	-18,05
0,1417297	2,6	0,0314578	-17,9296
0,1415648	2,7	0,0328877	-17,8122
0,14139852	2,8	0,0343176	-17,6974
0,14121712	2,9	0,0357475	-17,5845
0,14103392	3	0,0371774	-17,4733
0,14083103	3,1	0,0386073	-17,3631
0,14062512	3,2	0,0400372	-17,2539
0,14038608	3,3	0,0414671	-17,1452
0,14014174	3,4	0,042897	-17,0598
0,13983906	3,5	0,0443269	-17,0203
0,1395276	3,6	0,0457568	-16,9782
0,13911958	3,7	0,0471867	-16,9335
0,13869827	3,8	0,0486166	-16,886
0,13813067	3,9	0,0500465	-16,8358
0,13754467	4	0,0514764	-16,7835
0,13675609	4,1	0,0529063	-16,7295
0,13594415	4,2	0,0543362	-16,6735
0,13487511	4,3	0,0557661	-16,6158
0,1337789	4,4	0,057196	-16,5566
0,13238368	4,5	0,0586259	-16,4962
0,13095962	4,6	0,0600558	-16,4344

Concrete B25			
THETA_I	pC	THETA_I	lgKl
0,12921836	4,7	0,0614857	-16,3714
0,12744957	4,8	0,0629156	-16,3073
0,12537784	4,9	0,0643455	-16,2419
0,12328312	5	0,0657754	-16,1753
0,12093555	5,1	0,0672053	-16,1073
0,11857248	5,2	0,0686352	-16,0378
0,11603882	5,3	0,0700651	-15,9667
0,11349905	5,4	0,071495	-15,8938
0,11089214	5,5	0,0729249	-15,8187
0,10828891	5,6	0,0743548	-15,7408
0,10572628	5,7	0,0757847	-15,6596
0,10317562	5,8	0,0772146	-15,5749
0,10075673	5,9	0,0786445	-15,4862
0,0983545	6	0,0800744	-15,3929
0,09613553	6,1	0,0815043	-15,2947
0,09393212	6,2	0,0829342	-15,1886
0,09189992	6,3	0,0843641	-15,0759
0,08987456	6,4	0,085794	-14,957
0,08792434	6,5	0,0872239	-14,8322
0,08596395	6,6	0,0886538	-14,6994
0,08389157	6,7	0,0900837	-14,5628
0,08178579	6,8	0,0915136	-14,4237
0,07931243	6,9	0,0929435	-14,2825
0,07678217	7	0,0943734	-14,1417
0,0736257	7,1	0,0958033	-14,0019
0,07039774	7,2	0,0972332	-13,864
0,06638324	7,3	0,0986631	-13,729
0,06230061	7,4	0,100093	-13,5959
0,05746841	7,5	0,101523	-13,4664
0,05259298	7,6	0,102953	-13,3397
0,04724187	7,7	0,104383	-13,2147
0,04188859	7,8	0,105813	-13,0936
0,03651155	7,9	0,107243	-12,9737
0,03117666	8	0,108672	-12,856
0,02630566	8,1	0,110102	-12,74
0,02151009	8,2	0,111532	-12,625
0,01754442	8,3	0,112962	-12,5116
0,01366775	8,4	0,114392	-12,3984
0,01077054	8,5	0,115822	-12,2858
0,00795658	8,6	0,117252	-12,1731
0,00605869	8,7	0,118682	-12,06
0,00422607	8,8	0,120112	-11,9459
0,00311174	8,9	0,121541	-11,8308
0,0020414	9	0,122971	-11,7133
0,00145511	9,1	0,124401	-11,5941
0,00089464	9,2	0,125831	-11,4704
0,00061825	9,3	0,127261	-11,3441
0,00035516	9,4	0,128691	-11,2099
0,00023842	9,5	0,130121	-11,0713
0,00012773	9,6	0,131551	-10,9192
8,3555E-05	9,7	0,132981	-10,7582
4,1837E-05	9,8	0,134411	-10,6016
2,719E-05	9,9	0,135841	-10,4489
0	10	0,13727	-10,3564
		0,1387	-10,3564
		0,14013	-10,3564
		0,14156	-10,3564
		0,14299	-10,3564

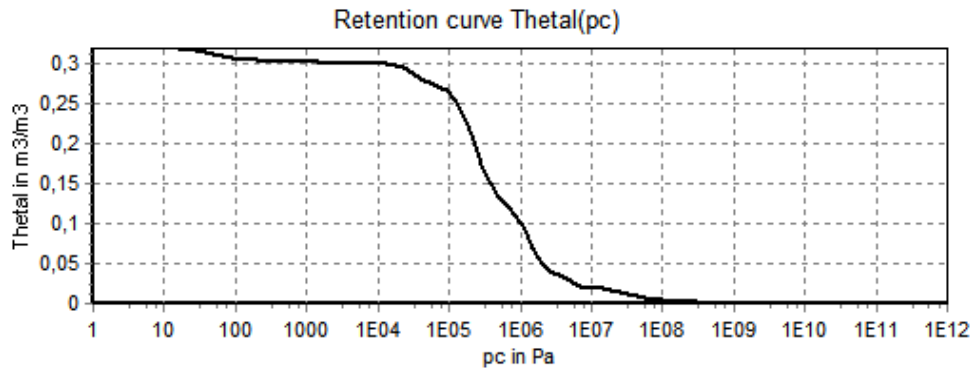


NAME	Normal Brick
FLAGS	AIR_TIGHT
RHO	1786 kg/m <sup>3</sup>
CE	889 J/(kg·K)
THETA_POR	0,3535 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_EFF	0,3194 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_CAP	0,27 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_80	0,01354 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
LAMBDA	0,548 W/(m·K)
AW	0,1987 kg/(m <sup>2</sup> ·s <sup>0.5</sup> )
MEW	18 -
KLEFF	2,04E-09 s
KG	- s

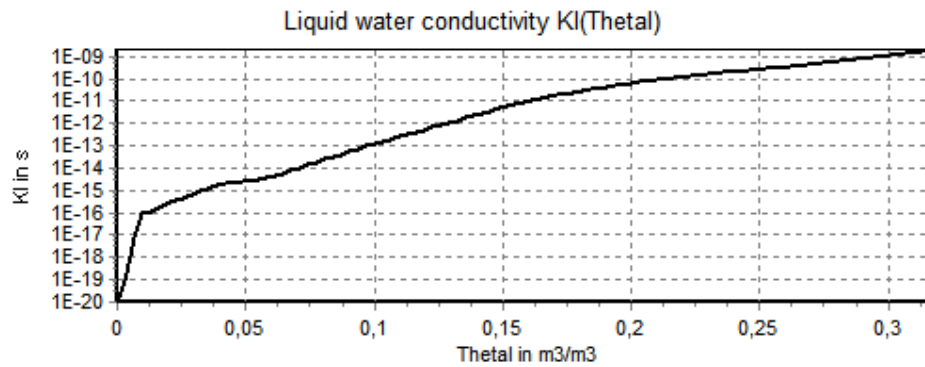
Tiilen tasapainokosteuspitoisuus suhteellisen kosteuden funktiona:



Tiilen tasapainokosteuspitoisuus huokosalipaineen funktiona:



Tiilen kosteudenjohtavuus kosteuspitoisuuden funktiona:



NAME	Sand
FLAGS	AIR_TIGHT
RHO	1513 kg/m <sup>3</sup>
CE	805 J/(kg·K)
THETA_POR	0,43 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_EFF	0,43 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_CAP	- m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_80	0,0011711 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
LAMBDA	1,22 W/(m·K)
AW	1,72 kg/(m <sup>2</sup> ·s <sup>0.7</sup> )
MEW	15 -
KLEFF	- s
KG	- s

Sand			
THETA_I	pC	THETA_I	IgKl
		0,3698	-5,52352
		0,3784	-5,47263
		0,387	-5,42091
		0,3956	-5,36781
		0,4042	-5,31243
		0,4128	-5,2531
		0,4214	-5,18566
		0,43	-5,07522

Sand			
THETA_I	pC	THETA_I	IgKl
0,43	0	0,000043	-20,2428
0,42864135	1,99166901	0,0086	-11,7506
0,42538364	2,19166901	0,0172	-10,639
0,41471633	2,39166901	0,0258	-9,98824
0,38325951	2,59166901	0,0344	-9,52608
0,31247104	2,79166901	0,043	-9,16719
0,2143441	2,99166901	0,0516	-8,87355
0,13423953	3,19166901	0,0602	-8,62491
0,08804989	3,39166901	0,0688	-8,40916
0,0651323	3,59166901	0,0774	-8,2185
0,05432484	3,79166901	0,086	-8,0476
0,04930678	3,99166901	0,0946	-7,89267
0,04698747	4,19166901	0,1032	-7,75089
0,04591695	4,39166901	0,1118	-7,62014
0,04542302	4,59166901	0,1204	-7,49875
0,04519515	4,79166901	0,129	-7,38542
0,04483686	4,99166901	0,1376	-7,27907
0,04427482	5,19166901	0,1462	-7,17884
0,04339844	5,39166901	0,1548	-7,08402
0,04204487	5,59166901	0,1634	-6,99399
0,03998555	5,79166901	0,172	-6,90824
0,03692638	5,99166901	0,1806	-6,82633
0,03255013	6,19166901	0,1892	-6,74789
0,02665177	6,39166901	0,1978	-6,67258
0,01941399	6,59166901	0,2064	-6,60011
0,01174941	6,79166901	0,215	-6,53022
0,00530094	6,99166901	0,2236	-6,46269
0,00150146	7,19166901	0,2322	-6,39732
0,00020335	7,39166901	0,2408	-6,33391
8,5533E-06	7,59166901	0,2494	-6,2723
5,6383E-08	7,79166901	0,258	-6,21233
0	7,99166901	0,2666	-6,15387
		0,2752	-6,09677
		0,2838	-6,04091
		0,2924	-5,98616
		0,301	-5,93242
		0,3096	-5,87956
		0,3182	-5,82747
		0,3268	-5,77602
		0,3354	-5,72509
		0,344	-5,67455
		0,3526	-5,62423
		0,3612	-5,57396

NAME	Gravel
FLAGS	AIR_TIGHT, WATER_TIGHT
RHO	2650 kg/m <sup>3</sup>
CE	1050 J/(kg·K)
THETA_POR	0,24 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_EFF	0,15 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_CAP	0,15 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_80	0,0637327 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
LAMBDA	2,1 W/(m·K)
AW	3,00E-11 kg/(m <sup>2</sup> ·s <sup>0.5</sup> )
MEW	7 -
KLEFF	7,01E-09 s
KG	- s

Gravel	
THETA_I	pC
0,01209152	8,3
0,00831497	8,4
0,00599785	8,5
0,00377624	8,6
0,00260552	8,7
0,00149034	8,8
0,00098635	8,9
0,00050896	9
0,00032414	9,1
0,00014991	9,2
9,2189E-05	9,3
3,7991E-05	9,4
2,2634E-05	9,5
8,2665E-06	9,6
4,788E-06	9,7
0	10

Gravel	
THETA_I	pC
0,15	0
0,1499968	4,1
0,14999445	4,2
0,14998727	4,3
0,1499787	4,4
0,14995489	4,5
0,14992726	4,6
0,14985758	4,7
0,1497787	4,8
0,14959864	4,9
0,14939935	5
0,14898853	5,1
0,14854297	5,2
0,14771531	5,3
0,14683392	5,4
0,14536148	5,5
0,14381893	5,6
0,14150512	5,7
0,13911629	5,8
0,13590204	5,9
0,13262589	6
0,12866845	6,1
0,12467815	6,2
0,12032616	6,3
0,11597296	6,4
0,11160631	6,5
0,10725323	6,6
0,10304941	6,7
0,0988436	6,8
0,09461584	6,9
0,09034511	7
0,08560148	7,1
0,08077457	7,2
0,07503135	7,3
0,06919887	7,4
0,06238425	7,5
0,05552522	7,6
0,04817763	7,7
0,0408648	7,8
0,03393449	7,9
0,02711271	8
0,02148513	8,1
0,01600071	8,2

NAME	Air gap 10 mm (horizontal)
FLAGS	AIR, WATER_TIGHT
RHO	1,3 kg/m <sup>3</sup>
CE	1050 J/(kg·K)
THETA_POR	1 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_EFF	1 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_CAP	- m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_80	1,00E-05 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
LAMBDA	0,067 W/(m·K)
AW*	1,00E-07 kg/(m <sup>2</sup> ·s <sup>0.5</sup> )
MEW	1 -
KLEFF	- s
KG	1,00E-01 s

NAME	Air gap 10 mm (vertical)
FLAGS	AIR, WATER_TIGHT
RHO	1,3 kg/m <sup>3</sup>
CE	1050 J/(kg·K)
THETA_POR	1 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_EFF	1 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_CAP	- m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_80	1,00E-05 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
LAMBDA	0,067 W/(m·K)
AW*	1,00E-07 kg/(m <sup>2</sup> ·s <sup>0.5</sup> )
MEW	1 -
KLEFF	- s
KG	1,00E-01 s

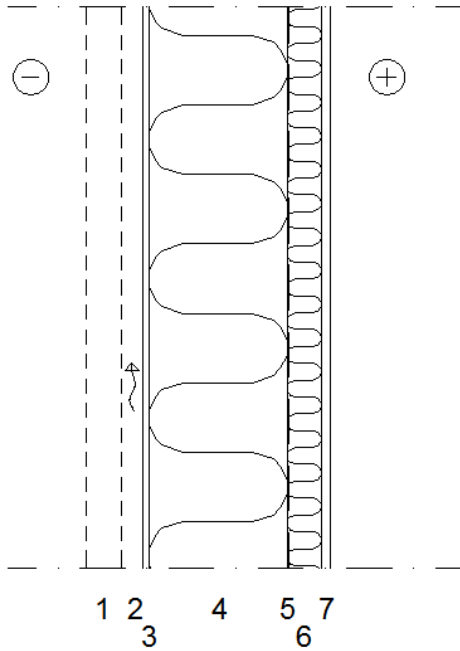
NAME	Air gap 25 mm (vertical)
FLAGS	AIR, WATER_TIGHT
RHO	1,3 kg/m <sup>3</sup>
CE	1050 J/(kg·K)
THETA_POR	1 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_EFF	1 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_CAP	- m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_80	1,00E-05 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
LAMBDA	0,138 W/(m·K)
AW*	1,00E-07 kg/(m <sup>2</sup> ·s <sup>0.5</sup> )
MEW	0,4 -
KLEFF	- s
KG	1,00E-01 s

NAME	Air gap 40 mm (vertical)
FLAGS	AIR, WATER_TIGHT
RHO	1,3 kg/m <sup>3</sup>
CE	1050 J/(kg·K)
THETA_POR	1 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_EFF	1 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_CAP	- m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_80	1,00E-05 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
LAMBDA	0,222 W/(m·K)
AW*	1,00E-07 kg/(m <sup>2</sup> ·s <sup>0.5</sup> )
MEW	0,25 -
KLEFF	- s
KG	1,00E-01 s

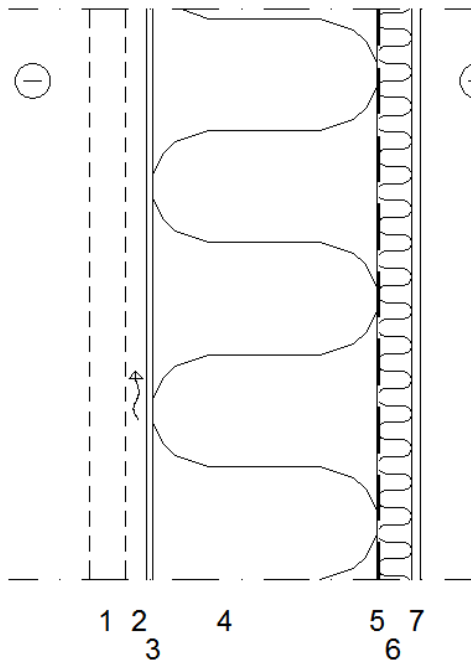
NAME	Air gap 50 mm (vertical)
FLAGS	AIR, WATER_TIGHT
RHO	1,3 kg/m <sup>3</sup>
CE	1050 J/(kg·K)
THETA_POR	1 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_EFF	1 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_CAP	- m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
THETA_80	1,00E-05 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
LAMBDA	0,278 W/(m·K)
AW*	1,00E-07 kg/(m <sup>2</sup> ·s <sup>0.5</sup> )
MEW	0,2 -
KLEFF	- s
KG	1,00E-01 s

Laskentaohjelma laskee ilman vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuuden lämpötilan perusteella.

\* Delphin -laskentaohjelman materiaalikirjastossa ilmalle on esitetty vedenimeytymiskerroin AW. Ilma ei siirrä laskennassa kosteutta kapillaarisesti, koska materiaalin kosteudenjohtavuus vesiupotusta vastavassa kosteuspitoisuudessa KLEFF on nolla.

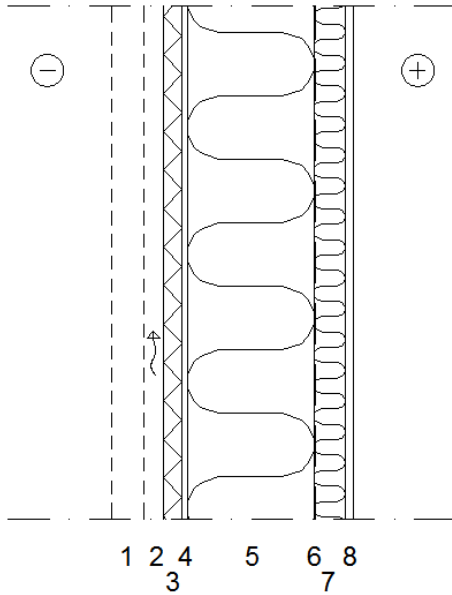
US1:

1	23/85 mm	Julkisivuverhous (puu-/tiiliverhous)
2	25/40 mm	Tuuletusväli (julkisivuverhouksen mukaan)
3	9 mm	Tuulensuojakipsilevy
4	198 mm	Runko 42x198 k600 Mineraalivilla ( $\lambda = 0,035$ )
5	0,2 mm	Höyrynsulkumuovi
6	48 mm	Koolaus 48x48 k600 Mineraalivilla ( $\lambda = 0,035$ )
7	13 mm	Sisäverhouskipsilevy

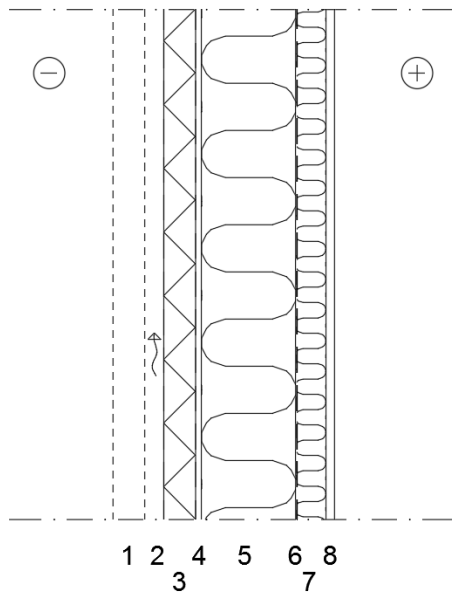
U-arvo: 0,17 W/m<sup>2</sup>US2:

1	23/85 mm	Julkisivuverhous (puu-/tiiliverhous)
2	25/40 mm	Tuuletusväli (julkisivuverhouksen mukaan)
3	9 mm	Tuulensuojakipsilevy
4	315 mm	Runko 42x315 k600 Mineraalivilla ( $\lambda = 0,035$ )
5	0,2 mm	Höyrynsulkumuovi
6	48 mm	Koolaus 48x48 k600 Mineraalivilla ( $\lambda = 0,035$ )
7	13 mm	Sisäverhouskipsilevy

U-arvo: 0,12 W/m<sup>2</sup>

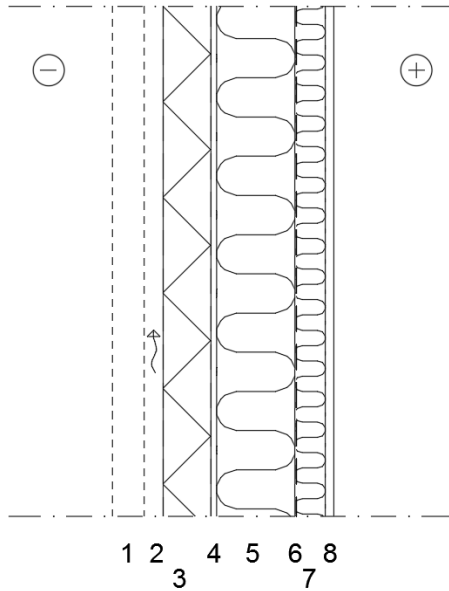
US3:

1	23/85 mm	Julkisivuverhouk (puu-/tiiliverhouk)
2	25/40 mm	Tuuletusväli (julkisivuverhouksen mukaan)
3	30 mm	Tuulensuojamineraalivilla ( $\lambda = 0,031$ )
4	9 mm	Tuulensuojakipsilevy
5	198 mm	Runko 42x198 k600 Mineraalivilla ( $\lambda = 0,035$ )
6	0,2 mm	Höyrynsulkumuovi
7	48 mm	Koolaus 48x48 k600
8	13 mm	Sisäverhoukipsilevy

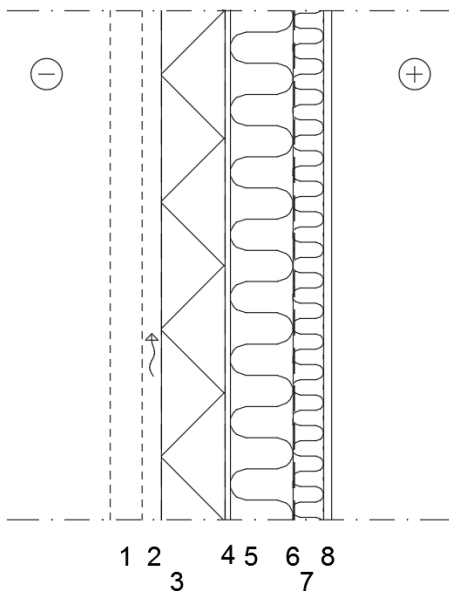
U-arvo: 0,15 W/m<sup>2</sup>US4:

1	23/85 mm	Julkisivuverhouk (puu-/tiiliverhouk)
2	25/40 mm	Tuuletusväli (julkisivuverhouksen mukaan)
3	50 mm	Tuulensuojamineraalivilla ( $\lambda = 0,031$ )
4	9 mm	Tuulensuojakipsilevy
5	148 mm	Runko 42x148 k600 Mineraalivilla ( $\lambda = 0,035$ )
6	0,2 mm	Höyrynsulkumuovi
7	48 mm	Koolaus 48x48 k600
8	13 mm	Sisäverhoukipsilevy

U-arvo: 0,15 W/m<sup>2</sup>

US5:

1	23/85 mm	Julkisivuverhous (puu-/tiiliverhous)
2	25/40 mm	Tuuletusväli (julkisivuverhouksen mukaan)
3	75 mm	Tuulensuojamineraalivilla ( $\lambda = 0,031$ )
4	9 mm	Tuulensuojakipsilevy
5	123 mm	Runko 42x123 k600 Mineraalivilla ( $\lambda = 0,035$ )
6	0,2 mm	Höyrynsulkumuovi
7	48 mm	Koolaus 48x48 k600 Mineraalivilla ( $\lambda = 0,035$ )
8	13 mm	Sisäverhouskipsilevy

U-arvo: 0,15 W/m<sup>2</sup>US6:

1	23/85 mm	Julkisivuverhous (puu-/tiiliverhous)
2	25/40 mm	Tuuletusväli (julkisivuverhouksen mukaan)
3	100 mm	Tuulensuojamineraalivilla ( $\lambda = 0,031$ )
4	9 mm	Tuulensuojakipsilevy
5	98 mm	Runko 42x98 k600 Mineraalivilla ( $\lambda = 0,035$ )
6	0,2 mm	Höyrynsulkumuovi
7	48 mm	Koolaus 48x48 k600 Mineraalivilla ( $\lambda = 0,035$ )
8	13 mm	Sisäverhouskipsilevy

U-arvo: 0,14 W/m<sup>2</sup>