

Pekka Karhunen

SISÄPUOLISEN LÄMMÖNERISTÄMISEN VAIKUTUKSET MASSIIVITIILISEINIEN KOSTEUSTEKNISEEN TOIMINTAAN

Diplomityö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Tarkastajat: professori Juha Vinha
väitöskirjatutkija Petteri Huttunen
Joulukuu 2022

TIIVISTELMÄ

Pekka Karhunen: Sisäpuolisen lämmöneristämisen vaikutukset massiivitiiliseinien kosteustekniseen toimintaan
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Joulukuu 2022

Vanhojen massiivitiiliseinien lämmöneristyskyky on nykyään rakennettaviin uudiskohteisiin verrattuna heikko, mutta niiden energiankulutusta voidaan vähentää lisälämmöneristämisen avulla. Lämmöneriste on lämpö- ja kosteusteknisesti parasta sijoittaa alkuperäisten rakenteiden ulkopuolelle, jotka siirtyvät siten lämpimämpiin ja kuivempiin olosuhteisiin. Ratkaisuna ulkopuolinen lämmöneriste muuttaa kuitenkin tiilijulkisivun ulkonäköä, mikä ei ole yleensä rakennussuojelun näkökulmasta sallittua.

Sisäpuolinen lämmöneristys on kosteusteknisesti haastava tapa parantaa massiivitiiliseinän lämmöneristävyttä, sillä rakenteita rasittavat sekä sisäilmasta vesihöyryn diffuusiolla siirtyvä kosteus että tiileen sadevedestä kapillaarisesti imeytyvä vesi. Sisäpintaan asennettava höyrynsulku ei ole toimiva ratkaisu, koska se estää rakenteeseen tunkeutuneen sadeveden kuivumisen sisäänpäin. Ratkaisuna voidaan käyttää kapillaarista lämmöneristettä, joka voi varastoida kosteutta nesteinä ja vesihöyrynä, ja siirtää materiaalin huokosverkoston kapillaari-imun avulla rakenteen sisäpintaa kohti, josta kosteus voi kuivua sisäilmaan.

Tutkimuksessa etsittiin kosteusteknisesti toimivia sisäpuolelta eristettyjä rakenteita nykyilmaston ja ennustetun tulevaisuuden ilmaston olosuhteissa käyttämällä FRAME-projektissa valmistunutta rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmää. Rakenteet mallinnettiin yksilotteisina lämpö- ja kosteustekniseen laskentaan sopivalla WUFI Pro 6.5 -ohjelmalla, ja rakenteiden toimivuutta arvioivana toimintakriteerinä käytettiin Suomalaisen homemallin homeindeksin maksimiarvoa. Homeen kasvua ei sallittu tiilimuurin sisäpuolisissa rakennekerrosten rajapinnoissa, joten toimintakriteerin raja-arvoksi valittiin $M_{max} < 1$.

Kosteusteknisesti parhaiksi rakenteiksi todettiin kalsiumsilikaatilla lämmöneristetyt rakenteet, mutta niiden toimivuus vuoden 2100 ilmastossa vaikutti epävarmalla. Kalsiumsilikaattieristeen toiminta heikentyi oleellisesti, jos rakenteessa käytettiin sen kanssa yhteensopimatonta sisäverhouslevyä tai rakenteen sisäpinnassa vesihöyrytiivistä pinnoitetta. Epävarmuutta sisältävien reunaehtojen ja materiaaliominaisuuksien vaikutuksia saatuihin tuloksiin arvioitiin useiden herkkyystarkasteluiden avulla, ja etenkin tiilen materiaaliominaisuuksien havaittiin vaikuttavan homeindeksien suuruuksiin merkittävästi.

Rakenteiden toimivuutta voitiin parantaa merkittävästi sadeveden imeytymistä tiileen vähentävän impregnointikäsittelyn avulla. Impregnoinnin avulla 100 mm kalsiumsilikaattieristys havaittiin kosteusteknisesti toimivaksi ratkaisuksi myös tulevaisuuden ilmastossa.

Avainsanat: massiivirakenne, lisäeristäminen, sisäpuolinen lämmöneristäminen, tiili, pinnoite, kapillaarinen lämmöneriste, kosteus, ulkoseinä

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Pekka Karhunen: Effects of internal thermal insulation on the hygrothermal performance of massive brick walls
Master of Science Thesis
Tampere University
Master's Degree Programme in Civil Engineering
December 2022

Thermal resistances of old massive brick walls are weak compared to new structures being built today. However, their energy consumption can be reduced using internal retrofit insulation. Considering hygrothermal performance of massive brick walls the additional thermal insulation should be installed on the outside of the original structures which are thus to experience warmer and drier conditions. However, as a solution, external retrofit insulation changes the appearance of the brick facade, which is usually not permitted from the building protection point of view.

Internal retrofit insulation is moisture-technically challenging way to improve the thermal insulation of massive brick walls, as the structures are affected by both water vapor diffusion from indoor air and wind-driven rain by capillary absorption of the brick masonry. A vapor barrier installed on the inner surface is not suitable solution, as it prevents penetrated rainwater from drying inward. A capillary thermal insulation, which can store moisture as liquid water and water vapor and transfer accumulated moisture to the indoor air using capillary flow in the pore structure of the material, can be used as a solution instead.

The object of this study was to search for internally retrofitted insulation solutions, which meet certain hygrothermal performance criterion in today's and future climate conditions according to an analysis method for the moisture performance of structures finished in the FRAME project. The structures were modelled as one-dimensional using WUFI Pro 6.5 program, which is suitable for hygrothermal analyses. Hygrothermal performance of the structures was evaluated using maximum value of the mould index according to the Finnish mould growth model as a performance criterion. Mould growth was not allowed in structures inside the brick wall, so the limit for the performance criterion was set to $M_{max} < 1$.

The best hygrothermal performance was achieved in structures with calcium silicate insulation, but they were not found to be absolutely mould safe structures especially in the climate of 2100s. The hygrothermal performance of the calcium silicate insulation was substantially impaired if incompatible indoor lining was used or there were water vapor tight coatings on the inner surface of the structure. The effects of uncertainty in boundary conditions and material properties were assessed through a series of sensitivity analyses. The material properties of the brick were found to impact on the magnitude of the mould indexes significantly.

The hygrothermal performance of the structures could be significantly improved by reducing rainwater absorbed by the brick masonry using hydrophobic treatments. 100 mm thick internal retrofit insulation was found to be mould safe solution with facade impregnation even in the future climate.

Keywords: solid structure, interior retrofit insulation, coating, brick, capillary active thermal insulation, moisture, exterior wall

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

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty osana Business Finlandin rahoittamaa Future Spaces -projektia Tampereen yliopiston rakennusfysiikan tutkimusryhmässä. Työn tekeminen on johtanut mielenkiintoisiin yrityskontakteihin, ja diplomityöni aihe on yleisesti ollut kiinnostusta herättävä.

Esitän kiitokseni professori Juha Vinhalle ja väitöskirjatutkija Petteri Huttuselle mielenkiintoisen aiheen tarjoamisesta ja diplomityöni ohjauksesta. Kiitokset myös muille tutkimusryhmän jäsenille sekä opintojani tukeneille opiskelijakavereille.

Tampereella, 19.12.2022

Pekka Karhunen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO.....	1
2.	RAKENNUSFYSIKAALISET ILMIÖT.....	3
2.1	Lämmön siirtyminen	3
2.1.1	Johtuminen.....	3
2.1.2	Lämmön konvektio.....	5
2.1.3	Lämpösäteily.....	6
2.2	Kosteus ja kosteuden siirtyminen.....	7
2.2.1	Ilman kosteus	7
2.2.2	Materiaalin kosteus.....	9
2.2.3	Vesihöyryn diffuusio	11
2.2.4	Veden kapillaarinen siirtyminen.....	13
3.	TUTKITTAVAT RAKENTEET JA MATERIAALIT	16
3.1	Massiivitiiliseinä	16
3.1.1	Suomalainen rakennuskanta.....	16
3.1.2	Lämpö- ja kosteustekniset erityispiirteet	18
3.1.3	Lisälämmöneristäminen.....	19
3.2	Sisäpuoliset lämmöneristeratkaisut	20
3.2.1	Kapillaariset lämmöneristeet.....	21
3.2.2	Kapillaariset komposiittimateriaalit.....	22
3.3	Pinnoitteet	23
3.3.1	Hydrofobiset aineet	23
3.3.2	Rappaukset.....	26
3.4	Tutkittavat rakenteet ja tarkastelupisteet	28
4.	TUTKIMUSMENETELMÄT JA LÄHTÖTIEDOT	30
4.1	Ulko- ja sisäilmaolosuhteet.....	30
4.2	Suomalainen homemalli	32
4.3	WUFI-laskentaohjelmat.....	34
4.3.1	Laskentaverkko	34
4.3.2	Alkuolosuhteet ja laskettavien vuosien määrä	35
4.3.3	Viistosade.....	35
4.3.4	Hydrofobisen kerroksen mallintaminen.....	36
4.3.5	Pintojen siirtokertoimet ja pitkäaaltainen lämpösäteily.....	36
4.4	Virhelähteet ja varmuus mitoituksessa	37
4.5	2D- ja 1D-mallien vertailu	38
5.	TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET.....	42
5.1	Perustapaukset.....	42
5.1.1	Alkuperäinen rakenne.....	42
5.1.2	Sisäpuolelta lämmöneristetty rakenne	44
5.2	Sisäpuolisten lämmöneristeiden vaikutukset	46
5.2.1	Lämmöneristeen mukaan.....	46
5.2.2	Lämmöneristeen paksuuden mukaan.....	50
5.3	Pinnoitteen vaikutukset.....	52
5.3.1	Eri pinnoitevaihtoehdot.....	52

5.3.2	Impregnoinnin vaikutus eri lämmöneristeillä.....	54
5.4	Tulevaisuuden ilmastot.....	56
5.5	Tiiliseinän paksuus.....	59
5.6	Suoritetut herkkyystarkastelut.....	60
5.6.1	Sisäilman kosteuslisä.....	60
5.6.2	Impregnointiaineen tunkeutumissyvyys	61
5.6.3	Epäonnistunut impregnointi.....	62
5.6.4	Halkeamat impregnoinnissa	64
5.6.5	Väärä sisäverhouslevy	66
5.6.6	Sisäpinnan vesihöyryn diffuusiovastus.....	67
5.6.7	Tiilen tasapainokosteuskäyrä	69
6.	YHTEENVETO	72
	LÄHTEET	75

LIITE A: MATERIAALIOMINAISUUKSIA

LIITE B: HOMEINDEKSITÄULUKOT

LIITE C: ULKOILMAN OLOSUHTEET

MERKINNÄT

α	absorptiokerroin	-
δ_v	vesihöyrynläpäisevyys	$m^2 \cdot s$
δ_p	vesihöyrynläpäisevyys	$kg/(m \cdot s \cdot Pa)$
ε	emissiviteetti	-
η_w	veden dynaaminen viskositeetti	$\approx 0,00131 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$
θ	lämpötila	$^{\circ}\text{C}$
λ	lämmönjohtavuus	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
μ	diffuusiovastuskerroin	-
ν	vesihöyrypitoisuus	kg/m^3
ρ	heijastuskerroin	-
ρ	tiheys	kg/m^3
σ	pintajännitys	N/m
σ	Stefan-Boltzmannin vakio	$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
τ	läpäisykerroin	-
φ	suhteellinen kosteus	% RH
ϕ	kontaktikulma	-
d	paksuus	m
g	kosteusvirran tiheys	$kg/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
h	lämmönsiirtokerroin	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
k	permeabiliteetti	m^2
k_w	kosteudenjohtavuus	$kg/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$
m	massa	kg
p	paine	Pa
p_v	vesihöyryn osapaine	Pa
q	lämpövirran tiheys	W/m^2
r	säde	m
s	huokosalipaine	Pa
s_d	suhteellinen diffuusiovastus	m
t	aika	s, h
u	kosteuspitoisuus	kg/kg
w	kosteuspitoisuus	kg/m^3
x_p	veden tunkeutumissyvyys	m
A_w	veden imeytymiskerroin	$kg/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})$
B_w	veden tunkeutumiskerroin	$\text{m}/\text{s}^{0,5}$
D_w	kosteusdiffusiviteetti	m^2/s
$D_{w,liq}$	nestemäisen veden kosteusdiffusiviteetti	m^2/s
D_φ	vedenjohtavuuskerroin	$kg/(\text{m} \cdot \text{s})$
E	säteilyteho	W/m^2
M	moolimassa	kg/mol
M	homeindeksi	-
M_{max}	homeindeksin maksimiarvo	-
M_w	veden moolimassa	18,02 kg/kmol
R	lämmönvastus	$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$
R	yleinen kaasuvakio	8314,3 $\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$
T	lämpötila	K, $^{\circ}\text{C}$
U	lämmönläpäisykerroin	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
V	tilavuus	m^3
Z_v	vesihöyrynvastus	s/m

LYHENTEET JA MÄÄRITELMÄT

FRAME	Future envelope assemblies & HVAC solutions -tutkimushanke
HHL	homehtumisherkkyyssluokka
HTL	homekasvun taantumaluokka
KS	kalkkisementti
PUR	polyuretaani
RH	suhteellinen kosteus (relative humidity)
TP	tarkastelupiste
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto
VTT	Valtion teknillinen tutkimuskeskus (nyk. Teknologian tutkimuskeskus)
Future Spaces	2020–2023 toteutettava tutkimushanke, jonka tavoitteena on kehittää palvelukonsepti palvelu- ja liikerakennusten korjaukseen ja olosuhteiden hallintaan. Hankkeeseen osallistuvat Tampereen yliopisto, VTT ja yhdeksän rakennusalan yritystä.
Homeindeksi	Homeindeksi (M) kuvaa tarkasteltavan materiaalin pinnalla esiintyvien homeiden peittämää pinta-alaa suhteessa pinnan koko alaan näköhavaintoon perustuen. Indeksä vaihtelee välillä 0–6. Indeksä määriteltessä ei erotella eri homelajeja toisistaan.
Hygroskooppisuus	Hygroskooppisuus tarkoittaa huokoisen aineen kykyä sitoa ja luovuttaa itseensä kosteutta ilmasta ja luovuttaa sitä takaisin ilmaan.
Kapillaarisuus	Kapillaarisuus tarkoittaa materiaalin kykyä siirtää vettä ohuissa materiaalihuokosputkissa vaikuttavien kapillaarivoimien (adheesio ja koheesio) vaikutuksesta huokosputkien täytyessä kokonaan vedellä. Kapillaarivoimat synnyttävät huokosputken vesipintaan kapillaari-imupaineen (huokosalipaineen), jonka ansiosta vesi siirtyy huokosputkessa eteenpäin. Ylöspäin mentäessä kapillaarinen kosteuden siirtyminen loppuu, kun huokosputkessa olevaan veteen kohdistuva painovoima alaspäin kumoaa kapillaari-imuvoiman vaikutuksen.
Lämmönläpäisykerroin	Lämmönläpäisykerroin (U) ilmoittaa lämpömäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pinta-alayksikön suuruisen rakennusosan, kun rakennusosan eri puolilla olevien ilmatilojen lämpötilaero on yksikön suuruinen. Rakennusosan U -arvo on kokonaislämmönvastuksen käänteisarvo, jossa ovat mukana myös rakennusosan sisä- ja ulkopinnan pintavastukset.
Suomalainen homemalli	Suomalainen homemalli on VTT:n ja TTY:n yhdessä kehittämä las-kentamalli, jolla voidaan arvioida homeiden ja mikrobin kasvua eri rakennusmateriaalien pinnoilla muuttuvissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa ajan funktiona.

1. JOHDANTO

Ilmastonmuutos ja energiatehokkuuden parantuminen asumisessa ja muissa yhteiskunnan toiminnoissa luovat painetta pienentää vanhojen rakenteiden energiankulutusta. Samalla ilmaston lämpeneminen ja sateiden määrän lisääntyminen tulevaisuudessa asettavat lisää haasteita vanhojen rakenteiden toiminnalle. Suomessa rakennettujen kerrostalojen runkona toimi harvoja poikkeuksia lukuun ottamatta 1920-luvulle asti massiivitiilirunko, ja massiivitiiliseinien käyttö jatkui paremmin lämpöä eristävien monireikätiilien kehittymisen myötä 1960-luvulle saakka. Massiivitiiliseinien lämmöneristävyys perustuu tiilen lämmönvastukseen, eikä erillistä lämmöneristystä yleensä ole käytetty, joten rakenteiden lämmönläpäisykertoimet ovat nykyään rakennettaviin uusiin rakennuksiin verrattuna moninkertaisia. (Neuvonen, Mäkiö & Malinen, 2002)

Massiivitiiliseinän lämmöneristävyttä voidaan parantaa ulko- tai sisäpuolisella lämmöneristyksellä. Vanhojen rakennusten julkisivut ovat usein keskeinen osa kaupunkikuvaa, eikä niiden ulkonäön muuttaminen ole useinkaan sallittua, joten sisäpuolinen lämmöneristys on tällöin ainoa mahdollinen tapa parantaa seinärakenteen lämmöneristävyttä. Sisäpuolinen lämmöneristys on kuitenkin kosteusteknisesti haastava tapa, sillä vanha tiiliseinä siirtyy alkutilannetta kylmempiin ja kosteampiin olosuhteisiin, mikä voi altistaa tiiliseinän kosteus- ja pakkasvaurioille. Kosteusteknisesti huonosti toimiva rakenne voi synnyttää homeen kasvua ja altistaa tilojen käyttäjät mikrobin aineenvaihduntatuotteille.

Massiivitiiliseinää rasittaa sisäilman kosteuden lisäksi seinään kapillaarisesti imeytyvä sadevesi, joten sisäpuolisen kosteusrasituksen poistaminen vesihöyrytiivillä lämmöneristeellä ei ole mahdollista. Ratkaisuksi on viime vuosikymmeninä kehitetty kapillaarisia lämmöneristemateriaaleja, joiden avulla lämmöneristeen ja tiilimuurin väliin päätyneet kosteus voi sitoutua lämmöneristeseen ja kuivua myös sisäänpäin. Seinien kosteusteknistä toimintaa voidaan parantaa myös vähentämällä sadeveden imeytymistä tiilimuriin erilaisilla pinnoitteilla.

Työn tavoitteena on löytää kosteusteknisesti toimivia sisäpuolelta lisälämmöneristettyjä rakennusratkaisuja ottaen huomioon myös ilmastonmuutoksen vaikutukset. Työssä selvitetään sisäpuoliseen lämmöneristämiseen soveltuvia lämmöneristemateriaaleja sekä julkisivun pinnoitteita materiaaliominaisuuksineen ja rakenteiden lämpö- ja kosteustekninen toiminta mallinnetaan yksiulotteisena WUFI Pro 6.5 -ohjelmalla. Tulosten saamiseksi käytetään Tampereen teknillisessä yliopistossa (TTY, nyk. Tampereen yliopisto) FRAME-projektin yhteydessä valmistunutta rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmää. Rakenteiden kosteusteknistä toimintaa

vertaillaan Suomalaisen homemallin avulla määritettyjen homeindeksien perusteella. Tarkastelut tehdään Suomen ilmastossa käyttämällä FRAME-projektissa laadittuja rakennusfysikaalisia testivuotia vuosille 2050 ja 2100.

Sisäpuolelta lämmöneristettyjen massiivitiiliseinien kosteusteknistä toimintaa on aiemmin tarkasteltu kenttäkokein ja laskennallisilla tarkasteluilla keski-Euroopassa useissa julkaisuissa (Häupl, Fechner & Petzold, 2004; Klößeiko, Arumägi & Kalamees, 2015; Zhao *et al.*, 2017; Jensen *et al.*, 2021). Lisäksi sadeveden imeytymistä estävien, mutta vesihöyryn diffuusion sallivien, impregnointiaineiden vaikutuksia on tutkittu Tanskan teknillisen yliopiston uusissa julkaisuissa (Soulis *et al.*, 2020; Soulis, de Place Hansen & Peuhkuri, 2021a). Kyseisten pinnoitteiden vaikutusta sisäpuolisen lämmöneristyksen toimivuuteen ei ole tiettävästi aiemmin tutkittu Suomen ilmastossa, ja ilmastonmuutoksen vaikutuksia massiivitiiliseinän kosteusteknisessä toiminnassa huomioon ottavat tutkimukset ovat harvinaisia.

Työ rajattiin tarkastelemaan vain täystiiliseiniä, koska monireikätiilen saatavilla olevissa materiaaliominaisuuksissa oli puutteita ja sen luotettava yksiulotteinen mallintaminen oli haastavaa. Myös rakenteellisten liitoskohtien tarkastelut on rajattu tämän työn ulkopuolelle.

2. RAKENNUSFYSIKAALISET ILMIÖT

Rakennusfysikaalisten ilmiöiden lähtökohtana toimivat energian ja massan säilymislait. Energiaa tai massaa ei voi hävitä tai syntyä tyhjästä. Kappaleeseen virtaavan lämmön ja siitä poistuvan lämmön erotus tarkoittaa joko lämmön varastoitumista kappaleeseen tai lämmön häviämistä kappaleesta, mikä muuttaa kappaleen lämpötilaa. Vastaavasti kappaleeseen virtaavan kosteuden ja siitä poistuvan kosteuden erotus tarkoittaa kappaleeseen varastoituneen kosteuden massan ja siten kappaleen kosteuspitoisuuden muutosta. (Hagentoft, 2001)

2.1 Lämmön siirtyminen

Lämmön siirtymisessä voidaan erottaa kolme eri mekanismia: johtuminen, konvektio ja säteily. Tässä luvussa esitetään lämmön siirtymisen laskennallisia perusteita.

2.1.1 Johtuminen

Johtumisessa lämpöenergia välittyy kappaleen sisällä ja kappaleiden välillä molekyylien sisäisen värähtelyn välityksellä. Lämpöenergian siirtyminen tapahtuu ilman molekyylien kuljettumista korkeammasta lämpötilasta matalampaan. Johtumalla siirtyvä lämpövirran tiheys saadaan lasket-
tua Fourierin lain avulla:

$$q = -\lambda \nabla T = -\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \lambda \frac{\partial T}{\partial y}, \lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad (2.1)$$

missä

q on lämpövirran tiheys [W/m^2]

λ on materiaalin lämmönjohtavuus [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]

T on lämpötila [K]

x, y ja z ovat koordinaattiakseleita. (Hagentoft, 2001)

Yhtälön (2.1) miinusmerkki tarkoittaa, että lämpövirta ja lämpötilan gradientti ovat vastakkais-
suuntaiset (Hens, 2007).

Stationääritilan saavuttaneen yksiulotteisen kappaleen lämpötila muuttuu lineaarisesti koordi-
naattiakselinsa suhteen, kun lämmönjohtavuus ei riipu lämpötilasta. Tällöin lämpövirran tiheys
voidaan kirjoittaa kaavan 2.2 mukaan:

$$q = \lambda \frac{T_1 - T_2}{d} \quad (2.2)$$

missä

d on materiaalikerroksen paksuus [m]

T_1 ja T_2 ovat lämpötilat materiaalin rajapinnoilla [K].

Useasta rakennekerroksesta koostuvaa systeemiä tarkastellaan usein materiaalikerroksittaisten lämmönvastusten avulla. Homogeenisen materiaalikerroksen lämmönvastus lasketaan kaavalla 2.3 (SFS-EN ISO 6946, 2017):

$$R_i = \frac{d_i}{\lambda_i} \quad (2.3)$$

missä

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

Rakennusosan kokonaislämmönvastus saadaan rakennekerrosten lämmönvastusten summana kaavalla 2.4:

$$R_{tot} = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} \quad (2.4)$$

missä

R_{tot} on rakennusosan kokonaislämmönvastus [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$]

R_{si} on sisäpinnan pintavastus [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$]

$R_{1\dots n}$ ovat rakennekerrosten 1...n lämmönvastuksia [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$]

R_{se} on ulkopinnan pintavastus [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$].

Rakennusosien lämmöneristyskykyä voidaan vertailla lämmönläpäisykerroimen eli U-arvon avulla. Rakennusosan U-arvo on kaavan 2.5 mukaisesti kokonaislämmönvastuksen käänteisluku:

$$U = \frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se}} \quad (2.5)$$

missä

U on rakennusosan lämmönläpäisykerroin [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$].

Rakenteen tai rakennusosan läpi kulkevan lämpövirran tiheys voidaan esittää myös U-arvon avulla kaavalla (Hagentoft, 2001):

$$q = U(T_1 - T_2) \quad (2.6)$$

missä

T_1 ja T_2 ovat lämpötilat rakenteen sisä- ja ulkopuolella [K].

Kaavasta 2.6 huomataan, että mitä pienempi rakenteen U-arvo on, sitä pienempi lämpövirta rakenteen läpi kulkee.

2.1.2 Lämmön konvektio

Paine-eron synnyttämää nesteen tai kaasun virtausta kutsutaan konvektioksi. Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa virtaava aine on tavallisesti ilma. Luonnollisesta konvektiosta puhuttaessa virtaus johtuu lämpötilaerojen ja painovoiman yhdessä synnyttämästä paine-erosta, kun taas pakotettu konvektio syntyy tuulen, puhaltimen tai pumpun synnyttämästä paine-erosta. Pinnan ja ympäröivän ilman välinen konvektiivinen lämpövirran tiheys voidaan esittää kaavalla 2.7:

$$q_{conv} = h_{conv}(T_s - T_a) \quad (2.7)$$

missä

q_{conv} on konvektiivinen lämpövirran tiheys pinnan ja ympäröivän ilman välillä [W/m^2]

h_{conv} on konvektiivinen lämmönsiirtokerroin [$W/(m^2 \cdot K)$]

T_s on materiaalipinnan lämpötila [K]

T_a on ympäröivän ilman lämpötila [K].

Suljetussa ilmvälissä siirtyvä lämpövirta on yhdistelmä johtumalla, konvektiolla ja säteilyä siirtävistä lämpövirroista. Kun lämpösäteilyn vaikutus jätetään huomiotta, ilmiö voidaan esittää kaavoilla 2.8 ja 2.9.

$$q_{conv+cd} = h_{conv+cd}(T_1 - T_2) \quad (2.8)$$

missä

$q_{conv+cd}$ on johtumisen ja konvektion yhdistetty lämpövirran tiheys [W/m^2]

$h_{conv+cd}$ on johtumisen ja konvektion yhdistetty lämmönsiirtokerroin [$W/(m^2 \cdot K)$]

T_1 ja T_2 ovat tutkittavan ilmvälän pintojen lämpötilat [K].

$$h_{conv+cd} = \frac{\lambda_{air}}{d} + h_{conv} \quad (2.9)$$

missä

λ_{air} on ilman lämmönjohtavuus [$W/(m \cdot K)$]

d on ilmakerroksen paksuus [m].

2.1.3 Lämpösäteily

Lämpösäteily poikkeaa muista lämmön siirtymisen muodoista, sillä se ei tarvitse väliainetta siirtääkseen lämpöenergiaa kuten johtuminen ja konvektio. Lämpösäteilyllä tarkoitetaan sähkömagneettista säteilyä, jonka aallonpituus on alueella 0,1 ... 100 µm.

Säteilyn osuessa materiaalin pintaan, osa siitä heijastuu, osa absorboituu ja osa kulkee materiaalin läpi. Osuuksista voidaan muodostaa kaava 2.10. Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa materiaalin läpäisevä säteilyn osuus on lasia ja eräitä muoveja lukuun ottamatta nolla.

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (2.10)$$

missä

ρ on heijastuskerroin [-]

α on absorptiokerroin [-]

τ on läpäisykerroin [-].

Rakennusfysiikassa lämpösäteily voidaan luokitella lyhytaaltoiseen auringonsäteilyyn ja pitkäaaltoiseen säteilyyn. Lyhytaaltainen säteily on peräisin suorana säteilynä auringosta ja diffuusina säteilynä ilmakehästä ja heijastuneena säteilynä maan ja rakennusten pinnoista. Ilmakehän, maan ja rakennusten pintojen emittoima säteily on pitkäaaltoista lämpösäteilyä.

Kaikki absoluuttista nollapistettä lämpimämmät pinnat emittoivat eli lähettävät ympäristöönsä lämpösäteilyä. Ideaalisen mustan kappaleen pinta absorboi kaiken siihen tulevan säteilyn. Termodynaamisessa tasapainotilassa se emittoi saman määrän säteilyä. (Hens, 2007) Sen emittoima säteilyteho lasketaan Stefan-Boltzmannin lain mukaan kaavalla 2.11.

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (2.11)$$

missä

E_b on ideaalisen mustan pinnan lähettämä säteilyteho [W/m²]

σ on Stefan-Boltzmannin vakio $5,67 \cdot 10^{-8}$ [W/(m²·K⁴)]

T_s on säteilevän pinnan lämpötila [K]. (Hagentoft, 2001)

Todellisten pintojen emittoima säteilyteho on pienempi kuin ideaalin mustan kappaleen emittoima säteilyteho. Tätä suhdetta voidaan kuvata emissiviteetillä kaavan 2.12 avulla. Emissiviteetti vaihtelee välillä 0 ... 1. Ideaalisen mustan pinnan emissiviteetti on 1.

$$\varepsilon = \frac{E(T)}{E_b(T)} \quad (2.12)$$

missä

ε on pinnan emissiviteetti [-]

E on pinnan lähettämä säteilyteho [W/m^2].

Rakennusmateriaalien pinnat voidaan käsitellä ns. harmaina pintoina, jolloin pintojen välistä pitkäaaltoista lämpösäteilyä tarkasteltaessa voidaan hyödyntää Kirchoffin lakia:

$$\alpha = \varepsilon \quad (2.13)$$

Kaava 2.13 on voimassa, kun tarkasteltavien pintojen lämpötilat ovat lähellä toisiaan. Pitkäaaltoisen säteilyn absorptiokerroin ja lyhytaaltoisen säteilyn absorptiokerroin voivat sen sijaan pinnan ominaisuuksista riippuen erota merkittävästi toisistaan. (Hens, 2007)

2.2 Kosteus ja kosteuden siirtyminen

Kosteus voi esiintyä materiaaleissa veden eri olomuodoissa: jäänä, lumena, nestemäisenä vetenä ja vesihöyrynä. Kosteuden siirtymisen muodoista erotetaan diffuusio, konvektio, kapillaarinen siirtyminen, veden paineenalainen siirtyminen, painovoimainen siirtyminen ja luonnonvoimista kuten tuulenpaineesta aiheutuva siirtyminen. (Hagentoft, 2001)

2.2.1 Ilman kosteus

Ilma on usean kaasun ja vesihöyryn seos. Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa ilmaa voidaan pitää ideaalikaasuna, jolloin se noudattaa ideaalikaasun tilanyhtälöä:

$$pV = \frac{m}{M}RT \quad (2.14)$$

missä

p on kaasun paine [Pa]

V on kaasun tilavuus [m^3]

m on kaasun massa [kg]

M on kaasun moolimassa [kg/mol]

R on yleinen kaasuvakio 8314,3 [J/(kmol·K)]

T on kaasun lämpötila [K].

Kaasun tiheys saadaan kaavasta 2.14 kirjoitettua kaavaksi 2.15.

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT} \quad (2.15)$$

missä

ρ on kaasun tiheys [kg/m^3].

Kaasujen tilanyhtälö 2.14 pätee kaikille kaasuseoksen kaasuille erikseen, joten myös vesihöyrylle voidaan kirjoittaa kaava 2.16.

$$v = \frac{p_v M_w}{RT} = \frac{M_w}{R(273,15 + \theta)} p_v \quad (2.16)$$

missä

v on vesihöyrypitoisuus [kg/m^3]

p_v on vesihöyryn osapaine [Pa]

M_w on veden moolimassa 18,02 [kg/kmol]

θ on kaasun lämpötila celsiusasteina [$^{\circ}\text{C}$].

Vesihöyrypitoisuus ilmassa vaihtelee ja sillä on ilman lämpötilasta riippuva maksimiarvo, jota kutsutaan vesihöyryn kyllästyspitoisuudeksi. Ilmassa olevan vesihöyrypitoisuuden suhdetta vesihöyryn kyllästyspitoisuuteen kutsutaan ilman suhteelliseksi kosteudeksi, (RH), yhteys esitetään kaavalla 2.17.

$$\varphi = 100 \frac{v}{v_{sat}} = 100 \frac{p_v}{p_{v,sat}} \quad (2.17)$$

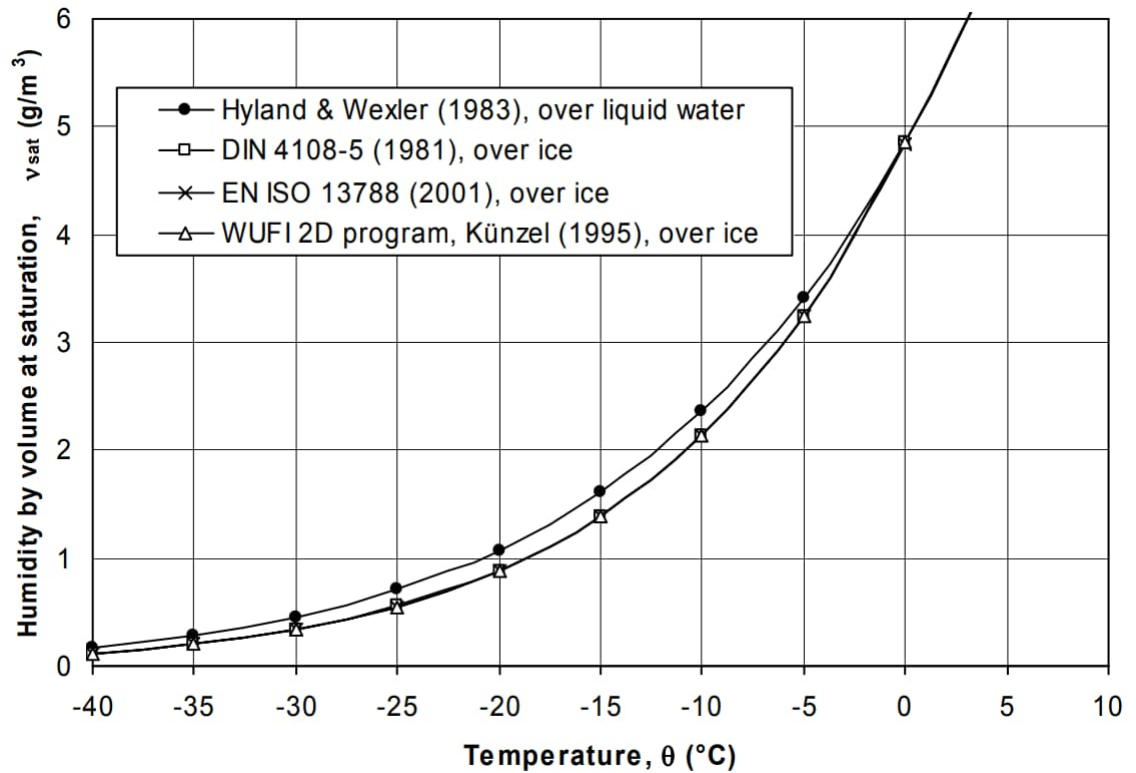
missä

φ on suhteellinen kosteus (RH) [%]

v_{sat} on vesihöyryn kyllästyspitoisuus [kg/m^3]

$p_{v,sat}$ on vesihöyryn kyllästyspitoisuus vesihöyryn osapaineen avulla [Pa].

Vesihöyryn kyllästyspitoisuudelle on määritetty useita korrelaatiokaavoja, joilla voidaan laskea vesihöyryn kyllästyspitoisuus lämpötilan funktiona veden yli ja jään yli -arvoina. Vesihöyryn kyllästyspitoisuus jään yli tarkasteltuna poikkeaa veden yli määritetystä arvosta. Ilman kanssa kosketuksissa oleva veden pinta voi olla sulana, vaikka ilman lämpötila olisikin pakkasen puolella. Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa käytettäviä jään yli korrelaatiokaavoja on esitetty mm. Künzelin julkaisussa (1995).



Kuva 2.1 Vesihöyryn kyllästyspitoisuudet veden ja jään yli lämpötilan funktiona. (Vinha, 2007)

Erilaisia tapoja esittää vesihöyryn kyllästyspitoisuus on esitetty kuvassa 2.1. Kyllästyspitoisuuden laskentatapa vaikuttaa suoraan tarkasteltavan kohteen suhteelliseen kosteuteen, ja eron suhteellinen suuruus kasvaa mitä kylmempi lämpötila on (Vinha, 2007).

2.2.2 Materiaalin kosteus

Materiaalien sisältämä kosteuspitoisuus voidaan ilmoittaa paino-osina kaavalla 2.18 tai vesimääränä tilavuutta kohden kaavalla 2.19.

$$u = \frac{m_w}{m_0} \quad (2.18)$$

missä

u on kosteuspitoisuus paino-osina [kg/kg]

m_w on materiaalin sisältämän veden massa [kg]

m_0 on materiaalin kuivapaino [kg].

$$w = \frac{m_w}{V_0} \quad (2.19)$$

missä

w on materiaalin kosteuspitoisuus tilavuutta kohden [kg/m³]

V_0 on materiaalin kuivatilavuus [m^3].

Materiaalien kykyä luovuttaa ja sitoa merkittäviä määriä kosteutta kutsutaan hygroskooppisuudeksi. Materiaalit pyrkivät kaiken aikaa tasapainottumaan ympäristönsä kanssa samaan suhteellista kosteutta vastaavaan kosteuspitoisuuteen, jota kutsutaan tasapainokosteudeksi. (Björkholtz, 1997)

Materiaalin hygroskooppinen tasapainokosteus riippuu suhteellisen kosteuden lisäksi lämpötilasta. Tasapainokosteus alkaa laskea lämpötilan noustessa tai pakkasen puolelle mentäessä. Materiaaleille voidaan määrittää lämpötilakohtaiset tasapainokosteuskäyrät, mutta tavallisesti määrittäminen tehdään $+23\text{ °C}$ lämpötilassa. Materiaalin hygroskooppinen tasapainokosteuskäyrä kuvaa materiaaliin sitoutuneen veden määrää suhteellisen kosteuden funktiona hygroskooppisella alueella 0 ... 98 % RH. (Vinha, 2019)

Materiaalin tasapainokosteus riippuu siitä, onko materiaali kuivumassa vai kastumassa, eli siitooko vai luovuttaako se kosteutta ympäristöönsä. Adsorptiokäyrällä kuvataan kosteutta sitovan materiaalin tasapainokosteutta ja desorptiokäyrällä kosteutta luovuttavan materiaalin tasapainokosteutta. Desorptiokäyrän kosteuspitoisuus on adsorptiokäyrää suurempi ja ilmiötä kutsutaan hystereesiksi. (Hagentoft, 2001) Rakennusmateriaaleissa hystereesin vaikutuksen on havaittu olevan pieni, jolloin laskennallisissa malleissa voidaan käyttää materiaalille yhtä tasapainokosteuskäyrää (Künzel, 1995). Ilmiön huomioon ottaminen on haastavaa ja yleensä laskennallisissa malleissa käytetään adsorptio- ja desorptiokäyrien keskiarvoa tai pelkkää adsorptiokäyrää.

Hygroskooppisella alueella kosteuden sitoutuminen materiaalin huokosverkostoon voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen. Aluksi vesimolekyylit kiinnittyvät kuivan materiaalin huokosverkoston pintaan aluksi yhden molekyylin paksuisina kerroksina. Seuraavaksi suhteellisen kosteuden kasvaessa yhä suurempi osa huokosverkoston pinnasta täyttyy vesimolekyyleillä, jolloin vesimolekyylit alkavat kiinnittyä useamman molekyylin paksuisina kerroksina. Lopulta pienimmissä huokosissa molekyylikerrokset täyttävät koko huokosen, syntyy kapillaarikondenssi. Suhteellisen kosteuden kasvaessa yhä suuremmat huokokset täyttyvät vedellä. Materiaaleilla on hygroskooppinen kyllästyskosteuspitoisuus, joka on suurin mahdollinen kosteuspitoisuus, joka voidaan saavuttaa ilman, että materiaali on kosketuksissa nestemäisen veden kanssa. (Hagentoft, 2001)

Materiaalin kosteuspitoisuus voi kuitenkin edelleen kasvaa, jos se kykenee imemään itseensä vettä kapillaarisesti. Kriittisen kosteuspitoisuuden saavutettuaan materiaaliin syntyy yhtenäinen nestemäisen veden huokosverkosto ja kosteus alkaa liikkua enimmäkseen kapillaarisesti huokosalipaineen vaikutuksesta. Kun materiaalin kapillaarisesti vastaanottama vesimäärä ei enää kasva, saavutetaan kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus. Maksimikosteuspitoisuus saavutetaan, jos materiaalin koko huokostilavuus täyttyy vedellä. Tätä ei kuitenkaan voida helposti saavuttaa, sillä ilmaa jää huokosverkostoon, ellei sitä poisteta alipaineen avulla. (Hagentoft, 2001; Vinha, 2019)

2.2.3 Vesihöyryn diffuusio

Yleisesti diffuusiolla tarkoitetaan kaasumolekyylien liikettä, jossa kaasuseoksen sisältämien eri yhdisteiden pitoisuudet pyrkivät tasoittumaan ympäristönsä kanssa. Kaasumolekyylien liike tapahtuu korkeammasta pitoisuudesta matalampaan pitoisuuteen. Rakennusfysiikassa keskeinen tarkasteltava kaasu on vesihöyry. Vesihöyryn diffuusiolla siirtyvä kosteusvirran tiheys homogeeniselle materiaalikerrokselle voidaan laskea Fickin lain mukaan kaavalla 2.20. (Hagentoft, 2001; Hens, 2007)

$$g = -\delta_v \frac{\partial v}{\partial x} = -\delta_p \frac{\partial p_v}{\partial x} \quad (2.20)$$

missä

g	on kosteusvirran tiheys [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]
δ_v	on vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuseron suhteen [$\text{m}^2 \cdot \text{s}$]
δ_p	on vesihöyrynläpäisevyys vesihöyryn osapaine-eron suhteen [$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$]
v	on vesihöyrypitoisuus [kg/m^3]
p_v	on vesihöyryn osapaine [Pa]
x	on kosteusvirran suuntainen pituuskoordinaatti [m].

Stationääritilassa yksiulotteisessa tapauksessa voidaan kirjoittaa kaava 2.21.

$$g = \delta_v \frac{v_1 - v_2}{d} \quad (2.21)$$

missä

v_1 ja v_2	ovat vesihöyrypitoisuudet materiaalikerroksen reunoilla [kg/m^3]
d	on materiaalikerroksen paksuus [m].

Usean materiaalikerroksen tapauksessa diffuusio on analoginen ilmiö lämmön johtumisen kanssa. Kullakin homogeenisella materiaalikerroksella on kaavalla 2.22 määritettävä vesihöyrynvastus.

$$Z_v = \frac{d}{\delta_v} \quad (2.22)$$

missä

Z_v	on materiaalikerroksen vesihöyrynvastus [s/m].
-------	--

Koko rakenteen vesihöyrynvastus voidaan esittää kaavalla 2.23.

$$Z_{v,tot} = \sum_{i=1}^N \frac{d_i}{\delta_{v,i}} + Z_{si} + Z_{se} \quad (2.23)$$

missä

$Z_{v,tot}$ on koko rakenteen vesihöyrynvastus [s/m]

d_i on yksittäisen materiaalikerroksen paksuus [m]

$\delta_{v,i}$ on yksittäisen materiaalikerroksen vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuseron suhteen [m²·s]

Z_{si} on rakenteen sisäpinnan vesihöyrynvastus [s/m]

Z_{se} on rakenteen ulkopinnan vesihöyrynvastus [s/m].

Kerroksellisen rakenteen vesihöyrypitoisuus muuttuu materiaalikerrosten vesihöyrynvastusten suhteessa. Sisä- ja ulkopinnan vesihöyrynvastukset ovat materiaalikerrosten vesihöyrynvastuksiin verrattuna pieniä, jonka vuoksi niitä ei yleensä oteta huomioon laskennallisissa tarkasteluissa (Björkholtz, 1997). Stationääritilassa rakenteen läpi diffuusiolla siirtyvä kosteusvirran tiheys voidaan laskea kaavalla 2.24.

$$g = \frac{v_1 - v_2}{Z_{v,tot}} \quad (2.24)$$

missä

g on kosteusvirran tiheys rakenteen läpi [kg/(m²·s)]

v_1 ja v_2 ovat vesihöyrypitoisuudet rakenteen reunoilla [kg/m³].

Materiaalin vesihöyrynläpäisevyyttä voidaan kuvata myös diffuusiovastuskertoimen tai suhteellisen diffuusiovastuksen avulla kaavoilla 2.25 ja 2.26.

$$\mu = \frac{\delta_{v,a}}{\delta_v} = \frac{\delta_{p,a}}{\delta_p} \quad (2.25)$$

missä

μ on diffuusiovastuskerroin [-]

$\delta_{v,a}$ on ilman vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuseron suhteen [m²·s]

$\delta_{p,a}$ on ilman vesihöyrynläpäisevyys vesihöyryn osapaine-eron suhteen [kg/(m·s·Pa)].

$$s_d = \mu d \quad (2.26)$$

missä

s_d on suhteellinen diffuusiovastus [m]

d on materiaalikerroksen paksuus [m].

Diffuusiovastuskerroin kuvaa, kuinka hyvin materiaali läpäisee vesihöyryä suhteessa ilman vesihöyrynläpäisevyyteen. Suhteellinen diffuusiovastus kuvaa ilmakerroksen paksuutta, jolla on sama diffuusiovastus kuin tarkasteltavalla materiaalikerroksella. (Hagentoft, 2001; Hens, 2007)

2.2.4 Veden kapillaarinen siirtyminen

Huokoisessa materiaalissa on huokosverkosto, jonka voidaan ajatella koostuvan eri kokoisista huokosista ja huokosia yhdistävistä huokosputkista. Ollessaan kosketuksissa vapaan vedenpinnan kanssa materiaali voi imeä ja siirtää vettä kapillaarisesti. Vesi pyrkii kiinnittymään huokosputken seinämiin adheesiolla, jolla tarkoitetaan huokospinnan vesimolekyyleihin kohdistamia vetovoimia. Adheesio ja veden sisäinen koheesio eli vesimolekyylien keskinäiset vetovoimat aiheuttavat vedenpinnan kaareutumisen huokosputkessa, jolloin veden pintajännitys aiheuttaa kaareutumisen takia paine-eron veden ja huokosilman välille. Paine-eroa kutsutaan huokosalipaineeksi, joka voidaan laskea kaavalla 2.27.

$$s = \frac{2\sigma}{r} \cos(\phi) \quad (2.27)$$

missä

s on huokosalipaine [Pa]

σ on pintajännitys [N/m].

r on huokosputken säde [m]

ϕ on vedenpinnan kontaktikulma huokosseinämään [m].

Hydrofiilillä materiaaleilla, kuten tavallisilla rakennusmateriaaleilla kontaktikulma on likipitään nolla. Vettä hylkivillä eli hydrofobisilla materiaaleilla kontaktikulma voi olla suurempi kuin 90°. (Hens, 2007)

Huokosalipaineen ja huokosilman suhteellisen kosteuden välille voidaan kirjoittaa yhteys Kelvinin lain avulla kaavalla 2.28.

$$\ln(\phi) = -\frac{sM_w}{\rho_w RT} \quad (2.28)$$

missä

ρ_w on veden tiheys [kg/m³].

Materiaalin kapillaarista vedensiirtokykyä voidaan määrittää kokeellisesti vedenimeytymiskokeen avulla. Kuivan materiaalin vapaasta vedenpinnasta kapillaarisesti imemä kosteusvirran tiheys voidaan laskea kaavalla 2.29.

$$g_{cap} = \frac{A_w}{2\sqrt{t}} \quad (2.29)$$

missä

g_{cap} on kapillaarinen kosteusvirran tiheys [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]

A_w on veden imeytymiskerroin [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})$]

t on aika [s].

Vesi nousee materiaalin huokosputkissa lopulta sen kapillaariseen nousukorkeuteen saakka, mikä saavutetaan, kun huokosputkessa olevan veden massaan kohdistuva painovoima on tasapainossa huokosalipaineen kanssa. Pienissä huokosputkissa vesi ei nouse kapillaariseen nousukorkeuteen välittömästi vaan kitka hidastaa veden liikettä huokosputkessa. Mitä pienempi huokosputki on kyseessä, sitä hitaampaan veden nousu on. Veden tunkeutumissyvyyttä ajan suhteen voidaan kuvata kaavalla 2.30.

$$x_p = B_w \sqrt{t} \quad (2.30)$$

missä

x_p on veden tunkeutumissyvyys [m]

B_w on veden tunkeutumiskerroin [$\text{m}/\text{s}^{0,5}$].

Kun yhdistetään kaavat 2.31 ja 2.32, saadaan materiaalikerroksen läpi virtaavan kapillaarisen kosteusvirran tiheys kaavalla 2.31.

$$g_{cap} = \frac{A_w B_w}{2d} \quad (2.33)$$

missä

g_{cap} on kapillaarinen kosteusvirran tiheys [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]

A_w on veden imeytymiskerroin [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})$]

d on materiaalikerroksen paksuus [m]. (Hagentoft, 2001)

Kapillaarisen kosteuden siirtymisen potentiaalina voidaan käyttää huokosalipainetta, materiaalin kosteuspitoisuutta tai huokosilman suhteellista kosteutta. Huokosalipaineen avulla kapillaarisen kosteusvirran tiheys voidaan esittää Darcyn lain avulla kaavalla 2.32.

$$g_{cap} = -\rho_w \frac{k}{\eta_w} \frac{\partial p}{\partial x} = -k_w \frac{\partial s}{\partial x} \quad (2.34)$$

missä

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

k on materiaalin ominaispermeabiliteetti [m^2]

η_w on veden dynaaminen viskositeetti $0,00131$ [$N \cdot s/m^2$] (kun $T = 10$ °C).

Kapillaarinen kosteusvirran tiheys voidaan ilmoittaa myös materiaalin kosteuspitoisuuden avulla kaavalla 2.33.

$$g_{cap} = -\rho_0 D_w \frac{\partial u}{\partial x} = -D_w \frac{\partial w}{\partial x} \quad (2.35)$$

missä

ρ_0 on materiaalin kuivatiheys [kg/m^3]

D_w on kosteusdiffusiviteetti [m^2/s]. (Vinha, 2007)

Kapillaarisen kosteuden siirtymisen potentiaalina voidaan käyttää myös suhteellista kosteutta, jolloin kapillaarinen kosteusvirran tiheys voidaan esittää kaavalla 2.34.

$$g_{cap} = -D_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (2.36)$$

missä

D_φ on materiaalin vedenjohtavuuskerroin [$kg/(m \cdot s)$].

Tällöin tarvitaan lisäksi yhteys vedenjohtavuuskertoimelle ja kosteusdiffusiviteetille. Tämä voidaan esittää kaavan 2.35 mukaan.

$$D_\varphi = D_w \frac{\partial w}{\partial \varphi} \quad (2.37)$$

Künzel on esittänyt kaavat 2.34 ja 2.35 julkaisussaan (1995) ja kyseistä tapaa laskea kapillaarisesti siirtyvä kosteusvirran tiheys käytetään WUFI-laskentaohjelmissa.

Mitattuja arvoja nestemäisen veden kosteusdiffusiviteetille ei ole useille materiaaleille olemassa. Künzel (1995) on havainnut kaavan 2.36 hyväksi approksimaatioksi, jota voi käyttää tavallisille rakennusmateriaaleille, jos tarkempia materiaalikohtaisia mittaustuloksia ei ole olemassa.

$$D_{w,liq} \approx 3,8 \left(\frac{A_w}{w_{cap}} \right)^2 1000^{\frac{w}{w_{cap}} - 1} \quad (2.38)$$

missä

$D_{w,liq}$ on nestemäisen veden kosteusdiffusiviteetti [m^2/s]

A_w on veden imeytymiskerroin [$kg/(m^2 \cdot s^{0,5})$]

w_{cap} on materiaalin kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus [kg/m^3]

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

3. TUTKITTAVAT RAKENTEET JA MATERIAALIT

3.1 Massiivitiiliseinä

Massiivirakenne tarkoittaa yhdestä materiaalista koostuvaa rakennetta, joka välittää rakenteelliset kuormat ja toimii samalla lämmöneristeenä. Yleisimpiä massiivirakenteita ovat tiili-, hirsi-, kevytsoraharkko- ja kevytbetonirakenteet.

Massiivitiiliseinä koostuu tietyn tiililimityksen mukaan ladotuista tiilistä, puhutaan yleisesti kivistä, jotka on sidottu toisiinsa muurauslaastilla. Rakenteen sisä- tai ulkopinnassa voi olla rappaus, ja rappaamaton tiilipinta on ns. puhtaaksi muurattu. Massiivitiilirakenteita on erilaisia, ja tiilimenekin vähentämiseksi toisinaan massiivitiiliseiniin on voitu jättää ilmarakoja tai onteloita, jotka on täytetty hiekalla, koksikuonalla tai turpeesta valmistetulla lämmöneristekerroksella. 1930-luvun jälkipuolella yleistynyt monireikätiili, toiselta nimeltään solutiili tai kennotiili, on täystiiltä paremmin lämpöä eristävä, mutta puristuslujuudeltaan täystiiltä vastaava tuote. Kevytbetonia ja tiiltä on yhdistelty massiivirakenteena betonin ja mineraalivillan yleistymiseen saakka. (Höyhtyä & Vääntinen, 1989; Neuvonen, Mäkiö & Malinen, 2002) Tässä työssä tarkastellaan pelkästään massiivista täystiilimuuria.

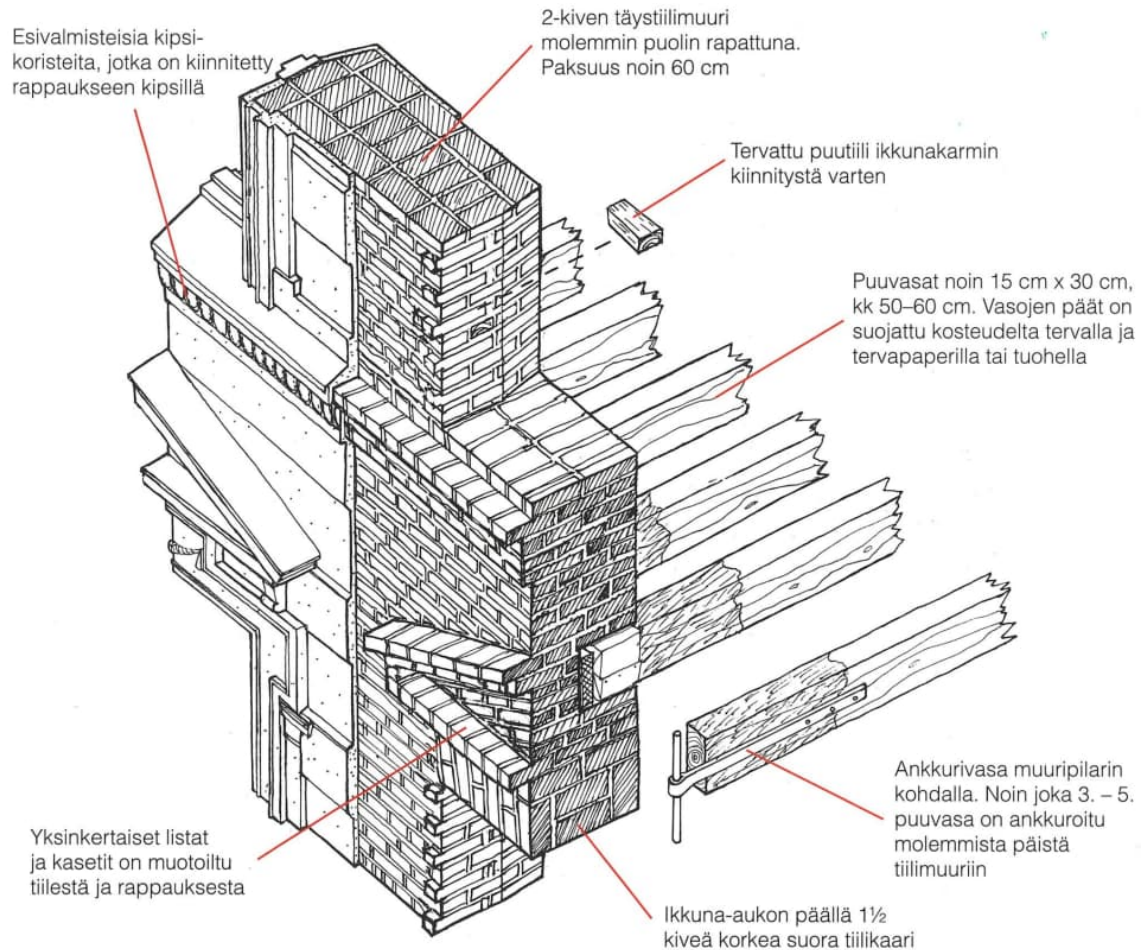
3.1.1 Suomalainen rakennuskanta

1800-luvulta toiseen maailmansotaan saakka ulkoseinien yleisin rakennustarvike Suomessa oli poltettu savitiili. Suomalaiset tiilet ovat yleensä punatiiliä, joiden väri johtuu rautaoksidipitoisesta savesta. Vanhan tiilen laadussa on usein suuria poikkeavuuksia, mikä johtuu yleensä epätasaisesta poltosta. Lisäksi käytetyt raaka-aineet ja savimassan lyöntitapa muotteihin vaikuttavat saavutettaviin teknisiin ominaisuuksiin. Tummaksi poltetut, osin jopa sintraantuneet, rautapalaneet tiilet ovat kestävimpiä, sitä vastoin uunin viileämmässä reunaosassa poltetut vaaleat tiilet ovat puristuslujuudeltaan heikompia. Rungon muurauksessa käytettyjen täystiilien tilavuuspaino on yleensä välillä 1500–1800 kg/m³. (Neuvonen, Mäkiö & Malinen, 2002)

Poltettua savitiiltä on valmistettu eri maissa eri mitoilla. Arkkitehtiklubin vuoden 1897 ehdotuksen mukaan tiilen normaalimitaksi vakioitui koko 270 x 130 x 75 mm. Suomalaiset tiilet ovat keski-Euroopassa ja muissa Pohjoismaissa käytettyihin tiiliin verrattuna suuria. Ruotsalaisen standardin mukaan kyseinen koko luokitellaan jo harkoksi (Niemelä, 2006). Myös tiilen laatu vaihtelee maittain ja saatavilla on ollut useita erilaisia laatuja. (Höyhtyä & Vääntinen, 1989; Neuvonen, Mäkiö & Malinen, 2002)

Massiivitiiliseinien rakennepaksuus vaihtelee Euroopassa ilmaston ja aikakauden mukaan. 1900-luvun alusta alkaen tyypillisin Suomessa käytetty rakenne on 2-kiven täystiilimuuri, esimerkiksi

kuvassa 3.1 esitetty rakenne. Seinäpaksuus on vaihdellut kerroksittain, ja esimerkiksi 1895–1917 Helsingin rakennusjärjestys on määrännyt alimpiin kerroksiin 2½-kiven vähimmäispaksuutta. Vanhemmissa rakennuksissa on käytetty ylemmissä kerroksissa 1½-kiven paksuista seinää. (Höyhty & Vääntinen, 1989; Neuvonen, Mäkiö & Malinen, 2002)



Kuva 3.1 Tyypillinen ulkoseinä ja välipohja 1890-luvulta (Neuvonen, Mäkiö & Malinen, 2002).

1800-luvulla ja ennen koneellisen lyöntitekniikan kehittymistä tiilen mittatarkkuus, väri ja pinnan laatu oli epätasalaatuinen. Hyvin eläväsien näköiset pinnat eivät kelvanneet puhtaaksi muuratuksi, joten usein pinnat rapattiin piiloon kalkkirappauksella (Niemi, 2006), joskin julkisivut ovat voineet olla myös puhtaaksimuurattuja tai kalkkimaalilla maalattuja. Ensimmäiseen maailmansotaan asti hyvälaatuiset julkisivutiilet olivat usein tuontitavaraa, jonka tuli olla ulkomuodoltaan moitteetonta ja pakkasenkestävää. Tuontitavara oli Suomessa käytettyä punatiiltä ohuempaa, jolloin uloimmassa ½-kiven kerroksessa oli paksummat vaakasaumat ja puulistojen avulla tehty jälkisaumaus. (Höyhty & Vääntinen, 1989; Neuvonen, Mäkiö & Malinen, 2002)

Poltettuja savitiiliä on valmistettu myös käyttämällä poltossa palavia orgaanisia aineita tai sahajauhoa. Näin valmistetut tiilet ovat hohkotitiiliä tai sahajauhotitiiliä. Niiden lämmönjohtavuus on

punatiiltä pienempi, mutta puristuslujuus heikompi. Niinpä niitä käytettiin väliseinissä tai ulkoseinissä vain erillisinä lämmöneristekerroksina. (Neuvonen, Mäkiö & Malinen, 2002)

Kansallisromanttisen tyyliuunnan seurauksena massiivitiiliseiniä on vuorattu luonnonkivellä varsinkin 1900–1920 aikana. Kalkkihiekkatiiltä sen sijaan on käytetty hetken punatiilen korvikkeena pula-aikana 1920-luvulla. Kalkkihiekkatiili oli poltettua savitiiltä halvempaa, mittatarkempaa ja säännöllisemmän muotoista, mutta suuremman lämmönjohtavuuden ja heikomman lujuuksensa johdosta sen käyttö rajoittui myöhemmin lähinnä väliseiniin. 2-kiven ulkoseinässä kalkkihiekkatiilestä sallittiin kuitenkin tehtäväksi sisäpuolinen ½-kiven osuus. (Neuvonen, Mäkiö & Malinen, 2002)

Perinteinen kalkkilaasti valmistettiin sekoittamalla 1 osa sammutettua kalkkia 2–4 osaan hiekkaa ja tarpeelliseksi katsottuun määrään vettä. Kalkkilaastin kovettuminen vaati ilman hiilidioksidia ja kosteutta, joten paksujen tiilimuurien kovettuminen oli hidasta ja jäi välillä jopa vaillinaiseksi. 1900-luvun alussa laastin kovettumista ja tiilen kuivumista pyrittiin nopeuttamaan myös muuriin jätettyjen ilmanavien avulla. Kalkkilaasti oli kovettutuaan suhteellisen pehmeää ja huokoista eikä soveltunut kosketuksiin veden kanssa. Kalkkilaastin haittapuolena oli myös muurauksen jälkeinen seinien laskeutuminen alkuperäisestä korkeudestaan 1/200–1/150. (Neuvonen, Mäkiö & Malinen, 2002)

1800-luvun lopusta alkaen kalkkilaastiin alettiin lisätä sementtiä. Sementinsekainen kalkkilaasti ei laskeutunut enää muurauksen jälkeen. Sementinsekainen kalkkilaasti sitoutui puhdasta kalkkilaastia nopeammin, mikä oli hyödyllinen ominaisuus varsinkin talvivaluissa. Jo 1880-luvulla muutamia julkisia rakennuksia muurattiin kokonaan tai osittain sementtilaastilla, joka kovettui kalkkilaastia nopeammin ja saavutti suuremman lujuuksien. Sementtilaasti toimi myös paikoissa, joissa se joutui kosketuksiin veden kanssa. (Neuvonen, Mäkiö & Malinen, 2002)

3.1.2 Lämpö- ja kosteustekniset erityispiirteet

Massiivitiilirakenteen keskeinen heikkous on heikko lämmöneristävyys. 600 mm massiivitiiliseinän U-arvo on luokkaa 0,9–1,0 W/(m²·K), mikä on huomattavan korkea nykyiseen uudisrakentamiseen verrattuna. Pelkkää U-arvoa vertailtaessa kuitenkin unohdetaan, että massiivisella tiilimuurilla on korkea lämpökapasiteetti ja erinomainen lämmönvarauskyky, millä on vaikutusta rakennuksen lämpötalouteen. Massiivirakenne luovuttaa lämpöä sisäilmaan viileänä vuorokauden aikana ja sitoo lämpöä lämpimään aikaan. (Neuvonen, Mäkiö & Malinen, 2002)

Massiivitiiliseinän keskeiset ulkoiset kosteuslähteet ovat sade, ulkoilman sisältämä kosteus ja maaperän kosteus. Sisäpuolelta rakennetta rasittaa sisäilman sisältämä vesihöyry. Lisärasitusta voivat aiheuttaa mahdollisten seinärakenteen sisään asennettujen vesi- ja viemäriputkien vuodot sekä märkätilojen käyttövesi.

Sadeveden tunkeutuminen tiiliseinäen on mahdollista tiilen ja laastisaumojen huokosverkostojen kapillaari-imun ja epätiivien laastisaumojen kautta. Epätiivisyys voi johtua esimerkiksi laastin puuttumisesta, rapautumisesta tai heikosta laastin ja tiilen välisestä tartunnasta. Rakenteellisten virheiden ja kulumisen vaikutuksesta vesi voi kulkeutua syvemmälle rakenteeseen myös rakenteellisten halkeamien, virheellisten tai vaurioituneiden vedenpoistojärjestelmien ja liitosten kautta.

Massiivitiiliseinäen keskeisiä kosteudesta johtuvia vaurioita ovat pakkasvauriot, muodonmuutokset ja lämmöneristyskyvyn heikkeneminen. Rakenteen pinnoille voi syntyä myös esteettistä haittaa suolapitoisen veden haihtuessa. Kosteusvaurioiden välttämiseksi rakenteeseen päässeeseen sadeveden kuivuminen ei saa estyä. Massiivitiiliseinäen kuivuminen voi hidastua tai estyä liian vesihöyrytiivien pinnoitteiden kuten vääränlaisen rappauksen tai maalin käytöstä tiiliseinäen ulko- ja sisäpinnassa. (Höyhty & Vääntinen, 1989)

3.1.3 Lisälämmöneristäminen

Lämmöneristys voidaan asentaa tiiliseinäen ulko- tai sisäpuolelle, joista ulkopuolinen lämmöneristys on kosteusteknisesti parempi ratkaisu, sillä alkuperäiset rakenteet siirtyvät lämmöneristeen sisäpuolelle lämpimämpiin ja kuivempiin olosuhteisiin. Ulkopuolisen lämmöneristejärjestelmän avulla myös tiileen imeytyvän sadeveden määrää voidaan oleellisesti vähentää. Muurattujen rakenteiden ulkopuoliseen lisälämmöneristämiseen sopivia ratkaisuja on esitetty esimerkiksi Niemisen ja Virran julkaisussa (2016). Ulkopuolinen lämmöneristys kuitenkin muuttaa rakenteen julkisivun ulkonäköä, joten massiivitiiliseinien korjaus- ja muutostarkoituksena sen käyttäminen ei yleensä ole rakennussuojelun näkökulmasta sallittua.

Sisäpuolisella lämmöneristämällä on useita heikkouksia. Tiiliseinäen siirtyminen kylmempiin olosuhteisiin hidastaa sen kuivumista, sillä veden olomuodon muutos nesteestä kaasuksi sitoo lämpöenergiaa. Kosteuspitoisuuden kasvu ja lämpötilan lasku tiiliseinäessä altistaa tiilen ja laastisaumat pakkasrapautumiselle ja talvella jäätymis-sulamissyklit voivat tapahtua syvemmällä tiiliseinäessä. Ulkoa kapillaarisesti siirtyvä kosteus ja sisäpuolelta diffuusiolla siirtyvä kosteus kuormittavat tiiliseinäen ja lämmöneristeen välisiä materiaalipintoja, missä suhteellinen kosteus voi pysyä pitkään homeen kasvun kannalta suotuisana. Lisäksi kosteuslähteet voivat aiheuttaa kosteuden kondensoitumisen rakenteen sisään. Sisäpuolinen lämmöneristys ei muodosta yhtenäistä kuorta vaan väliseinien ja ikkunoiden kohdalle syntyvät kylmäsillat voivat aiheuttaa paikallista homeen kasvua.

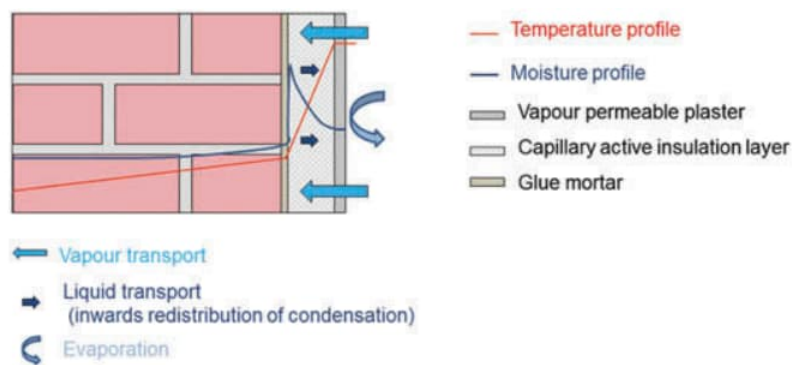
Sisäpuolinenkin lämmöneristys vaikuttaa asumismukavuuteen positiivisesti nostamalla seinän sisäpinnan lämpötilaa. Toisaalta sisäpuolinen lämmöneristys vähentää asumiskäyttöön jäävää pinta-alaa ja sen asentamisen myötä tiiliseinäen lämmönvarauskykyä menetetään, jolloin asunnot

voivat lämmitä kuumana kesäpäivänä tukalammiksi kuin aiemmin. Lämmönvarauskyvyn menettäminen vähentää sisäpuolisella lämmöneristeellä saavutettavia lämmitysenergian säästöjä ja voi lisätä rakennuksen jäähtymiseen kuluvaan energiankulutusta.

Ympäristöministeriön asetuksen (YM, 2013) mukaan rakennuksen korjaus- ja muutostöissä energiatehokkuutta on parannettava siten, että vanhan rakenteen rakennusosakohtainen U-arvo puolitetaan. Ulkoseinälle U-arvo voi kuitenkin enemmillään olla $0,6 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Ulkoseinille Suomen rakentamismääräyskokoelman (YM, 2011) mukainen vertailuarvo uusien rakennusten osalta on $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, jota ei kuitenkaan tarvitse saavuttaa.

3.2 Sisäpuoliset lämmöneristeratkaisut

Lämmöneristeratkaisut voidaan jakaa diffuusioavoimiin ja diffuusiotiiviisiin ratkaisuihin vesihöyryn vastuksen perusteella. Perinteinen ratkaisu estää vesihöyryn kulkeutuminen sisätiloista rakenteen sisään on käyttää höyrynsulkukalvoa. Ratkaisun toimivuus riippuu lämmöneristekerroksen lämmönvastuksesta ja rakennekerrosten vesihöyrynvastuksesta. Diffuusiotiivis ratkaisu ei kuitenkaan toimi, mikäli rakenteeseen pääsee suuria määriä kosteutta ulkopuolelta, kuten tiileen kapillaarisesti imeytynyttä sadevettä. Tämän vuoksi on kehitetty myös diffuusioavoimia ratkaisuja.



Kuva 3.2 Kapillaarisen lämmöneristeen toimintaperiaate. (Vereecken & Roels, 2016)

Diffuusioavoimen ratkaisun toiminta perustuu kapillaarisen lämmöneristemateriaalin käyttöön kuvan 3.2 tapaan. Talvella lämpötilan ja vesihöyrypitoisuuden gradientti aiheuttaa kosteusvirran sisältä ulos. Jos lämpötila tiilimuurin ja lämmöneristeen välissä laskee kastepisteen alapuolelle, syntyy kondenssi. Lämmöneristeet voidaan jakaa hygroskooppisiin ja ei-hygroskooppisiin materiaaleihin sen perusteella, kuinka hyvin ne pystyvät sitomaan kosteutta itseensä. Kapillaarinen lämmöneriste kykenee absorboimaan tiivistynyttä vettä, hygroskooppisena materiaalina varastoi- maan sitä ja siirtämään takaisin kohti sisäilmaa huokosalipaineen aiheuttaman kapillaarivirtauksen avulla. Kapillaarinen lämmöneriste kiinnitetään tiilimuriin kiinnitysllaastilla, ja laastin tartunnan on oltava yhtenäinen, jotta kondensoituvan veden kapillaarinen imeytyminen lämmöneristeeseen on mahdollista. (Vereecken & Roels, 2016)

Lämmöneristeen tulee olla riittävän hyvin lämpöä eristävä, jotta rakenteen kokonaispaksuus olisi mahdollisimman pieni. Lämmöneristemateriaaliksi ei sovellu homehtumisherkkä materiaali, joten puupohjaiset materiaalit kuten huokoinen kuitulevy eivät ole järkeviä vaihtoehtoja. Tässä luvussa on esitelty tässä työssä tutkitut kapillaariset lämmöneristemateriaalit.

3.2.1 Kapillaariset lämmöneristeet

Kalsiumsilikaatti

Kalsiumsilikaattieristeet valmistetaan höyrykarkaisemalla kalsiumin, hiekan ja veden seos autoklaavissa. Tuloksena on materiaali, jolla on suuri kokonaishuokostilavuus ja hienojakoinen huokosverkosto. Kalsiumsilikaatti on palamaton ja uutena alkalinen materiaali ($\text{pH} > 10$), jonka kuivatiheys on noin 230–300 kg/m³. Kalsiumsilikaatti on kapillaarinen ja hygroskooppinen materiaali, mikä mahdollistaa kosteuden imeytymisen ja nopean luovuttamisen. Kaikki markkinoilla olevat kalsiumsilikaattieristeet eivät kuitenkaan ole vähäisemmän kapillaarisuutensa vuoksi sisäpuoliseen lämmöneristämiseen sopivia (Weijo et al., 2019). Kalsiumsilikaattieristeet kiinnitetään kivipinnoille tarkoitukseen sopivalla erikoislaastilla. Niitä käytetään, kun rakenteelta vaaditaan kosteusrasituksen sietokykyä ja suolan varastointikykyä, esimerkiksi kellarin seinän sisäpuolisena lämmöneristeenä. (Pfundstein et al., 2012; RIL 255-1-2014, 2014)

Kalsiumsilikaattieriste voidaan pinnoittaa suoraan huokoisilla materiaaleilla, mutta yleensä sisäverhoukseksi asennetaan kalsiumsilikaattirakennuslevy, jonka päälle voidaan asentaa vesihöyryä läpäisevä pinnoite. Jotta kokonaisuus toimii halutulla tavalla, materiaalikerrosten väleihin ei saa jäädä kapillaarisen kosteudensiirron katkaisevia ilmataskuja tai diffuusiotiiviitä materiaalikerroksia. (Pfundstein et al., 2012)

Kalsiumsilikaatti on lämmöneristyskyvyltään kohtuullinen, lämmönjohtavuus λ on kuivana noin 0,06 W/(m·K). Kalsiumsilikaattiin suuren kapillaarisesti sitoutuneen vesimäärän vuoksi lämmönjohtavuus voi kuitenkin kasvaa ajoittain moninkertaiseksi. Lämmöneristämiseen tarkoitettujen kalsiumsilikaattilevyjen materiaaliominaisuuksia on mitattu Tampereen teknillisessä yliopistossa ja tuloksia on esitetty Vainion diplomityössä (2016).

Valkokalkkihydraatti

Redstonen valmistama PURA-lämmöneristyslevyn raaka-aineet ovat piioksidijauho, sammutettu kalkki ja sementti. Materiaali on alkalista ($\text{pH} \sim 9,5$) ja sen lämmönjohtavuus λ on kuivana noin 0,042 W/(m·K). PURA on kalsiumsilikaattiin verrattuna vähemmän kapillaarinen ja sen kuivatiheys 85–130 kg/m³ on kalsiumsilikaattia pienempi. PURA-levyn ominaisuudet on määritetty valmistajan materiaalikokeiden lisäksi myös Tampereen teknillisessä yliopistossa (Vainio, 2016).

Perliitti

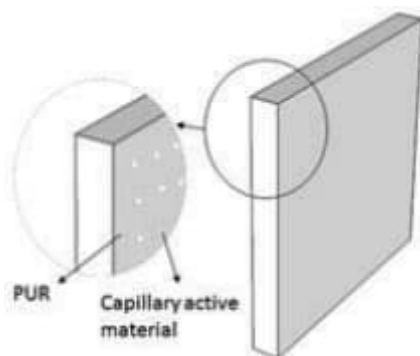
Perliitti on vulkaanista kiveä, joka laajenee korkeassa lämpötilassa tilavuudeltaan 10–20-kertaiseksi. Perliitti on ulkonäöltään valkoista, pulverimaista ainetta, jonka tilavuuspaino on luokkaa 50–100 kg/m³. Perliitistä voidaan valmistaa voimakkaasti kapillaarisia lämmöneristeitä, joilla on suuri vesihöyrynläpäisevyys. Eristelevyjen kapillaariset ominaisuudet kuitenkin vaihtelevat tuotteen ja käyttökohteen mukaan. (RIL 255-1-2014, 2014)

Kevytbetoni

Kevytbetonilla tarkoitetaan sementistä, hiekasta ja masuunikuonasta tai kalkista valettuja tuotteita. Valamisen yhteydessä massaan on lisätty alumiinijauhe, jonka aiheuttama kemiallinen reaktio vapauttaa vetykaasua, joka huokoistaa massan tilavuudeltaan moninkertaiseksi. Jäykistynyt massa paloitellaan ja höyrykarkaistaan autoklaavissa. Kevytbetoni imee kapillaarisesti vettä ja sen vesihöyrynläpäisevyys on kohtalaisen suuri. Kevytbetoni on tarkasteltavista lämmöneristeistä lämmöneristyskyvyltään heikoin, sen lämmönjohtavuus λ on kuivana noin 0,1 W/(m·K). (RIL 255-1-2014, 2014)

3.2.2 Kapillaariset komposiittimateriaalit

Kapillaaristen lämmöneristemateriaalien pohjalta on kehitetty useita tuotteita, joissa on yhdistetty kapillaarinen materiaali paremmin lämpöä eristävän materiaalin kanssa. Tuotteiden materiaaliominaisuudet ja toimintaperiaatteet vaihtelevat suuresti, mutta kalsiumsilikaattiin verrattuna tuotteet ovat huomattavasti vähemmän kapillaarisia, ne kykenevät sitomaan vähemmän kosteutta ja niiden vesihöyrynvastus on suurempi. (Vereecken & Roels, 2016)



Kuva 3.3 Remmers IQ-Therm-lämmöneriste. (Vereecken & Roels, 2016)

IQ-Therm on polyuretaanilevy, jonka läpi kulkee halkaisijaltaan 4 mm kokoisia kapillaarisella materiaalilla täytettyjä reikiä 4 cm välein. Tuotteella on hyvä lämmöneristävyys ja hieman kapillaarisia ominaisuuksia. Tuotteen vesihöyrynvastus on kuitenkin kalsiumsilikaattilevyyn verrattuna moninkertainen.

3.3 Pinnoitteet

Tässä luvussa käsitellään tiilipintoihin sopivia pinnoitteita. Tarkasteltavien pinnoitteiden tarkoituksena on parantaa sisäpuolelta lisälämmöneristetyin massiivitiiliseinän kosteusteknistä toimintaa.

3.3.1 Hydrofobiset aineet

Hydrofobisoivat impregnointiaineet vaikuttavat nestemäisen veden liikkumiseen kyllästetyssä materiaalissa. Hydrofobisten aineiden toiminta perustuu yleensä aineen tunkeutumiseen ulkoseinämaterialin huokosverkostoon ja siellä tapahtuviin kemiallisiin reaktioihin materiaalissa olevien mineraalien kanssa. Hydrofobisesta aineesta ja materiaalista riippuen materiaalin veden imeytymiskerroin voi pienentyä jopa tuhannesosaan alkuperäisestä (Soulis *et al.*, 2020).

Toimintaperiaate

Vesi on poolinen molekyyli, jonka ulkoinen sähkövaraus on vetyatomien päässä positiivinen ja happiatomin päässä negatiivinen. Myös tiili ja muut epäorgaaniset rakennusmateriaalit ovat molekyyliarakenteeltaan poolisia, joten ne voivat vetää vesimolekyyliä puoleensa. Impregnointiaineiden molekyyliarakenteen toinen pää on poolinen, mutta toinen pää varaukseton. Kun impregnointiaineen poolinen pää kiinnittyy rakennusmateriaalin huokosten pintaan, lopputuloksena on pooliton pinta, joka ei enää vedä vesimolekyyliä puoleensa. (Charola, 1995)

Hydrofobiset aineet voidaan jakaa silikonipohjaisiin, metallipohjaisiin, orgaanisiin ja nanoteknologiaan perustuviin tuotteisiin. Parhaiten tiilimuuraukseen sopivat silikonipohjaiset tuotteet. Metallipohjaiset tuotteet eivät ole tehokkaita tiilimuuraukseen, vaan niitä käytetään lähinnä luonnonkiveen. Orgaanisten aineiden heikkouksia ovat aineesta riippuen pitkäaikaiskestävyys, alttius mekaaniselle turmeltumiselle ja värimuutoksille sekä taipumus pienentää käsitellyn materiaalin vesihöyrynläpäisevyyttä. Nanoteknologiaan perustuvat tuotteet voivat olla tulevaisuudessa käytettäviä aineita, mutta niissä on edelleen kehittämistarpeita. (Charola, 1995; Roos *et al.*, 2008; Soulis *et al.*, 2020)

Silikonipohjaiset tuotteet voidaan jakaa karkeasti silaani-, siloksaani- ja silikonihartsipohjaisiin tuotteisiin. Kaikkien yhdistävä tekijä on molekyyliarakenteen piioksidi. Silaanit ovat molekyyliarakenteeltaan pieniä mono- tai dimeerisiä molekyyliä. Niillä on hyvä tunkeutumiskyky myös alkalisissa rakennusmateriaaleissa kuten betonissa. Silaanit ovat helposti haihtuvia, joten niitä käytetään muita silikonipohjaisia tuotteita suurempina 25–99 % pitoisuuksina.

Molekyylirakenteeltaan monimutkaisemmat siloksaanit ovat silaaneihin verrattuna reaktiivisempia, eivätkä ne tunkeudu syvälle alkaliseen betoniin. Siloksaanit soveltuvat kuitenkin hyvin karbonatisoituneeseen betoniin ja pH arvoltaan neutraaleihin rakennusmateriaaleihin. Suurempien molekyylien vuoksi siloksaanit eivät ole yhtä helposti haihtuvia kuin silaanit, joten impregnointiaineissa niitä voidaan käyttää pienempinä 10–15 % pitoisuuksina, korkeammat pitoisuudet voivat johtaa materiaalipinnan tummentumiseen. Soulios tutkimusryhmineen on testannut (2019) valmistajan Wacker SMK silaani- ja siloksaanituotteita myös valmistajan suositusta pienemmillä konsentraatioilla ja todennut veden imeytymiskertoimen pienentyneen merkittävästi alkuperäiseen käsittelemättömään tiilinäytteeseen verrattuna.

Silikonihartsit ovat monihaaraisia polysiloksaaneja, joita laimennetaan liuotinaineeseen 5–10 % pitoisuuksina. Silikonihartsit ovat valmiiksi polymerisoituneita molekyyliä, joten niiden vahvuus on hyvä kiinnittyminen rakennusmateriaaliin. Impregnointiaineena silikonihartsit voivat kuitenkin aiheuttaa materiaalipinnan tummentumista ja pinnan helmeilyä märkänä. (Charola, 1995; Roos *et al.*, 2008; Soulios *et al.*, 2020)

Hydrofobisoitunut kerros

Hydrofobisten aineiden tunkeutumissyvyys riippuu aineesta, käsittelyn pituudesta, aineen konsentraatiosta, käytetystä liuottimesta, kuivumisajasta ja tiilestä. Impregnointiaine muodostaa materiaalin pintaan hydrofobisoituneen kerroksen, jonka paksuus on tyypillisesti luokkaa 10 mm. Syvemmälle materiaalin huokosverkostoon muodostuu osittain hydrofobisoitunut kerros, jonka on havaittu ulottuvan useissa tiilissä useiden senttimetrien syvyyteen tiilen pinnasta. (Soulios *et al.*, 2020)

Suuria huokosia sisältävien materiaalien, kuten tiilen, huokosverkoston kyky kosteuden varastointiin ei vaikuta muuttuvan merkittävästi hydrofobisen käsittelyn jälkeen. Näin ollen impregnoitun tiilen tasapainokosteuskäyrää voidaan pitää lähes muuttumattomana. Soulios, de Place Hansen ja Janssen tutkimusryhmineen ovat havainneet (2019) erään tiilen maksimikosteuspitoisuuden vähentyneen noin 6 %. Lisäksi huokoskoon jakauman määrittäminen (mercury intrusion porosimetry) osoitti impregnoitukäsittelyn vähentävän hieman pienimpien huokosten suhteellista osuutta, mutta kokonaisuudessaan muutokset tiilen ja kalkkilaastin huokosjakaumassa ovat pieniä. Käsittelyn vaikutus kapillaariseen kosteudensiirtoon ja materiaalin huokosverkostoon kasvattaa materiaalin vesihöyrynvastusta hieman. Märkäkuppikokeissa impregnoitun kalkkilaastin vesihöyrynvastus kasvoi noin 20 % ja eri tiilillä 10–25 %. (Soulios *et al.*, 2020) Myös Hansen tutkimusryhmineen (2018) on havainnut nykyaikaisten impregnointiaineiden vähentävän tiilen vesihöyrynläpäisevyyttä vain vähän.

Koska hydrofobinen pinnoite vähentää veden tunkeutumista rakenteeseen, se parantaa myös rakenteen lämmöneristävyttä. Lämmöneristyskyvyn paraneminen johtuu siitä, että hydrofobisen aineen vaikutuksesta tiili ja lämmöneristeratkaisu pysyvät läpi vuoden kuivempana, jolloin materiaalien lämmönjohtavuus on pienempi kuin märkänä. Toisaalta liian heikko pinnoite, jolla veden imeytymiskerroin ei pienene tarpeeksi paljon, voi toimia tavallaan kuin halkeama heikentäen rakenteen lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa. Ongelma voi syntyä pinnoitteen puutteellisesta asennuksesta, esimerkiksi kun pinnoittaminen on toteutettu puhdistamattomalle materiaalipinnalle (Soulis *et al.*, 2020). Näytteenotto vanhasta tiiliseinästä auttaa riittävän vettä hylkivän ominaisuuden ja tunkeutumissyvyyden määrittämisessä ja siten myös kohteeseen sopivan tuotteen ja asennustavan valinnassa. (Soulis, de Place Hansen & Peuhkuri, 2021a)

Impregnointiaineen käyttö ja pinnoitteen säilyvyys

Tiilen pinnoittaminen kannattaa ajoittaa kuivaan vuodenaikaan ja toteuttaa ennen sisäpuolisen lisäeristysjärjestelmän asentamista. Rakenteen kuivumisaika tehokkaan pinnoittamisen jälkeen voi olla pitkä. On suositeltavaa antaa rakenteen kuivua pinnoittamisen jälkeen ennen sisäpuolisen eristämisen tekemistä. (Künzel & Kießl, 1996)

Tanskalaisen tutkimusryhmän tekemien mittausten mukaan (Soulis *et al.*, 2021b) tiili ja kalkkilaasti säilyttävät kyllästysaineella saavutetut vedenimeytymistä estävät ominaisuutensa pitkäaikaisesti. Kokeissa havaittiin myös, että joillakin aineilla vanheneminen sään vaikutuksesta voi vähentää veden imeytymistä edelleen ja parantaa kyllästysaineen toimivuutta. Tämä perustuu impregnointiaineissa käytettyjen emulgointiaineiden liukenemiseen sadeveden tai kondenssiveden avulla, jolloin impregnointiaineen aktiivinen ainesosa kykenee muodostamaan uusia sidoksia huokosrakenteen kanssa. Testikappaleiden mittaustulokset vastasivat kenttäkokeissa saatuja tuloksia kuuden vuoden jälkeen ja visuaalisesti tarkasteltuna impregnointiaineilla oli havaittavia vaikutuksia rakenteen säilyvyyteen. Impregnoidut näytekappaleet säilyttivät ulkoisen olemuksensa kokeen jälkeen, sen sijaan käsittelemättömät kappaleet osoittivat rapautumisen merkkejä. (Soulis *et al.*, 2021b)

Impregnointiaineiden käytössä tiiliverhotuissa ulkoseinissä on havaittu ongelmia. Slapø toteaa julkaisussaan (2017), että impregnointiaineet toimivat hyvin tiilessä, mutta muuratun rakenteen halkeamat ja suuret huokokset ovat ongelmallisia. Impregnoidut tiiliverhoukset päästävät kosteutta kapillaarisesti sisään, mutta estävät sitä poistumasta. Ohuthiekokeissa havaittiin tiilen ja laastin välissä ilmanavia, eikä niitä voida suojata veden tunkeutumiselta impregnointiaineella. Ohut tiiliverhous halkeilee lämpöliikkeiden johdosta merkittävästi massiivitiiliseinästä enemmän, mikä osaltaan selittää impregnointiaineiden parempaa toimivuutta massiivitiiliseinässä.

3.3.2 Rappaukset

Rappauslaastit voidaan jakaa sideaineen laadun perusteella kalkki-, kalkkisementti- ja sementtilaasteihin. Kalkkilaasti on veden, kiviaineksen ja sammutetun kalkin seos. Kalkki on kovettumistavasta riippuen ilmakalkkia tai hydraulista kalkkia. Ilmakalkki kovettuu karbonatisoitumalla kostean ilman hiilidioksidin vaikutuksesta. Hydraulinen kalkki muodostaa lujuutta veden vaikutuksesta, ja toimintaperiaatteeltaan ne voidaan rinnastaa vähän sementtiä sisältävään kalkkisementtilaastiin. (Lahdensivu, 2005; Lahdensivu *et al.*, 2021)

Kalkkisementtilaastin sideaine on sekoitus ilmakalkkia ja sementtiä. Sementti parantaa lujuutta ja säänkestävyyttä, mutta lisää kutistumaa ja vaikeuttaa laastin työstettävyyttä. Puhtaassa sementtilaastissa sideaine on sementtiä tai muurausementtiä ja sen kovettuminen tapahtuu sideaineen reagoitessa veden kanssa. (Lahdensivu, 2005; Lahdensivu *et al.*, 2021)

Koville alustoille, kuten tiilimuuriin, tehtäviä rappaustyypppejä ovat kolmikerrosrappaus, kaksikerrosrappaus ja yksikerrosrappaus. Nimensä mukaisesti kolmikerrosrappaus koostuu kolmesta eri laastilla lyödystä kerroksesta, jotka ovat tartuntarappaus, täyttörappaus ja pintarappaus. Käytetyt laastit ovat kalkki- ja kalkkisementtilaasteja ja rappauksen kokonaispaksuus on tavallisesti 25...30 mm. Ilman täyttörappauskerrosta toteutettava kaksikerrosrappaus voidaan tehdä sekä kalkkisementti- että sementtilaasteilla, ja sen kokonaispaksuus on luokkaa 10...15 mm. Yksikerrosrappaus on ohut ja koostuu yhdestä sementti- tai kalkkisementtilaastikerroksesta. Yksikerrosrappaus jättää pinnan tekstuuriin näkyviin, joten rappausalustan on täytettävä puhtaaksi muuratun julkisivun ulkonäkövaatimukset. (Lahdensivu, 2005; Lahdensivu *et al.*, 2021)

Rappauksen pinnoitteet

Rappaus voidaan pinnoittaa läpäisevällä tai suojaavalla pinnoitteella. Läpäiseviä pinnoitteita ovat epäorgaaniset kalkki-, kalkkisementti- ja sementtipinnoitteet sekä silikaattimaalit. Läpäisevien pinnoitteiden käyttö rapatuissa julkisivuissa on rakennusfysikaalisesti turvallista ja suositeltavaa. (Lahdensivu, 2005)

Suojaavien pinnoitteiden tarkoituksena on hidastaa julkisivun kastumista sateella tai suojata rapausta likaantumislta ja graffitien tarttumislta. Kastumiselta suojaavien pinnoitteiden tarkoituksena on estää sadeveden kertyminen rappaukseen ja tiilimuuriin, mutta läpäistä hyvin vesihöyryä ja mahdollistaa siten rakenteiden kuivuminen. Tällaisia pinnoitteita ovat esimerkiksi silikonihartsipinnoitteet. Myös rappauksille voidaan käyttää impregnointiaineita. Tiilimuureihin käytettävien impregnointiaineiden tavoin, myös rappauksen impregnoinnissa on epävarmuustekijänä halkeamien kautta rappauksen taakse imeytyvä sadevesi. Impregnointiaineet soveltuvat käytettäväksi hyväkuntoisissa, lujissa ja pakkasenkestävissä julkisivuissa. (Lahdensivu, 2005)

Tiiviiden orgaanisten pinnoitteiden, kuten akryyli- ja akrylaattipinnoitteet, käyttöä ei suositella. Rappauksen pintaan muodostuva yhtenäinen kalvo estää kastumisen ja kuivumisen, ja rappauspinnan epäjatkuvuuskohdista pinnoitteen taakse pääsevä sadevesi aiheuttaa riskin rappauksen pakkasrapautumiseen ja pinnoitteen irtoamiseen. (Lahdensivu, 2005)

Peittävä korjaus rappamalla

Tiilimuurin rappaminen ja pinnoittaminen alentaa sen kosteusrasitustasoa, mutta muuttaa julkisivun ilmettä. Korjaus sopii heikosti pakkasenkestäville julkisivuille, joissa ei kuitenkaan vielä esiinny laaja-alaista pakkasrapaamaa. Peittävään rappaukseen käytetään pakkasenkestäviä kalkkimentti- tai sementtilaasteja, ja valittavan laastikoostumuksen määrittää julkisivulle kohdistuva saderasitus taulukon 3.1 mukaan. Rappauksen ja tiilialustan kastumista voidaan vähentää silikonihartsipinnoitteella tai muulla suojaavalla pinnoitteella. Silikonihartsipinnoitteet ovat suosituttuja hyvän vesihöyrynläpäisevyytensä ja vedenhylkivyytensä vuoksi. Ne vähentävät sadeveden imeytymistä rappaukseen, mutta mahdollistavat rappauksen nopean kuivumisen. (Lahdensivu *et al.*, 2021)

Taulukko 3.1 Vanhan rappauksen uusiminen massiivisissa tiilimuureissa. Suositeltavat laastiyhdistelmät ulkoisten rasitusten mukaan. (Lahdensivu, 2005)

Alustat	Poltettu tiili, kalkkihikkakivi (massiivinen tiilimuuri)		
Alustan imukyky	Suuri vedenimukyky, suuri kosteuskapasiteetti		
Olosuhteet	Tartunta	Täyttö	Pinta
1. Tavanomainen rasitus	65/35/500	70/30/500	K 100/600 ¹⁾
2. Voimakas rasitus	35/65/400	50/50/600	50/50/600
3. Erityisrasitukset	Tapauskohteisesti sementtipohjaiset erikoislaastit valmistajan ohjeen mukaan.		

Mikäli käytetään kalkkipitoisempia laasteja, pakkasenkestävyys on osoitettava laboratoriokeuin kohdekohtaisesti.

¹⁾ Puhtaita kalkkilaasteja käytettäessä on otettava huomioon niiden hidas lujoudenkehitys. Laastit tulee suojata säärasituksilta ensimmäisen talven aikana ja pintakäsittellä vasta seuraavana kesänä.

Rappaminen muuttaa puhtaaksi muuratun julkisivun ilmettä, eikä se ole rakennussuojelun kannalta yleensä hyväksyttävä ratkaisu. Yleensä peittävän rappauksen yhteydessä uusitaan vedenpoistojärjestelmä ja pellitykset. Myös julkisivun liittymien kosteusteknistä toimintaa voidaan parantaa. (Lahdensivu *et al.*, 2021)

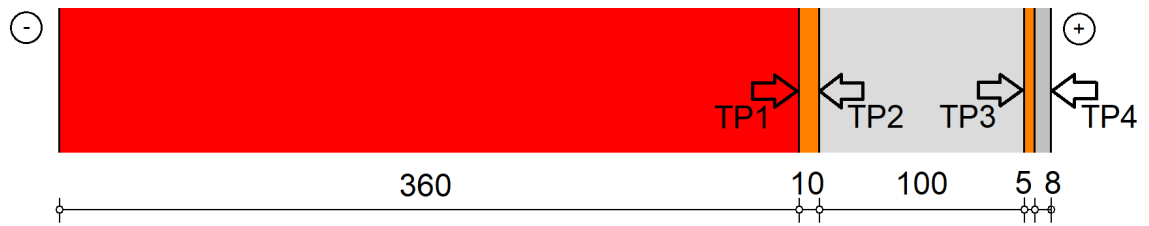
3.4 Tutkittavat rakenteet ja tarkastelupisteet

Useiden Pohjois-Euroopassa esiintyvien seinäpaksuuksien joukosta tässä työssä perustapaukseksi valittiin 360 mm paksu massiivitiiliseinä. Rakenteen lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa on tarkasteltu kuudella eri lämmöneristeellä, joiden paksuudeksi on valittu 100 mm. Suomessa esiintyvien seinäpaksuuksien 450 mm ja 600 mm lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa on tarkasteltu kalsiumsilikaattieristeellä. Tutkittavat rakenteet on esitetty taulukossa 3.2.

Taulukko 3.2 Tutkittavat rakenteet. Alkuperäisten rakenteiden U-arvot ovat sulkeissa.

Rakenne	Rakennekerrokset (ulkopinnasta sisäpintaan)	U-arvo [W/(m ² ·K)]
US1	Tiiliseinä 360 mm	(1,31)
US2	Tiiliseinä 360 mm + erikoislaasti 10 mm + kalsiumsilikaatti 100 mm + erikoislaasti 5 mm + K-levy 8 mm + silikaattimaali	0,43
US3	Tiiliseinä 360 mm + kiinnityslaasti 10 mm + perliitti 100 mm + tasoite 5 mm + silikaattimaali	0,33
US4	Tiiliseinä 360 mm + kiinnityslaasti 7 mm + IQ-Therm 100 mm + tasoite 10 mm + silikaattimaali	0,26
US5	Tiiliseinä 360 mm + erikoislaasti 10 mm + valkokalkkihydraatti 100 mm + erikoislaasti 5 mm + K-levy 8 mm + silikaattimaali	0,33
US6	Tiiliseinä 360 mm + erikoislaasti 10 mm + alumiinilaminaatilla pinnoitettu polyuretaanilevy 100 mm + erikoislaasti 5 mm + kipsilevy 12,5 mm + silikaattimaali	0,19
US7	Tiiliseinä 360 mm + erikoislaasti 10 mm + kevytbetoni 100 mm + erikoislaasti 5 mm + silikaattimaali	0,63
US8	Tiiliseinä 600 mm + erikoislaasti 10 mm + kalsiumsilikaatti 100 mm + erikoislaasti 5 mm + K-levy 8 mm + silikaattimaali	0,37 (0,86)
US9	Tiiliseinä 450 mm + erikoislaasti 10 mm + kalsiumsilikaatti 100 mm + erikoislaasti 5 mm + K-levy 8 mm + silikaattimaali	0,41 (1,10)
US10	Tiiliseinä 230 mm + erikoislaasti 10 mm + kalsiumsilikaatti 100 mm + erikoislaasti 5 mm + K-levy 8 mm + silikaattimaali	0,48 (1,82)

Taulukossa 3.2 on esitetty myös alkuperäisten lämmöneristemättömien rakenteiden U-arvot. Tarkasteltavan lämmöneristepaksuuden valinnassa on otettu huomioon vaatimus puolittaa korjaus- ja muutostöiden yhteydessä vanhan rakenteen U-arvo myös seinäpaksuudella 600 mm (YM, 2013). Rakenteet US2–US7 eroavat toisistaan lämmöneristeen perusteella ja rakenteet US2, US8, US9 ja US10 tiiliseinän paksuuden perusteella. Tarkasteltavien rakenteiden lisäksi lämmöneristeen paksuuden, tiiliseinän ulkopinnan pinnoitteiden ja erilaisten sisäverhousratkaisujen vaikutusta on tarkasteltu erikseen.



Kuva 3.4 Rakenne US2 ja tutkittavat tarkastelupisteet.

Rakenteiden kosteusteknistä toimintaa tutkitaan neljässä tarkastelupisteessä, jotka sijaitsevat kaikissa rakenteissa kuvan 3.4 osoittamissa kohdissa. Tarkastelupiste 1 sijaitsee tiilimuurin ja kiinnityslaastin välissä, tarkastelupisteet 2 ja 3 lämmöneristeen ulko- ja sisäpinnassa ja tarkastelupiste 4 sisäverhouslevyn sisäpinnassa. Alkuperäisellä rakenteella US1 on vain tarkastelupiste 1 tiilimuurin sisäpinnassa.

Saksalaisen Redstonen valmistaman kalsiumsilikaattilevyn ja valkokalkkihydraattilevyn asennuksessa käytetään valmistajan omaa erikoislaastia. Sisäverhouslevynä käytetään näiden kanssa yhteensopivaa kalsiumsilikaatti-rakennuslevyä (Redstone K-levy). Lämmöneristeistä Knaufin valmistaman perliitti-lämmöneristyslevyn ja Remmersin valmistaman IQ-Therm-lämmöneristeen yhteydessä on käytetty valmistajien omia kiinnityslaasteja ja tasoitteita. Käytettyjen materiaalien ominaisuudet lähteineen on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä A.

4. TUTKIMUSMENETELMÄT JA LÄHTÖTIEDOT

Rakenteiden toimivuuden arvioimiseksi käytettiin TTY:llä FRAME-projektin yhteydessä valmistunutta rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmää. Tässä luvussa esitellään analysointimenetelmän osat ja laskennan suorittamiseen vaikuttavat keskeiset tekijät ja valinnat. Tutkimuksessa käytetyt materiaaliominaisuudet on esitelty liitteessä A ja ulkoilman olosuhteet liitteessä C.

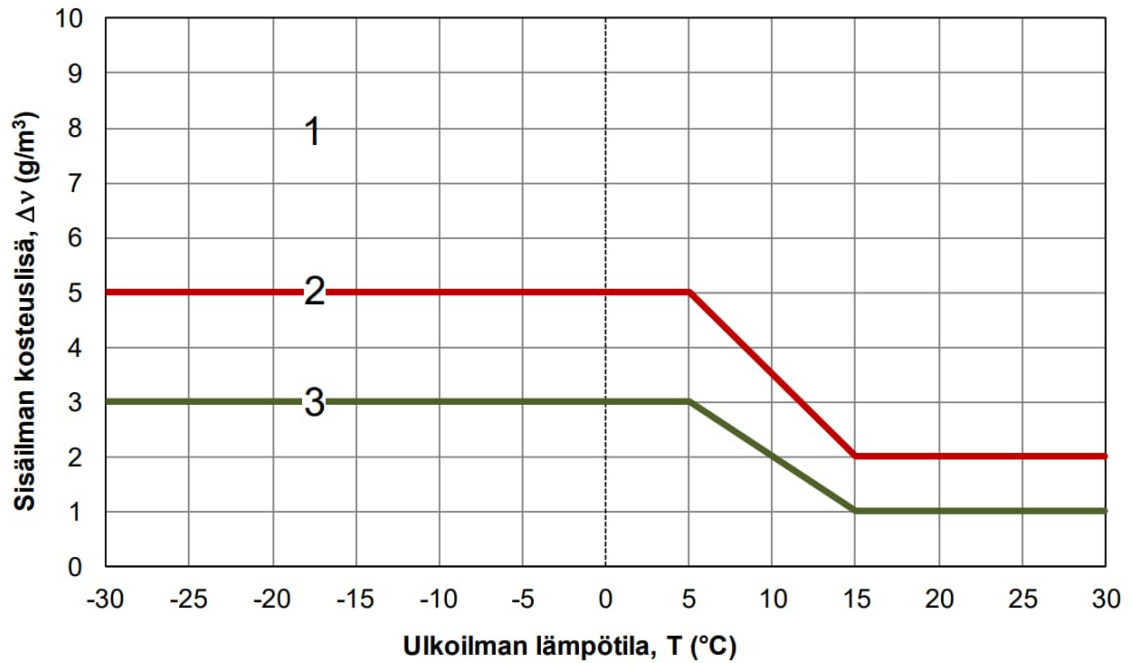
4.1 Ulko- ja sisäilmaolosuhteet

Rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta kriittiset ulkoilman olosuhteet kuvataan rakennusfysikaalisten testivuosien avulla. Testivuodet on laadittu FRAME-projektissa ja silloista nykyilmastoa edustivat testivuodet Jokioinen 2004 ja Vantaa 2007. Testivuodet on laadittu myös tulevaisuuden ilmastoissa ennustetun ilmastonmuutoksen perusteella vuosille 2050 ja 2100. (Vinha *et al.*, 2013a)

Vantaan testivuodet ovat mitoittavia rakennetyypeille, joissa keskeisin rakenteen kosteustekniseen toimintaan vaikuttava tekijä on viistosade. Jokioisten testivuodet ovat mitoittavia rakenteille, joiden toimintaan vaikuttava pääasiallinen rasitus on pitkäaikainen korkea ilman suhteellinen kosteus. (Vinha *et al.*, 2013a) Käytettävien testivuosien sademäärissä on mukana lumisateen osuutta, mutta 0 °C kylmemmässä lämpötilassa tulevaa sadetta ei oteta työssä käytettävissä laskentaohjelmissa huomioon.

Vantaan testivuosia käytettäessä mitoittavaksi seinän ilmansuunnaksi valitaan etelä. Eteläsivulla viistosateen määrä on suurin, jolloin kapillaarisesti tiiliseinään siirtyvää vettä on eniten tarjolla. Myös auringon lämmittävä vaikutus on suurin, jolloin sadekuurojen jälkeen kosteuden siirtyminen ulkopinnasta rakenteen sisään diffuusiolla tehostuu. Jokioisten testivuosia käytettäessä mitoittavaksi ilmansuunnaksi valitaan pohjoinen, jossa auringon säteilyn seinää kuivattava ja lämmittävä vaikutus on vähäinen ja ilman suhteellinen kosteus korkeampi. (Vinha *et al.*, 2013a)

Ilmastonmuutoksen on havaittu etenevän rakennusfysikaalisten vaikutusten kannalta vielä ennakoitua nopeammin. Rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta vuoden 2050 olosuhteita vastaava vuosi realisoitui jo 2010-luvulla (Vinha, 2021). Tästä johtuen tässä työssä nykyhetken ilmasto-olosuhteita mallinnetaan jo vuoden 2050 mitoitusvuosilla. Pinnoitetulle tiiliseinälle käytetään testivuosia Jokioinen 2050 ja Jokioinen 2100. Pinnoittamattomalle tiiliseinälle ja alkupe räiselle rakenteelle käytetään testivuosia Vantaa 2050 ja Vantaa 2100. Rakennusfysikaalisia testivuosia ollaan parhaillaan päivittämässä paremmin ilmaston nykytilaa ja tulevia olosuhteita vastaaviksi.



Kuva 4.1 Sisäilman kosteuslisän mitoitusarvot ulkoilman lämpötilan funktiona eri kosteusluokissa. (RIL, 2012)

Taulukko 4.1 Sisäilman kosteuslisän perusteella määritettyihin kosteusluokkiin kuuluvat rakennustyytit. (RIL, 2012)

Kosteusluokka	Kosteuslisän mitoitusarvo talvella ($T \leq 5 \text{ °C}$)	Rakennustyyppi ^(3,4)
1	$> 5 \text{ g/m}^3$ ⁽¹⁾	Kylpylät, uimahallit, laitoskeittiöt, pesulat, panimot, kirjapainot, kasvihuoneet, kostutetut tilat, ratsastusmaneesit, maatalouden tuotantorakennukset, eläinsuojat, teollisuuden kosteusrasitetut tilat
2	5 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 ^(5,6) , kylmä- ja pakkahuoneet ^(5,6) , talviasuttavat vapaa-ajan asunnot
3	3 g/m^3 ⁽²⁾	Vapaa-ajan asunnot, puolilämpimät tai kylmillään olevat rakennukset, varastot ja säilytystilat, ajoneuvosuojat, tekniset tilat, väliaikaiset ja siirrettävät rakennukset

Sisäilman kosteuslisällä kuvataan ulko- ja sisäilman välistä vesihöyrypitoisuuseroa, mikä syntyy mm. sisätilojen asumistoiminnoista ja käyttövedestä. RIL:n (2012) mukainen sisäilman kosteuslisä on esitetty kosteusluokittain kuvassa 4.1, ja kosteusluokat on määritelty rakennustyypeittäin taulukossa 4.1. Kosteusluokkaan 2 kuuluvan rakennuksen sisäilman kosteuslisäksi kesällä tulee valita RIL:n mukaan 2 g/m^3 . Laskennan alkuvaiheessa huomattiin, että tällöin sisäilman suhteellinen kosteus kesäaikaan on noin 10 %-yksikköä korkeampi kuin ilman kosteuslisää. Vaikutti epätodennäköiseltä, että suhteellinen kosteus sisäilmassa ylittää 75 % RH pitkiä aikoja, joten tässä työssä kesäaikaiseksi sisäilman kosteuslisäksi valittiin 0 g/m^3 . RIL:n mukaisen kosteuslisän vaikutusta sisäpuolisen lämmöneristeen toimivuuteen on tarkasteltu erillisellä herkkystarkastelulla. Sisäilman olosuhteiksi valittiin vakioilämpötilä 21 °C ja sisäilman kosteuslisäksi talvella 5 g/m^3 .

4.2 Suomalainen homemalli

Homeen ja mikrobien kasvua voidaan arvioida Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen (VTT) ja TTY:n kehittämän Suomalaisen homemallin avulla. Homemallissa otetaan huomioon muuttuvat lämpötila- ja kosteusolosuhteet. Homeiden ja mikrobien kasvua materiaalien pinnoilla, ja materiaalien välisillä rajapinnoilla voidaan laskea riippuen tarkastelupisteen olosuhteista ja materiaalin homeutumisherkkyydestä. Homeindeksi M [-] kuvaa homeen määrän kumulatiivista lisääntymistä materiaalin pinnalla ja sen arvo vaihtelee välillä 0–6. (Vinha *et al.*, 2013b) Suomalaisen homemallin mukaiset homeindeksin luokitustasot perustuvat visuaalisiin havaintoihin ja ne on kuvattu sanallisesti taulukossa 4.2. Homeindeksin ollessa pienempi kuin 1 homeen kasvua ei esiinny.

Taulukko 4.2 Suomalaisen homemallin homeindeksin luokitustasot. (Vinha *et al.*, 2013a)

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

Keskeisenä rakenteiden kosteusteknisen toiminnan vertailussa käytettävänä arvona käytetään homeindeksin maksimiarvoa M_{max} . Homemallia käytettäessä tulee pohtia missä rakennekerroksissa homeen kasvua ei voida sallia. Tässä työssä homeen kasvua ei sallita kantavan rakenteen sisäpinnassa, lämmöneristekerroksessa tai sen sisäpuolisissa rakenteissa. Ulkoilman olosuhteissa homeen kasvu tulee voida sallia. Kun homeen kasvua ei sallita lainkaan, homeindeksin maksimiarvon raja-arvoksi valitaan $M_{max} < 1$.

Suomalaisessa homemallissa rakennusmateriaalit on jaettu homeutumisherkkyytensä perusteella homeutumisherkkyydsluokkiin (HHL) ja homeen taantumaluokkiin (HTL). Herkimät materiaalit kuuluvat homeutumisherkkyydsluokkaan HHL1 (hyvin herkkä) ja kestävimät materiaalit homeutumisherkkyydsluokkaan HHL4 (kestävä). Materiaalit jaetaan homeutumislukkiin homeen kasvun liikkeelle lähden ja homeutumisen maksimitason mukaan erikseen, mutta yleensä materiaalit kuuluvat molempien ominaisuuksien suhteen samaan luokkaan. Materiaalien luokittelu homeutumisherkkyydsluokkiin on esitetty taulukossa 4.3.

Taulukko 4.3 *Suomalaisen homemallin homehtumisherkkyyssuokat. (Vinha et al., 2013a)*

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

¹ Kevytbetoni kuuluu homehtumisominaisuuksiltaan kahteen eri homehtumisherkkyyssuokkaan. Homeen kasvunopeus vastaa homehtumisherkkyyssuokkaa HHL2, mutta homeindeksin maksimiarvo jää homehtumisherkkyyssuokan HHL3 tasolle.

Epäsuotuisissa olosuhteissa homeen kasvu taantuu ja homeindeksin arvo pienenee. Homeen kasvu ei ole mahdollista liian kylmissä tai kuumissa olosuhteissa, lämpötilan olleessa pienempi kuin 0 °C tai korkeampi kuin 50 °C. Homeen kasvu taantuu myös liian kuivissa olosuhteissa ja homeen kasvun kannalta kriittinen suhteellinen kosteus riippuu materiaalin homehtumisherkkyyssuokasta. Homehtumisherkkyyssuokkien HHL1 ja HHL2 materiaaleilla kriittinen raja on 80 % RH ja homehtumisherkkyyssuokkien HHL3 ja HHL4 materiaaleilla 85 % RH. (RIL 255-1-2014, 2014) Materiaalit jaetaan homekasvun taantumaluokkiin taulukon 4.4 mukaan.

Taulukko 4.4 *Homehtumisherkkyyssuokkia vastaavat homekasvun taantumaluokat Suomalaisen homemallin mukaan. (Vinha et al., 2013a)*

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

Tässä työssä on valittu laskennallisiin tarkasteluihin sellaisia lämmöneristemateriaaleja, jotka kuuluvat homehtumisherkkyyssuokkaan HHL3 (kohtalaisen kestävä). Poikkeuksen tekee kevytbetoni, joka kuuluu homeen maksimimäärän osalta luokkaan HHL3, mutta homeen kasvunopeuden osalta luokkaan HHL2 (herkkä). Kaikkien tässä työssä käytettyjen lämmöneristemateriaalien ja tiilien kuulumista tiettyyn homehtumisherkkyyssuokkaan ei ole osoitettu. Mineraalipohjaiset tuotteet kuuluvat yleensä luokkaan HHL3, mutta kalsiumsilikaatin ja valkokalkihydraatin alkalisuus tarkoittaa, että ne voisivat ainakin uutena kuulua luokkaan HHL4. Laskennat suoritettiin kuitenkin luokan HHL3 mukaan ja materiaalien alkalisuus toimii lisävarmuutena.

Homemallin avulla homeen kasvua voidaan mallintaa eri pisteissä rakennetta niin pitkälle aikavälille kuin tunneittaisia lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvoja kyseisille pisteille on saatavissa. Homeindeksin laskeminen usealla peräkkäisellä testivuodella kuitenkin lisää laskennan epävarmuustekijöitä, jotka aiheutuvat toistuvista homeen kasvun ja taantumien ajanjaksoista. Pitkällä aikavälillä homeindeksin arvo voi kumuloitua peräkkäisten vuosien aikana, vaikkei homeen kasvu todellisessa rakenteessa lisääntyisikään. Tästä syystä kriittisiä testivuosia käytettäessä homeindeksin pisin suositeltu laskenta-ajanjakson pituus on yksi vuosi. Kriittisten vuosien esiintyminen peräkkäin on epätodennäköistä, jonka vuoksi homeindeksin tarkastelu käyttäen montaa peräkkäistä testivuotta voi mennä liian kriittiseksi. (Vinha *et al.*, 2013a; Vinha *et al.*, 2013b)

Yleensä homeindeksin laskenta suoritetaan rakennusfysikaalisen testivuoden alusta loppuun. Sisäpuolelta lämmöneristetyissä massiivitiiliseinissä homeen kasvun kriittinen ajanjakso ei kuitenkaan koostu pelkästään syksyllä ja keväällä toistuvista homeen kasvulle otollisista jaksoista, vaan homeen kasvua voi tapahtua läpi talven. Homeindeksin tarkastelujakso tulee valita siten, että koko homeen kasvun kriittinen ajanjakso tulee yhtenäisenä mukaan laskentaan, joten homeindeksi on laskettu tässä työssä rakennusfysikaalisen testivuoden heinäkuun alusta alkaen.

4.3 WUFI-laskentaohjelmat

WUFI Pro 6.5 (Wärme und Feuchtetransport instationär) on saksalaisen Fraunhofer-instituutin kehittämä epästationäärisen lämmön- ja kosteuden siirtymisen mallintamiseen käytetty tietokoneohjelma. WUFI 2D 4.3 on ohjelman 2D-versio.

4.3.1 Laskentaverkko

WUFI-ohjelmissa on sisäänrakennettuna oma verkotustyökalu, jolla tarkasteltava rakenne jaetaan laskentaelementteihin. Laskentaverkot on määritetty manuaalisesti seuraavien periaatteiden mukaisesti:

1. Ulko- ja sisäilmaan rajautuvilla materiaaleilla reunimmaisten elementtien koko on pieni, alle millimetri.
2. Materiaalien välisillä rajapinnoilla elementtien koko on pieni, alle millimetri.
3. Materiaalikerrosten sisällä laskentaverkko harvenee siten, että peräkkäisten elementtien koko muuttuu maltillisesti, laajenemiskerroin on noin 1,1.

Ohjelman 2D-versiossa tarvitaan myös pystysuuntainen laskentaverkotus. Sen määrittämisessä on käytetty samoja edellä mainittuja periaatteita.

4.3.2 Alkuolosuhteet ja laskettavien vuosien määrä

Alkuolosuhteiksi valittiin kaikissa materiaaleissa 70 % RH suhteellinen kosteus ja lämpötilaksi koko rakenteessa 20 °C. Simulaatiot suoritettiin laskemalla sama testivuosi useita kertoja peräkkäin, kunnes olosuhteet rakenteessa tasaantuvat siten, etteivät peräkkäisten vuosien lämpötila- ja kosteusjakaumat rakenteessa enää muutu. Lämpötilan tasaantuminen rakenteessa tapahtuu yleensä nopeasti, mutta rakenteiden sisäisten kosteuspitoisuusjakaumien vastaava tasaantuminen edellyttää paljon pidempiä aikoja. Simulaatioissa alkuolosuhteiden havaittiin muuttuneen testivuoden alkua vastaaviksi toisen vuoden alusta. WUFI 2D -ohjelmalla tehdyt simulaatiot ovat kolmen vuoden mittaisia ja rakenteiden kannalta kriittinen tarkasteluvuosi alkaa toisen vuoden heinäkuusta ja päättyy kolmannen vuoden heinäkuuhun. Simulaatio kesti keskimäärin noin 40 minuuttia. WUFI Pro -ohjelmalla laskenta-aika on varsin lyhyt, minuutista kolmeen minuuttiin, joten simulaation pituudeksi valittiin viisi vuotta.

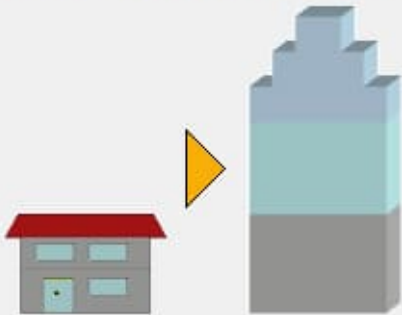
4.3.3 Viistosade

Todellisiin sääolosuhteisiin vaikuttaa rakennuksen sijainnin lisäksi myös rakennuksen ympäristönsä kanssa muodostama mikroilmasto. Seinälle tulevan viistosateen määrään vaikuttavat mm. rakennuksen korkeus, muoto ja räystäät sekä tarkasteltava ilmansuunta. Viistosateesta rakenteeseen imeytyvän veden määrä perustuu materiaaliominaisuuksien lisäksi kokeellisesti määritettyyn sateen absorptiokertoimeen (Künzel, 1995).

Viistosateesta seinän ulkopintaan imeytyvän veden määrään vaikuttaa keskeisesti, mikä osuus sadepisarosta jää osuessaan seinäpintaan eikä roiskahda pois. WUFI:n asetuksissa tätä ilmiötä kuvaa ns. sateen absorptiokerroin, ohjelmassa nimeltään adhering fraction of rain. Künzel (1995) on havainnut, että hyvä korrelaatio lasketun ja mitatun kosteuden siirtymisen välille saavutetaan kertoimen arvolla 0,7.

Building Height/Driving Rain Coefficients

Rain load calculation according to ASHRAE Standard 160



R1 [-]

R2 [s/m]

Note:
Rain Load =
 $\text{Rain} \cdot (R1 + R2 \cdot \text{Wind Velocity})$

Tall Building, middle part, up to 10-20 m

Kuva 4.2 Viistosateen kertoimet.

WUFI-ohjelmissa seinäpintaa rasittava viistosade lasketaan kuvan 4.2 mukaisella tavalla. Viistosateen laskemiseksi vaakapinnalle tuleva sade kerrotaan rakennuksen korkeudesta ja tarkasteltavan kohdan korkeudesta riippuvalla kertoimella R_2 ja tuulen nopeuden seinätason normaalin suuntaisella komponentilla. Valittu viistosateen määrä edustaa korkean rakennuksen keskiosaa, joten viistosateen määrä voi olla korkean rakennuksen yläosissa paikoin tässä työssä käytettyä suurempi.

4.3.4 Hydrofobisen kerroksen mallintaminen

Hydrofobinen rakenteen pintakerros voidaan mallintaa kahdella eri tavalla. Alkuperäiseen rakenteeseen voidaan lisätä vesihöyryn siirtymistä hidastava pintavastus ja rajoittaa nestemäisen veden pääsyä rakenteeseen asettamalla sateen absorptiokerroin alhaiseksi tai muuttamalla viistosateen määrää säätiedostossa (Soulios, de Place Hansen & Peuhkuri, 2021a). Tässä tavassa on kuitenkin se huono puoli, että tiili pääsee kuivumaan myös kapillaarisesti ulkoilmaan, mikä ei ole hydrofobisten kerrosten läpi mahdollista. Todellisuudessa kuivuminen hydrofobisen kerroksen läpi tapahtuu pääasiassa diffuusiolla.

Rakenteen todellista toimintaa mallinnetaan paremmin määrittelemällä tiiliseinän uloin osa hydrofobisella aineella kyllästetyn tiilen ominaisuuksia vastaavaksi. Tälle kerrokselle asetetaan pienempi veden imeytymiskerroin ja hieman suurempi vesihöyrynvastus. Tällä tavoin rakenteen estynyt kapillaarinen kuivuminen otetaan huomioon toisin kuin ensimmäisessä vaihtoehdossa.

Tutkittaviin rakenteisiin liittyy oletus, että suuret halkeamat paikataan ennen pinnoitekäsittelyä, eivätkä pienet halkeamat ulotu pinnoitteen tunkeutumissyvyyttä pidemmälle. Künzel ja Kießl (1996) ovat todenneet, että pienet alle yhden millimetrin halkeamat eivät vaikuta veden kulkutukseen, jos ne on perusteellisesti kyllästetty ja seinämateriaalilla on riittävän alhainen ilmanläpäisevyys.

4.3.5 Pintojen siirtokertoimet ja pitkäaaltoinen lämpösäteily

Materiaalikohtaiset ulkopinnan säteilyominaisuudet on esitetty taulukossa 4.5. Auringonsäteilyn absorptiokertoimet α_s , pitkäaaltoisen säteilyn absorptiokertoimet α_w ja pitkäaaltoisen säteilyn emissiviteetit ϵ_{lw} ovat peräisin WUFI:n sisäänrakennetuista arvoista. Tarkasteltavan rakennuksen ajatellaan sijaitsevan todennäköisesti kaupunkiympäristössä, joten maan pinnan lyhytaaltoisen säteilyn heijastuskertoimeksi ρ_s valittiin 0,6.

Taulukko 4.5 WUFI-ohjelmissa käytettävät pintojen siirtokertoimet.

Materiaali	α_s	α_{lw}	ϵ_{lw}	ρ_s
Punatiili	0,68	0,9	0,9	0,6
Kalkkisementtirappaus, vaalea	0,2	0,9	0,9	
Kalkkisementtirappaus, tumma	0,6	0,9	0,9	
Maan pinta				
Kerroin		Arvo	Yksikkö	
Sisäpinnan pintavastus	R_{si}	0,13	$m^2 \cdot K/W$	
Ulkopinnan pintavastus	R_{se}	0,04	$m^2 \cdot K/W$	
Sateen absorptiokerroin	α_{rain}	0,7	-	
Sisäpinnan suhteellinen vesihöyrynvastus (silikaattimaali)	s_d	0,01	m	

Pitkäaaltainen lämpösäteily on mukana rakennusfysikaalisten testivuosiensaäädätässä (Jokela, Laukkarinen & Vinha, 2019), josta WUFI-ohjelmat ottavat sen huomioon, kun eksplisiittinen säteilytase on valittu käyttöön. Sisä- ja ulkopintojen pintavastukset on valittu Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C4 mukaan (YM, 2012).

4.4 Virhelähteet ja varmuus mitoituksessa

Rakennusfysikaalisen simulaation tulokseen vaikuttavat virheet voidaan jakaa kolmeen ryhmään:

- Materiaaliominaisuuksien virheet ja puutteet
- Simulaatioiden reunaehdot
- Laskentaohjelman puutteet ja yksinkertaistukset

Materiaaliominaisuuksien määrittämiseen liittyy aina mittauksen suoritustapaan ja mittaustarkkuuteen liittyvää epätarkkuutta. Rakennusmateriaalien ominaisuudet vaihtelevat maittain ja jopa saman tuotenimen sisällä sovelluskohteesta riippuen. Materiaaliominaisuudet ovat riippuvaisia mm. lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta, muttei kattavia mittauksia ole aina tehty. Rakennusmateriaalien kapillaaristen ominaisuuksien tuntemuksessa on usein puutteita, sillä mittausten suorittamiseksi tarvitaan vedenimulaitteisto. Puutteellisten materiaaliominaisuustietojen vuoksi on jouduttu käyttämään WUFI:n approksimaatiokaavoja tasapainokosteuskäyrien ja kosteusdiffusiviteettien määrittämisessä. Syntyvän virheen pienentämiseksi on suoritettu lukuisia vertailuja rinnakkaisilla materiaaliominaisuuksilla ja vertailtu valittuja arvoja kirjallisuudessa esiintyviin arvoihin. Materiaaliominaisuuksien epävarmuus johti myös tarpeeseen tehdä erillisiä herkkyystarkasteluita materiaaliominaisuuksien vaihtelun vaikutuksen huomioon ottamiseksi.

Impregnoitun tiilen ominaisuudet perustuvat huokosrakenteeltaan sopivan tiilen ja sille sopivan impregnointiaineen käyttöön. Saavutetut ominaisuudet vaihtelevat tästä johtuen varsin paljon.

Tässä tutkimuksessa käytetyt impregnoitun tiilen ominaisuudet vastaavat vain yhtä punatiiltä ja yhtä impregnointiainetta. Tässä tutkimuksessa on valittu kuitenkin sellainen tiilen ja impregnointiaineen yhdistelmä, joka edustaa vaadittavilta ominaisuuksiltaan tutkimuksessa (Soulios *et al.*, 2020) suoritettujen kokeiden heikointa päättä impregnoinnin onnistumisen suhteen.

Tässä työssä esitetyt tulokset koskevat vain työssä tutkittuja rakenteita ja olosuhteita. Simulaatioiden suorittamiseksi tehdään lukuisia reunaehtoihin liittyviä valintoja, jotka vaikuttavat tuloksiin. Seuraavia asioita on tarkasteltu tulosten yhteydessä erillisillä herkkyytarkasteluilla:

- korkeampi kesäaikainen sisäilman kosteuslisä
- tiilen ominaisuudet
- rappauksen väri
- sisäverhouslevyn ominaisuudet
- sisäpinnoitteen vesihöyrynvastus
- heikko impregnointi

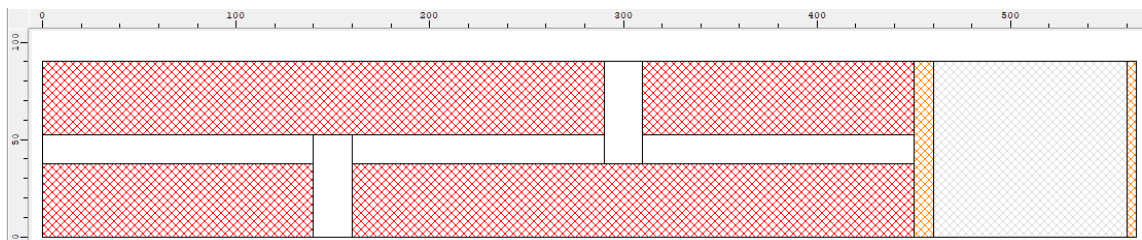
Tässä työssä ei ole kuitenkaan tarkasteltu esimerkiksi lämmöneristeen asentamisesta syntyvää rakennuskosteutta tai impregnoinnin jälkeistä rakenteen kuivumista tapauksessa, jossa sisäpuolinen lämmöneriste on asennettu ennen impregnointikäsitelyä. Rakenteeseen kohdistuvan viistosateen määrä voi olla paikoin korkean rakennuksen yläosissa suurempi, mitä tutkituissa tapauksissa on käytetty. Myös tutkittuja Suomen ilmastoja lämpimämpi ja sateisempi ilmasto voi aiheuttaa homeen kasvulle tutkimustuloksia kriittisempiä olosuhteita.

WUFI-laskentaohjelmien toiminta perustuu kosteuden ja lämmön siirtymisen tasapainoyhtälöiden iteratiiviseen ratkaisemiseen. WUFI ei ota huomioon materiaalien huokosverkostossa olevan veden jääytymistä vaan veden kapillaarinen siirtyminen voi tapahtua kaikissa lämpötiloissa. Lisäksi WUFI jättää veden jääytymisessä vapautuvan ja sulamisessa sitoutuvan faasimuutosenergian laskematta. Laskentaohjelmat eivät ota huomioon veden painovoimaista siirtymistä. Käyttäjä voi muuttaa ratkaisualgoritmin asetuksia, ja tehdyillä valinnoilla vaikuttaa laskentaan kuluvaan aikaan ja laskentatuloksen tarkkuuteen.

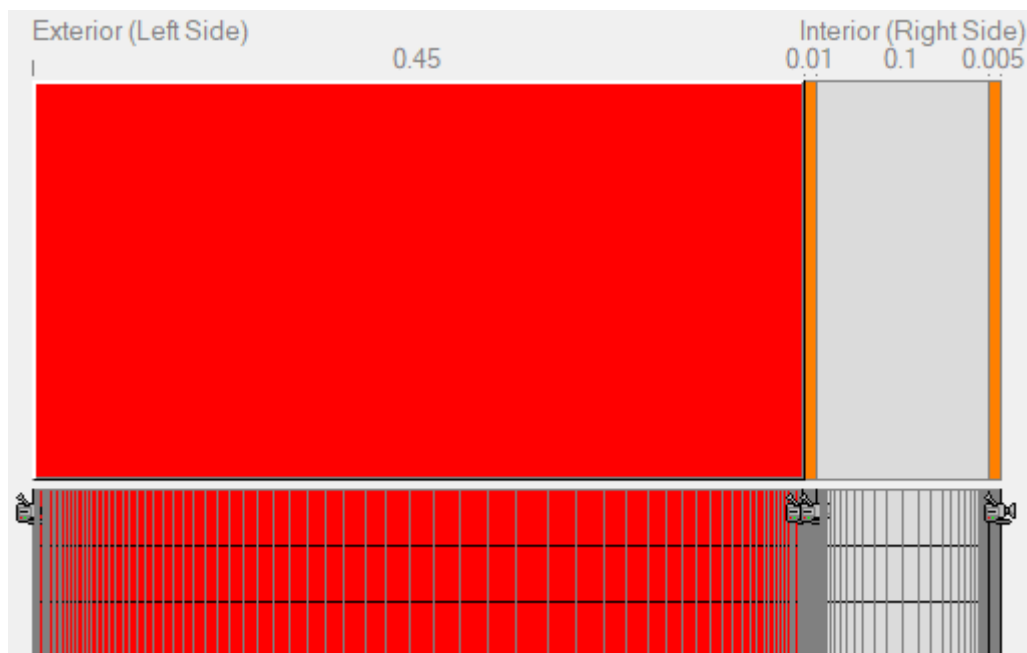
4.5 2D- ja 1D-mallien vertailu

Ennen rakenteiden varsinaisten lämpö- ja kosteusteknisten tarkasteluiden tekemistä suoritettiin vertailulaskelmia WUFI2D ja WUFI Pro ohjelmien välillä. Sisäpuolelta lämmöneristetty tiiliseinä mallinnettiin kaksikulotteisena ja yksikulotteisena. Tarkoituksena oli selvittää kuinka paljon tiiliseinän mallinnustapa vaikuttaa tarkastelupisteen olosuhteisiin tiiliseinän sisäpinnassa. Lisäksi oltiin kiinnostuneita kaksikulotteisen mallin simulointiin kuluva ajasta.

Kaksiulotteinen malli koostuu punatiilistä ja kalkkisementtilaastilla mallinnetuista saumoista. Vaakasauman paksuus on 15 mm ja pystysauman paksuus 20 mm. Mallissa on hyödynnetty laastisaumojen symmetriaa ja mallinnettava rakenne on katkaistu korkeussuunnassa tiilen symmetria-akselilta. Katkaisutasot on määritetty adiabaattisiksi pinnoiksi, mikä tarkoittaa, ettei lämpöä tai kosteutta virtaa näiden pintojen läpi. Tiiliseinän sisäpuolisia kerroksia ovat erikoislaasti 10 mm, kalsiumsilikaatti 100 mm ja sisäpinnan tasoitteena erikoislaasti 5 mm. Kaksiulotteinen rakenne-malli on esitetty kuvassa 4.3 ja materiaaliominaisuudet liitteessä A. Samasta rakenteesta tehtiin yksiulotteinen malli ilman laastisaumojia WUFI Pro -ohjelmalla ja se on esitetty mittoineen kuvassa 4.4.



Kuva 4.3 WUFI2D-rakennemalli. Pituusmitat ovat millimetrejä.



Kuva 4.4 WUFI 1D-rakennemalli ja tarkastelupisteet. Pituusmitat ovat metrejä.

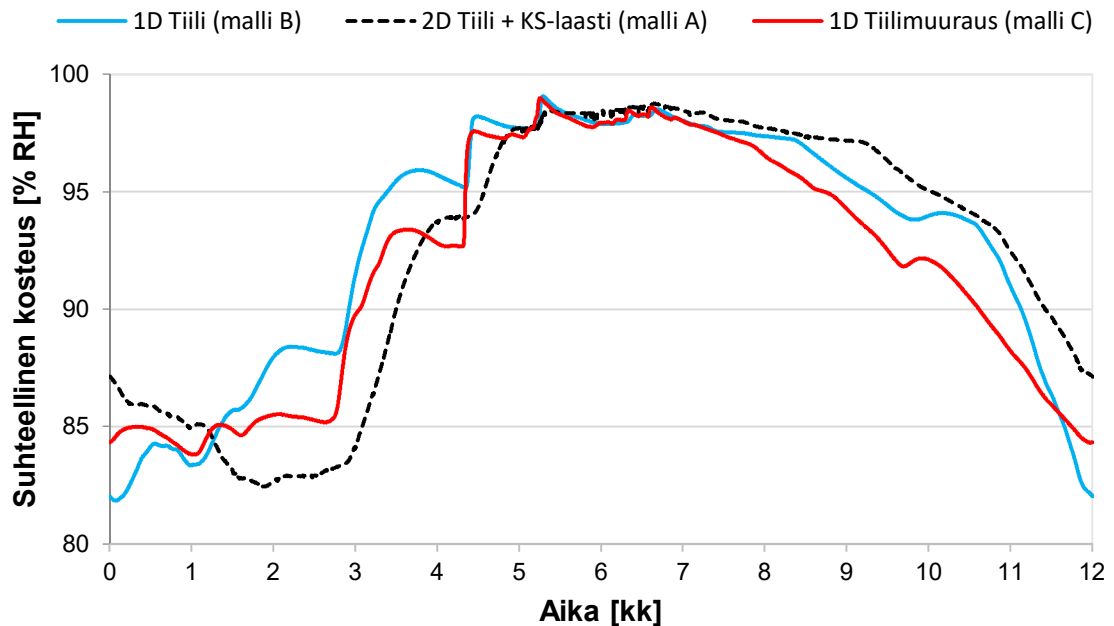
WUFI-ohjelmien yhteisestä materiaalikirjastosta löydettiin myös vaihtoehtoinen tapa mallintaa tiiliseinä. Kyseessä on tiilimateriaali, jonka ominaisuuksissa on otettu huomioon laastisaumojen vaikutuksia. Materiaalin hygroskooppinen tasapainokosteus on tiilen vastaavaa suurempi. Tässä luvussa kyseisestä materiaalista käytetään nimitystä tiilimuuraus. Malleissa käytetyn punatiilen ja tiilimuurauksen materiaaliominaisuudet (liite A) eroavat hygroskooppisen tasapainokosteuskäyrän ja kosteusdiffusiviteetin osalta.

Vertailtavat mallinnustavat ovat:

- A: 2D-malli, punatiili ja laastisaumat
- B: 1D-malli, punatiili
- C: 1D-malli, tiilimuuraus

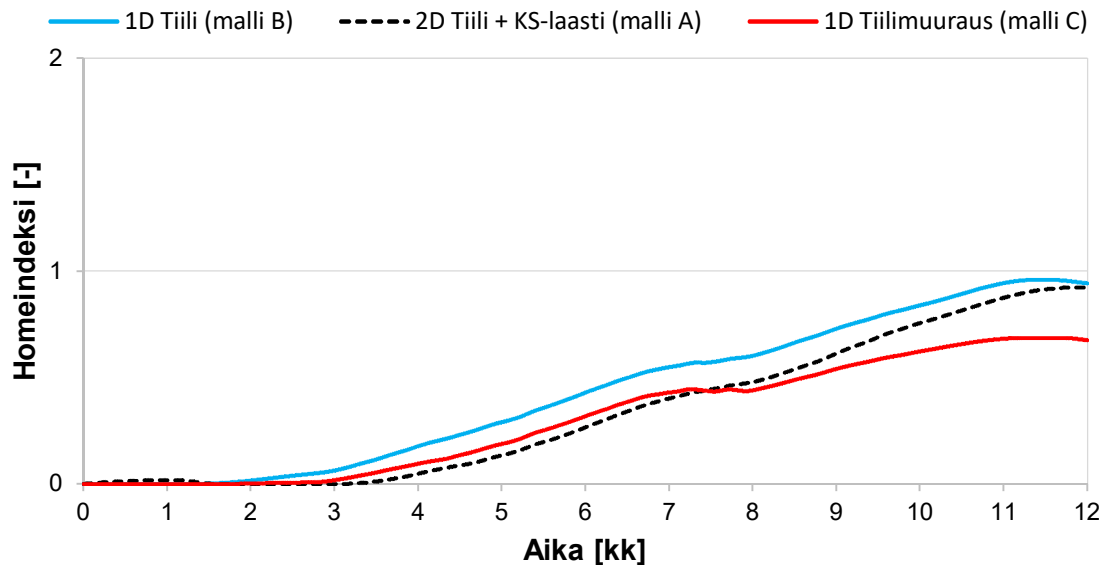
Kuvassa 4.5 on esitetty lämmöneristeen ulkopinnassa sijaitsevan tarkastelupisteen 2 suhteellinen kosteus kaksiulotteisella mallilla, sekä yksiulotteisella mallilla vaihtoehtoisilla tiiliseinän mallinnustavoilla. 2D-mallissa tarkastelupisteen 2 korkeuskoordinaatti lämmöneristeen ulkopinnassa vaikutti hieman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvoihin, ja vertailussa käytettävät olosuhteet ovat keskiarvo kaikkien kyseisessä tasossa olevien laskentaelementtien olosuhteista. Homeindeksin laskenta-ajanjaksosta johtuen vaaka-akseli alkaa heinäkuusta ja päättyy seuraavan vuoden heinäkuuhun.

1D-malleissa olosuhteen muutokset tapahtuvat nopeammin kuin 2D-mallissa, jossa kuivuminen tapahtuu hitaammin, mutta jatkuu pidempään kuin 1D-malleissa. Yksiulotteisista malleista C alentaa tarkastelupisteen suhteellista kosteutta syksyllä ja keväällä malliin B verrattuna. Keskitalvella suhteellinen kosteus on lähes sama kaikilla malleilla tarkasteltuna.



Kuva 4.5 Suhteellinen kosteus mallinnustavan mukaan. Vaaka-akseli alkaa heinäkuun alusta.

Tarkastelupisteen 2 homeindeksit laskettiin Suomalaisen homemallin avulla ja mallinnustapojen väliset erot ovat havaittavissa kuvasta 4.6. Mallinnustavalla C homeindeksin maksimiarvo jää 2D-malliin verrattuna epävarmalle puolelle. Mallinnustavalla B homeindeksi on läpi vuoden korkeampi kuin muilla mallinnustavoilla, päättyen kuitenkin 2D-mallin kanssa lähes samaan homeindeksin maksimiarvoon.



Kuva 4.6 Homeindeksien kehittyminen ajan funktiona mallinnustavan mukaan. Homeindeksin laskenta alkaa heinäkuun alusta.

Laskentaan kuluva aika oli 2D-mallilla monikymmenkertainen 1D-malleihin verrattuna, jotka voitiin suorittaa 1–3 minuutissa. 2D-mallien laskentaa vaikeutti ohjelman herkkyys suurille konvergointivirheille, eivätkä kaikki 1D-malleissa toimineet materiaaliominaisuudet toimineet 2D-malleissa. Näistä syistä johtuen varsinaiset laskentatarkastelut päätettiin tehdä WUFI Pro -ohjelmalla yksiulotteisina.

Massiivitiiliseinän kosteusteknisen toiminnan mallintamiseen liittyy haasteita ja epävarmuuksia. Vereecken ja Roels (2013) ovat havainneet, että tiiliseinän mallintaminen yksiulotteisena ilman laastisaumoja vastaa laastisaumoilla mallinnetun rakenteen toimintaa etenkin todellisissa vaihtelevissa olosuhteissa. Tietokoneohjelmalla simuloidussa vedenimeytymiskokeessa laastisaumojen huomioimatta jättäminen nopeutti hieman veden imeytymistä tutkittuun kappaleeseen. Tiilellä on yleensä laastisaumoja suurempi veden imeytymiskerroin, minkä vuoksi tiilimuurauksen mallintamisen yksinkertaistaminen pelkäksi homogeeniseksi tiilikerrokseksi voitaisi ensinäkemältä ajatella yliarvioivan suhteellisen kosteuden nousua tiilimuurin ja lämmöneristeen välissä. Todelliset ilmasto-olosuhteet kuitenkin koostuvat vaihtelevista kuivumis- ja kastumisjaksoista, jolloin myös tiilen sekä laastin kosteuden varastointikyky ja kosteuspitoisuudesta riippuva kosteusdiffusiviteetti vaikuttavat rakenteen kosteustekniseen toimintaan. Muurauslaastin kautta veden imeytymisen tapahtuu hitaammin kuin tiilen kautta, mutta myös kuivuminen tapahtuu hitaammin. Lisäksi tiilen pienemmät huokokset kykenevät imemään vettä laastista itseensä. Kaksiulotteisessa mallintamisessa itsessään on epävarmuutena tiilen ja laastin välinen epätäydellinen kontakti, josta syntyy veden kapillaarista siirtymistä hidastava vastus (engl. interface resistance).

5. TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä luvussa esitetään laskettujen simulaatioiden tulokset ja Suomalaisen homemallin mukaan lasketut homeindeksien maksimiarvot homeen kasvun kannalta kriittisimmissä tarkastelupisteissä. Kaikkien laskettujen tapausten homeindeksien maksimiarvot on esitetty myös liitteessä B.

5.1 Perustapaukset

Lämpö- ja kosteusteknisten laskentatarkasteluiden lähtökohdaksi on valittu molemmin puolin puhtaaksi muurattu 360 mm paksu tiiliseinä. Sisäpuolelta lisälämmöneristetyin rakenteen perustapaukseksi on valittu tiiliseinä, jonka sisäpuolelle on asennettu 100 mm paksu kalsiumsilikaattilevy. Perustapausten Suomalaisen homemallin mukaan lasketut homeindeksien maksimiarvot ja rakenteiden U-arvot on esitetty taulukossa 5.1.

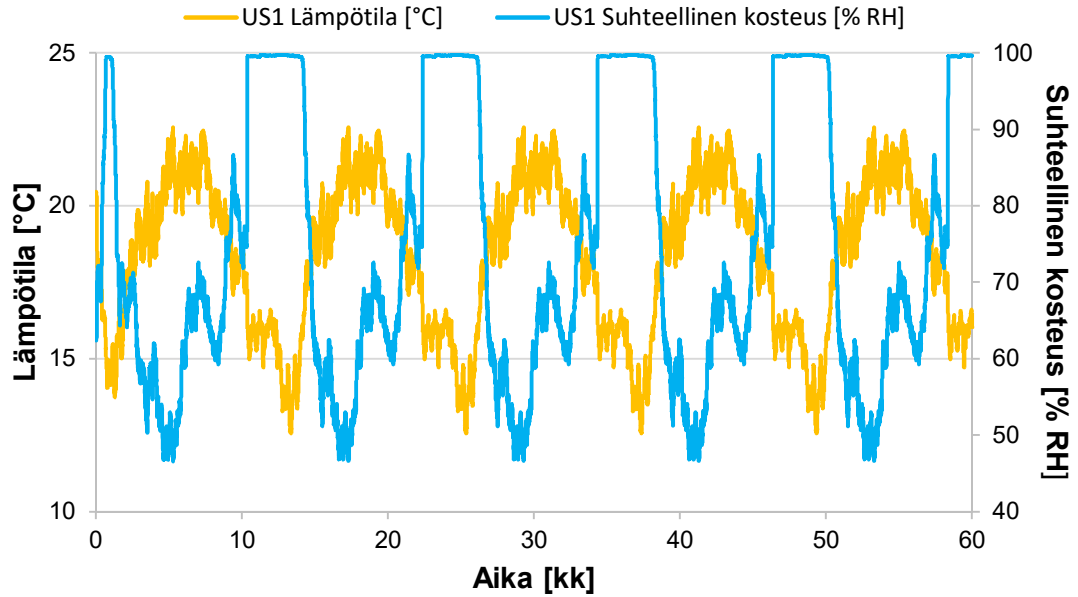
Taulukko 5.1 Perustapausten maksimihomeindeksit. (Tiiliseinä 360 mm, Vantaa 2050.)

rakenne	lämmöneriste	paksuus [mm]	U-arvo [W/(m ² ·K)]	TP1	TP2	TP3	TP4
US1	-	-	1,31	0,98			
US2	kalsiumsilikaatti	100	0,43	1,32	1,17	1,17	0,94

Tarkastelupisteiden sijainnit: TP1 = tiilen sisäpinta, TP2 = kiinnityslaastin ja lämmöneristeen rajapinta, (lämmöneristeen ulkopinta), TP3 = lämmöneristeen ja tasoitelaastin rajapinta, (lämmöneristeen sisäpinta), TP4 = sisäverhouslevyn sisäpinta.

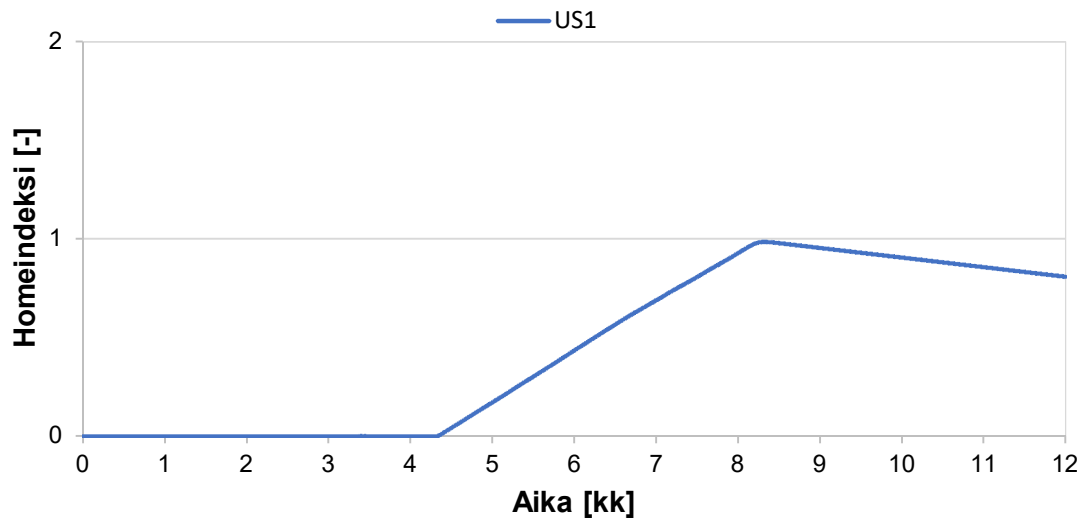
5.1.1 Alkuperäinen rakenne

Alkuperäisen rakenteen US1 olosuhteet tarkastelupisteessä 1 on esitetty kuvassa 5.1. Laskennan alkuolosuhteet tasaantuvat testivuoden olosuhteita vastaavaksi suhteellisen kosteuden osalta noin kuudessa kuukaudessa. Lämpötilan tasaantuminen simulaatioissa on yleensä nopeaa, mutta tiiliseinän lämmönjohtavuus riippuu sen kosteuspitoisuudesta, joten tarkastelupisteen lämpötilan tasaantuminen riippuu rakenteen kosteusjakauman tasaantumisesta.



Kuva 5.1 Alkuperäisen rakenteen US1 lämpötila ja suhteellinen kosteus tarkastelupisteessä 1 tiiliseinän sisäpinnassa.

Vuosittain toistuvista sykleistä huomataan, että rakenne kastuu viistosateen vaikutuksesta siten, että sisäpinnan suhteellinen kosteus on lähellä 100 % RH talvisin. Tulos ei kuitenkaan tarkoita, että sisäpinta on sisäilman kosteuden takia kondenssissa vaan kosteutta haihtuu koko ajan sisäilmaan. Suhteellisen kosteuden nousu tapahtuu nopeasti ja sisäpinnassa vallitsee homeen kasvulle suotuisat olosuhteet läpi talven neljän kuukauden ajan. Kuivumisen alkaessa maaliskuussa suhteellinen kosteus myös laskee nopeasti. Tiiliseinän suuresta termisestä massasta huolimatta aurin gon säteily riittää ajoittain kesä-heinäkuussa nostamaan sisäpinnan lämpötilan sisäilman lämpötilaksi asetun vakiolämpötilan 21 °C yläpuolelle, kun useita lämpimiä ja aurinkoisia päiviä esiintyy peräkkäin.

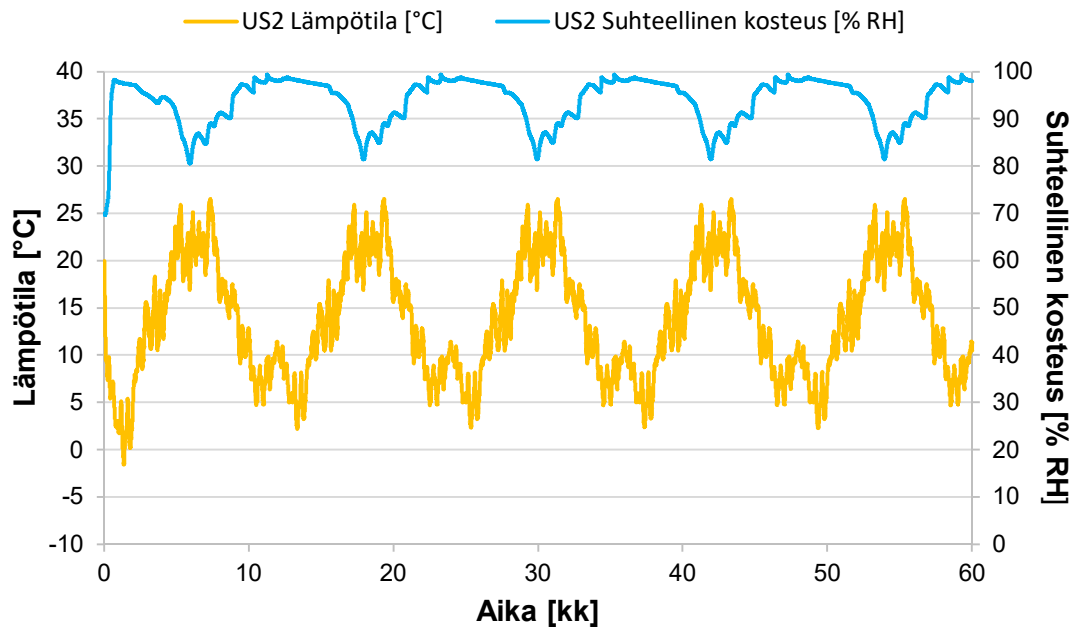


Kuva 5.2 Alkuperäisen rakenteen US1 homeindeksin kehittyminen ajan funktiona tarkastelupisteessä 1. Homeindeksin laskenta alkaa heinäkuun alusta.

Tiiliseinän sisäpinnan olosuhteiden perusteella laskettu homeindeksi ajan funktiona on esitetty kuvassa 5.2. Alkuperäisen rakenteen toimintaa tutkittiin silikaattimaalin ohella myös suuremmalla sisäpinnan vesihöyrynvastuksella ja havaittiin homeen kasvun olevan mahdollista nykyisessä ilmastossa jo lämmöneristämättömässä rakenteessa.

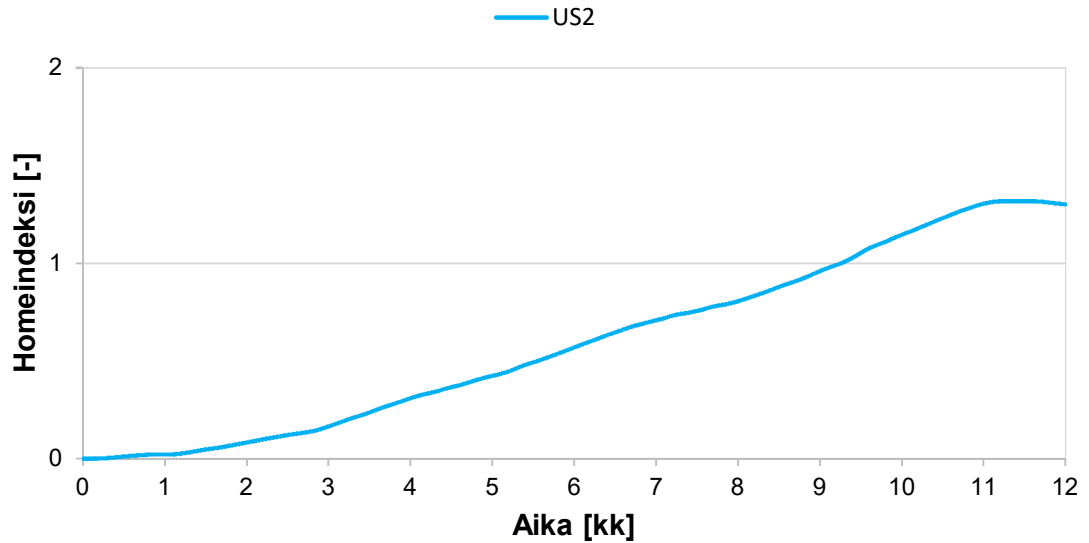
5.1.2 Sisäpuolelta lämmöneristetty rakenne

100 mm paksulla kalsiumsilikaattieristeellä eristetyssä rakenteessa olosuhteiden tasaantuminen tarkastelupisteessä tiiliseinän sisäpinnassa tapahtuu noin vuodessa. Tarkastelupisteen 1 olosuhteista kuvassa 5.3 havaitaan, että suhteellinen kosteus ylittää homehtumisherkkyyden luokan 3 mukaisen kriittisen tason 85 % RH lähes koko testivuoden ajan. Homeen kasvunopeuteen vaikuttaa myös lämpötila, joka tiilen sisäpinnassa laskee kylminä kuukausina lämmöneristeen vuoksi alkuperäiseen rakenteeseen verrattuna.



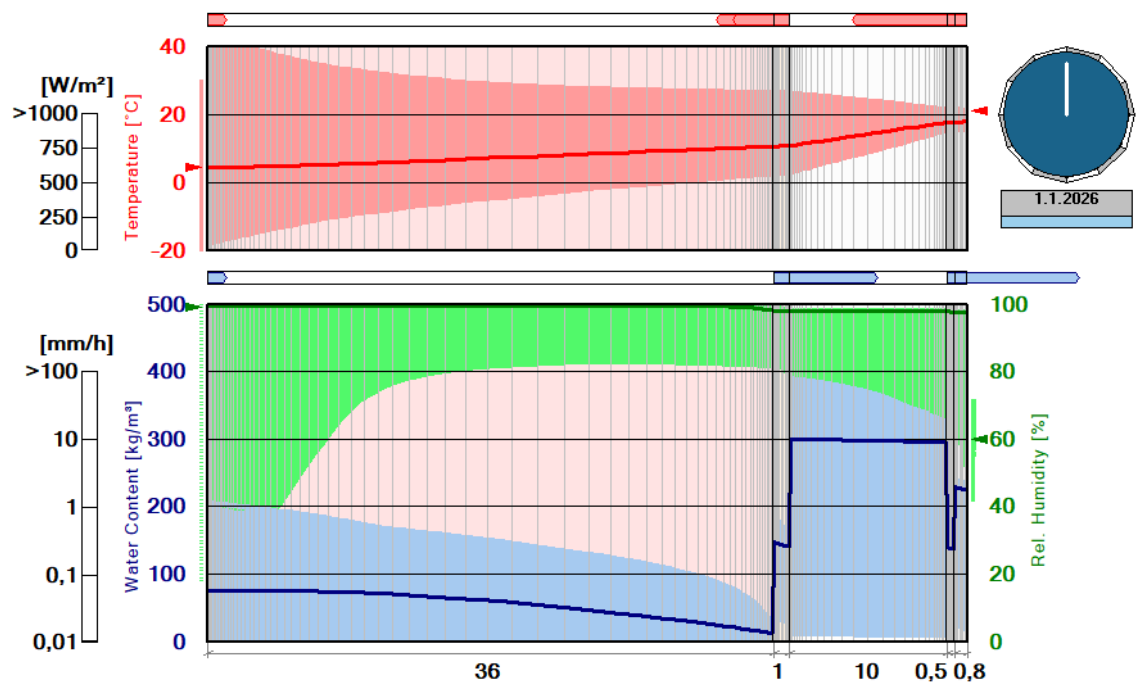
Kuva 5.3 Kalsiumsilikaatilla sisäpuolelta lisälämmöneristetyin rakenteen US2 lämpötila ja suhteellinen kosteus tarkastelupisteessä 1 tiilen sisäpinnassa.

Tarkastelupisteen 1 homeindeksin kehittyminen ajan funktiona on esitetty kuvassa 5.4. Homeindeksin maksimiarvo 1,32 ylittää sallitun tason, eikä rakenne ole tämän tuloksen perusteella kostusteknisesti hyväksyttävä. Homeen kasvulle mahdolliset olosuhteet esiintyvät tarkastelupisteessä 11 kuukauden ajan ja homeen taantumista tapahtuu vain kesä-heinäkuussa. Kalsiumsilikaatilla lämmöneristetyin rakenteen maksimihomeindeksi on noin 35 % suurempi kuin lämmöneristämättömän rakenteen maksimihomeindeksi. Muutos on kuitenkin Suomalaisen home-mallin ja käytettyjen materiaaliominaisuuksien epävarmuuksiin nähden melko pieni.



Kuva 5.4 Kalsiumsilikaatilla sisäpuolelta lisälämmöneristetyin rakenteen US2 homeindeksin kehittyminen ajan funktiona tarkastelupisteessä 1 tiilen sisäpinnassa.

Homeindeksiä tarkasteltiin myös lämmöneristeen sisäpuolisissa kerroksissa, joissa lämpötila on tarkastelupisteitä 1 ja 2 korkeampi. Homeindeksin maksimiarvo ylittää raja-arvon myös lämmöneristeen sisäpinnassa (TP3), jossa esiintyy homeen kasvun kannalta mahdolliset olosuhteet noin viiden kuukauden ajan. Myös sisäverhouslevyn sisäpinnassa (TP4) havaittiin homeen kasvulle mahdolliset olosuhteet talvella neljän kuukauden ajan, mutta homeindeksin maksimiarvo jäi raja-arvon alapuolelle.



Kuva 5.5 Lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja kosteuspitoisuuden jakaumat. Rakennekerrosten paksuudet on esitetty senttimetreinä.

Kuvassa 5.5 on esitetty simulaation päättymishetken lämpötila (punainen viiva), suhteellinen kosteus (vihreä viiva) ja kosteuspitoisuus (sininen viiva). Testivuoden aikainen vaihteluväli näkyy värillisinä alueina. Lämpötilajakaumasta nähdään, että talven kylmimpänä aikana tiili on lähes kauttaaltaan pakkasen puolella. Lämmöneristeen vuoksi jäätymis-sulamis-syklejä esiintyy syvemmällä tiiliseinässä kuin alkuperäisessä lämmöneristämättömässä rakenteessa.

Testivuotta tarkastellessa havaittiin, että kosteus tarkastelupisteissä tiilen ja kalsiumsilikaatin välissä on peräisin sadeveden tunkeutumisesta rakenteeseen. Sisäilmasta diffuusiolla rakenteeseen siirtyvä kosteus nostaa suhteellista kosteutta alkusyksyllä vain aivan rakenteen sisäpinnan läheisyydessä.

Kalsiumsilikaattieriste kykenee sitomaan kosteutta muista rakennekerroksista, mikä on havaittavissa tiilikerroksen sisäpinnassa. Kosteuspitoisuus kalsiumsilikaattieristeessä vaihtelee testivuoden aikana suuresti ja suuri keskimääräinen kosteuspitoisuus talvella tarkoittaa sitä, ettei toivottavaa lämmöneristyskykyä saavuteta rakennusfysikaalisen testivuoden olosuhteissa. Tutkittavan kalsiumsilikaattieristeen lämmönjohtavuus kuivana on noin 0,06 W/(m·K), mutta kosteuspitoisuuden noustessa arvoon 300 kg/m³ sen lämmönjohtavuus kasvaa noin arvoon 0,16 W/(m·K).

Tiiliseinän sisäpuolelle asennetut rakennekerrokset saavuttavat lähes 100 % RH suhteellisen kosteuden, ja kosteuden siirtymisen kannalta se tarkoittaa materiaalien olevan tasapainokosteuskäyriensä kapillaarisella alueella. Tällöin kosteutta siirtyy koko ajan kapillaarisesti matalamman kosteuspitoisuuden suuntaan kohti sisäilmaa.

5.2 Sisäpuolisten lämmöneristeiden vaikutukset

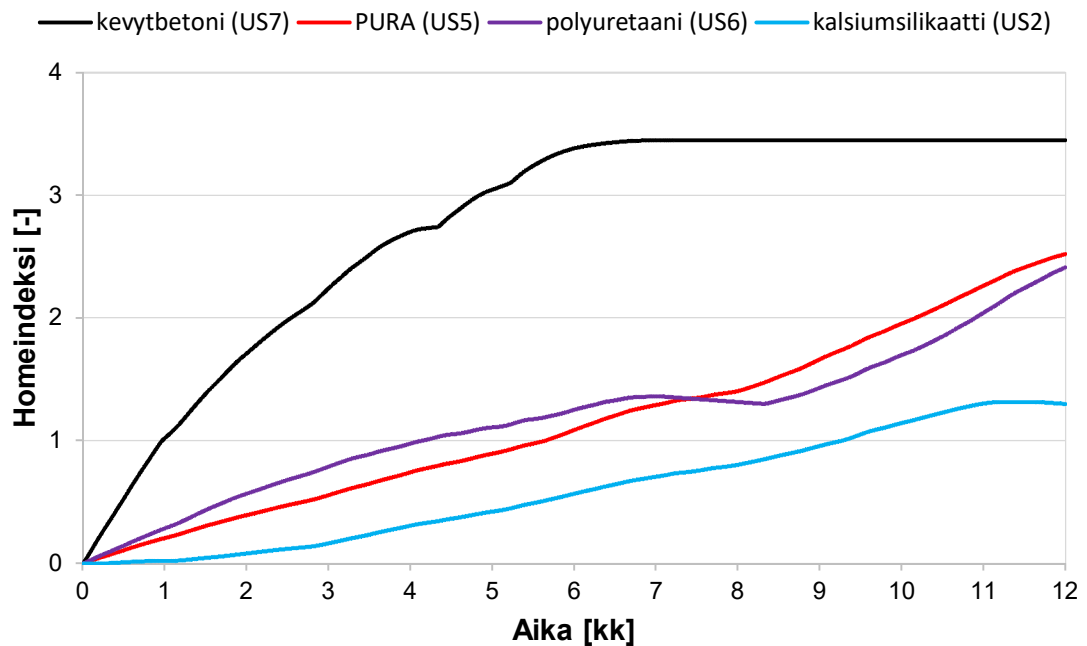
5.2.1 Lämmöneristeen mukaan

Eri lämmöneristeiden toimivuutta on aluksi vertailtu käyttäen kaikilla samaa eristepaksuutta 100 mm. Rakenteiden U-arvot eivät ole tässä tarkastelussa samat vaan poikkeavat materiaalien erilaisen lämmönjohtavuuden vuoksi. Laskentatulosten mukaiset homeindeksien maksimiarvot on esitetty taulukossa 5.2 ja homeindeksien kehittyminen ajan funktiona kuvassa 5.6.

Taulukko 5.2 Maksimihomeindeksit eri lämmöneristeillä. (Tiiliseinä 360 mm, Vantaa 2050)

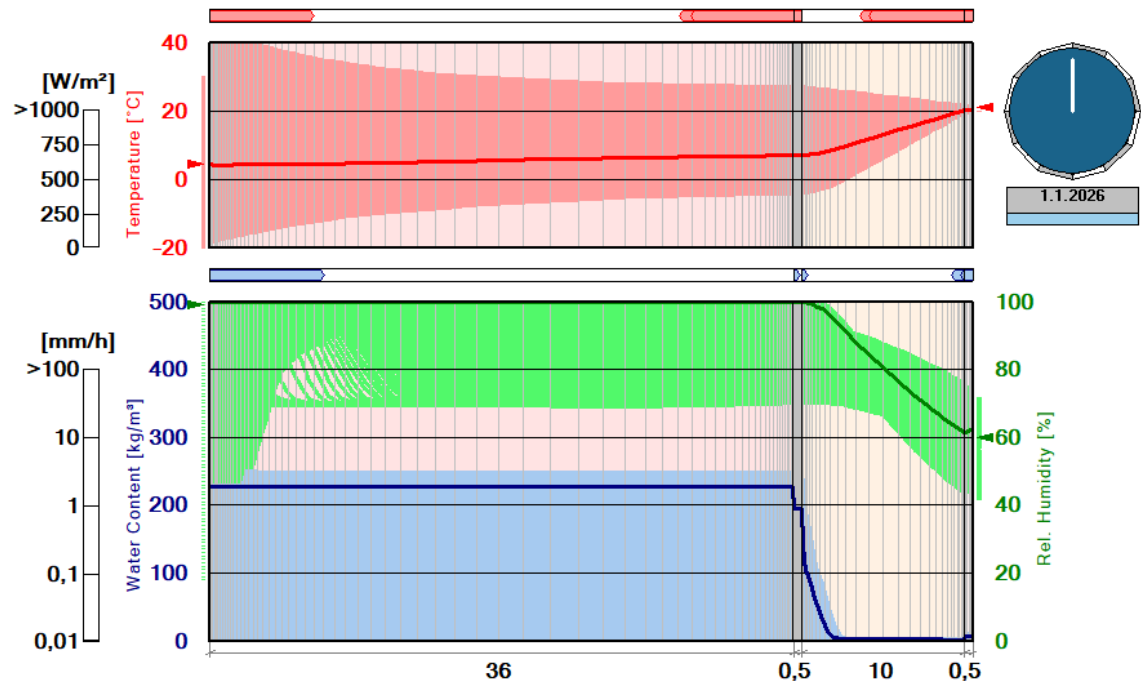
rakenne	lämmöneriste	paksuus [mm]	U-arvo [W/(m ² ·K)]	TP1	TP2	TP3	TP4
US2	kalsiumsilikaatti	100	0,43	1,32	1,17	1,17	0,94
US3	perliitti	100	0,33	2,49	2,35	0	0
US4	IQ-Therm	100	0,26	2,45	2,47	0	0
US5	Redstone PURA	100	0,33	2,52	2,53	0,92	0,55
US6	al. pinnoitettu PUR-levy	100	0,19	2,41	2,44	0	0
US7	kevytbetoni	100	0,63	3,45	3,44	3,18	2,99

Homeindeksien maksimiarvot lämmöneristekerroksen ulkopuolisissa tarkastelupisteissä ovat kaikilla lämmöneristeillä rakenteen toiminnalle asetettua raja-arvoa suurempia. Materiaalit voidaan jakaa maksimihomeindeksien suhteen kolmeen ryhmään. Kaikki tarkastelupisteet huomioon ottaen parhaiten sisäpuolisena lämmöneristeenä toimii kalsiumsilikaatti. Perliitti, IQ-Therm, PURA ja polyuretaanilevy olivat maksimihomeindeksien osalta lähellä toisiaan, mutta selvästi heikompia kuin kalsiumsilikaatti. Huonoiten tutkituista materiaaleista toimi kevytbetoni, joka saavutti lähes homehtumisherkkyyden 3 homeindeksin maksimiarvon, mikä tarkoittaa silmin havaittavaa homeen kasvua tarkastelupisteessä.



Kuva 5.6 Homeindeksien kehittyminen ajan funktiona eri lämmöneristeillä tarkastelupisteessä 1. Kaikilla lämmöneristeillä on sama paksuus. (Tiiliseinä 360 mm, Vantaa 2050)

Lämmöneristekerroksen sisäpuolisissa tarkastelupisteissä ei odotetusti havaita homeen kasvua kapillaarisen kosteuden siirtymisen katkaisevalla polyuretaanieristeellä ja vain vähän kapillaarisia ominaisuuksia omaavalla IQ-Therm-eristeellä. Merkittävää on, että perliittieriste toimii kosteusteknisesti eri lailla kuin kalsiumsilikaatti.



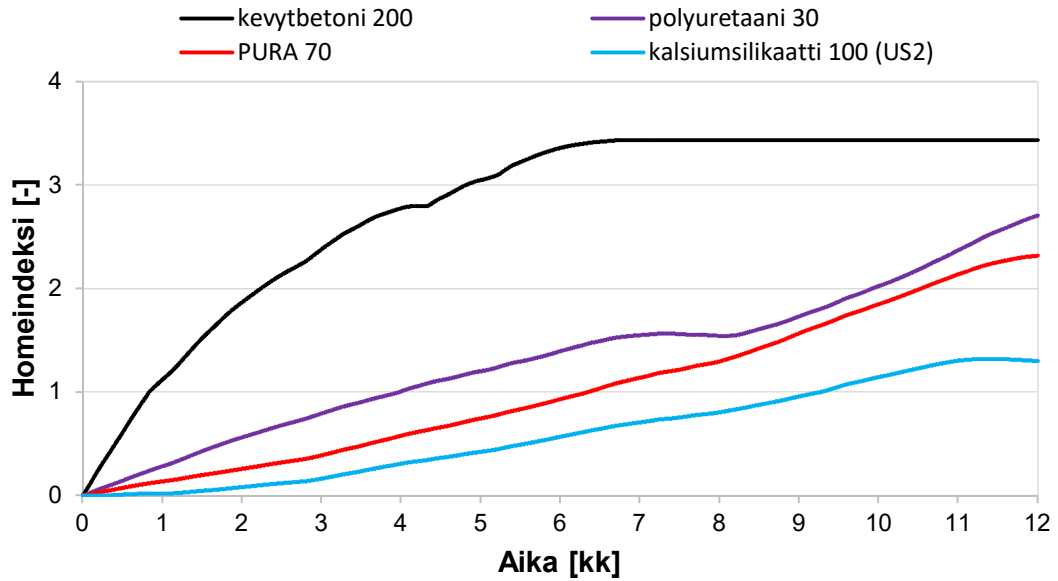
Kuva 5.7 Lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja kosteuspitoisuuden jakaumat perliitillä lämmöneristetyssä rakenteessa US3. Rakennekerrosten paksuudet ovat senttimetrejä.

Perliitti on kapillaarisempi, mutta sen tasapainokosteuskäyrä on matalampi kuin kalsiumsilikaatilla, ja esimerkiksi simulaation päättymishetken olosuhteista kuvasta 5.7 voidaan havaita kuinka suhteellinen kosteus ja kosteuspitoisuus laskevat lämmöneristekerroksessa paljon voimakkaammin kuin kalsiumsilikaatilla edellisessä luvussa esitettyssä kuvassa 5.5. Perliittieristeen sisäpuolisissa tarkastelupisteissä ei esiinny homeen kasvun mahdollistavia olosuhteita. Perliitti ei kuitenkaan kykene poistamaan tiilen ja lämmöneristeen välisiin tarkastelupisteisiin kumuloituvaa kosteutta yhtä tehokkaasti kuin kalsiumsilikaattieriste.

Lämmöneristeitä vertailtiin myös valitsemalla eristepaksuudet siten, että kaikilla rakenteilla on sama U-arvo. Näin saadaan parempi kuva siitä, millä lämmöneristeellä tavoiteltava U-arvo on saavutettavissa lämpö- ja kosteusteknisesti turvallisimmalla tavalla. Rakenteiden maksimihomeindeksit on esitetty taulukossa 5.3 ja homeindeksien kehittyminen ajan funktiona kuvassa 5.8.

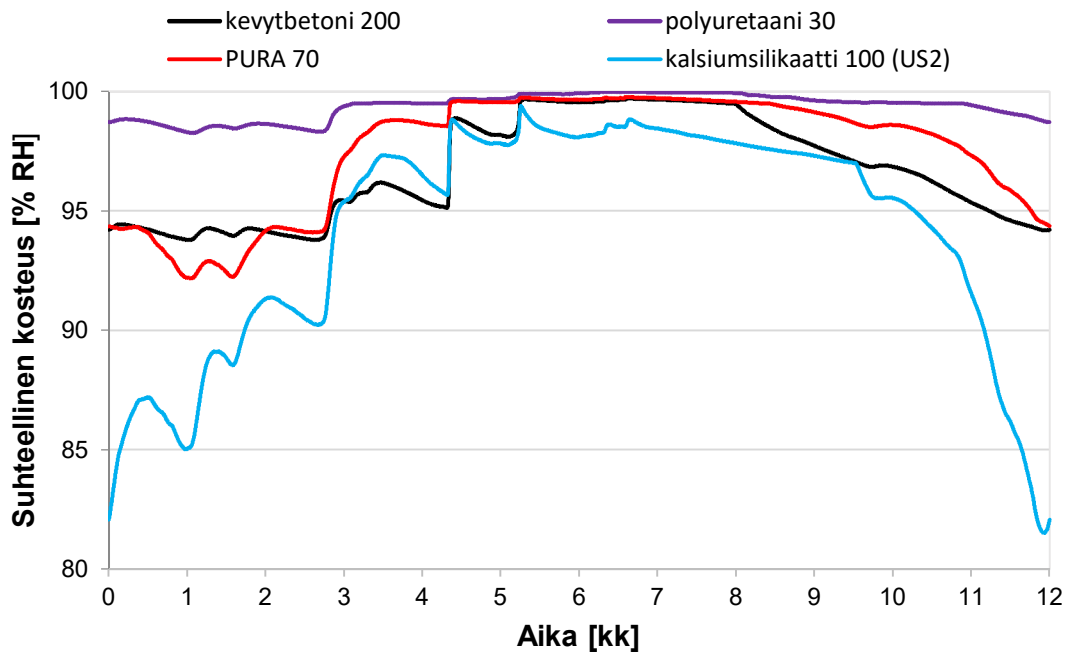
Taulukko 5.3 Maksimihomeindeksit eri lämmöneristeillä ja lämmöneristeen paksuuksilla. Rakenteilla on sama U-arvo. (Tiiliseinä 360 mm, Vantaa 2050)

Rakenne	lämmöneriste	paksuus [mm]	U-arvo [W/(m ² ·K)]	TP1	TP2	TP3	TP4
US2	kalsiumsilikaatti	100	0,43	1,32	1,17	1,17	0,94
-	al. pinnoitettu PUR-levy	30	0,45	2,71	2,76	0	0
-	kevytbetoni	200	0,43	3,44	3,43	2,92	1,22
-	Redstone PURA	70	0,43	2,32	2,30	0,98	0,75



Kuva 5.8 Homeindeksien kehittyminen ajan funktiona eri lämmöneristeillä ja eristepaksuuksilla [mm] tarkastelupisteessä 1. Rakenteilla on sama U-arvo. (Tiiliseinä 360 mm, Vantaa 2050)

Lämmöneristepaksuuksien muuttaminen samaa U-arvoa vastaavaksi ei muuta tilannetta oleellisesti kalsiumsilikaatin ja kevytbetonin osalta. PURA eristeen homeindeksi pienenee hieman eristepaksuuden pienentyessä, mutta polyuretaanilevyllä eristepaksuuden pienentäminen kasvattaa homeindeksiä. Tämä selittyy sillä, että polyuretaanin muita materiaaleja pienempi lämmönjohtavuus alentaa tarkastelupisteen lämpötilaa muihin tutkittuihin lämmöneristeisiin verrattuna, jolloin homeen kasvu hidastuu ja tarkastelupisteen lämpötila laskee jopa pakkasen puolelle, jolloin homeen kasvu taantuu.



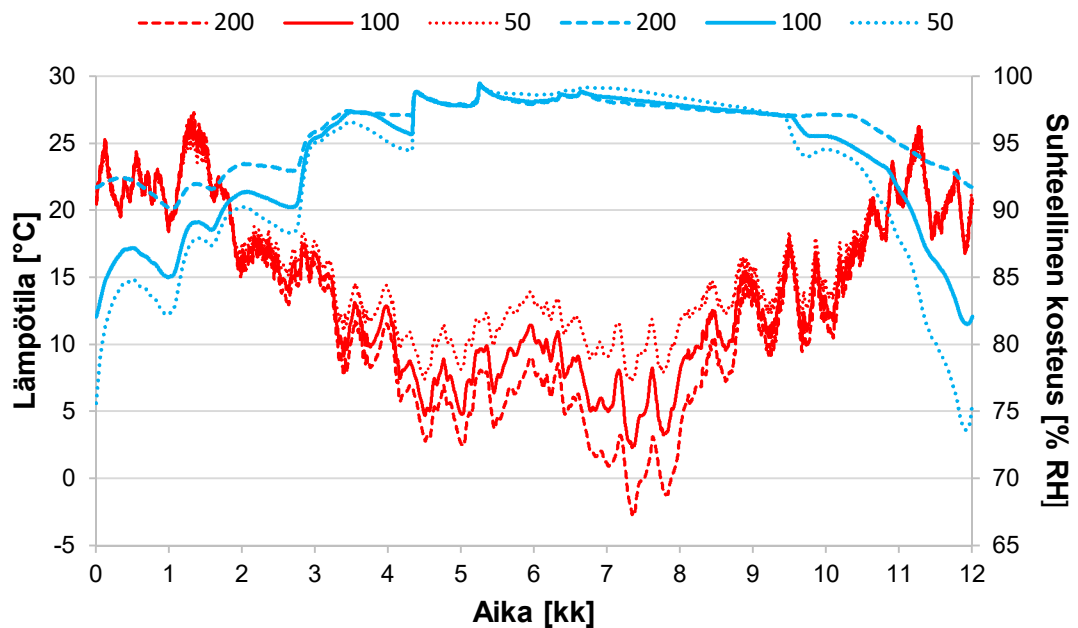
Kuva 5.9 Tarkastelupisteen 1 suhteellinen kosteus eri lämmöneristeillä ja eristepaksuuksilla [mm]. Rakenteilla on sama U-arvo. Vaaka-akselilla 0 ja 12 tarkoittavat heinäkuun alkua.

Tarkastelupisteen 1 suhteellinen kosteus eri lämmöneristeillä on esitetty kuvassa 5.9. Kalsiumsilikaatti erottuu muista lämmöneristeistä selvästi, kun vertaillaan tarkastelupisteen 1 suhteellista kosteutta. Ero on havaittavissa etenkin keväällä rakenteen kuivuessa muita nopeammin. Kalsiumsilikaatti on tutkituista lämmöneristeistä ainut, jolla tarkastelupisteen suhteellinen kosteus laskee alle homeutumisherkkyyaluokan 3 kriittisen tason. Myös talvella suhteellinen kosteus on kalsiumsilikaattieristeellä hieman muita matalampi.

Suhteellista kosteutta verrattaessa polyuretaanilevy toimii kaikkein huonoiten ja homeindeksin osalta heikoksi havaittu kevytbetoni jopa paremmin kuin PURA. Kevytbetoni siis erottuu muita materiaaleja huonommaksi homeutumisherkkyyaluokan kasvunopeuden vuoksi.

5.2.2 Lämmöneristeen paksuuden mukaan

Lämmöneristeen paksuuden vaikutuksia rakenteen lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan tarkasteltiin kalsiumsilikaattieristeen osalta. Tarkasteltavat eristepaksuudet ovat 50, 100 ja 200 mm, joista 50 mm puolittaa 360 mm paksun tiiliseinän U-arvon.



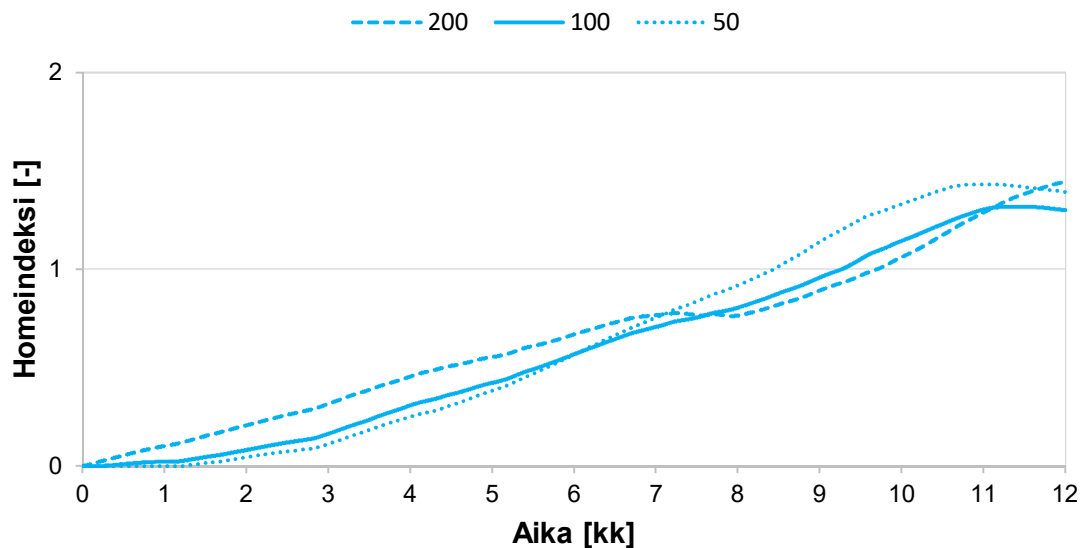
Kuva 5.10 Tarkastelupisteen 1 suhteellinen kosteus (sininen) ja lämpötila (punainen) kalsiumsilikaattieristeen paksuuden [mm] mukaan.

Tarkastelupisteen 1 olosuhteita on verrattu kalsiumsilikaattieristeen paksuuden mukaan kuvassa 5.10. Talvella rakenteet eivät eroa suhteellisen kosteuden osalta toisistaan, mutta keväällä havaitaan, että suurempi lämmöneristepaksuus hidastaa kuivumista. Mitä ohuempi lämmöneristepaksuus on, sitä nopeammin rakenne kuivuu ja sitä kuivemmaksi se lopulta päätyy. Ero on havaittavissa lähes kuuden kuukauden ajan huhtikuusta syyskuun loppuun asti.

Tarkastelupisteen 1 lämpötilat poikkeavat toisistaan talvella selvästi. Lämpötilojen ero paksuimman ja ohuimman eristepaksuuden välillä on suurimmillaan helmikuussa noin 10 °C. Ohuemalla eristepaksuudella sisäilmasta tuleva lämpövirta pitää tarkastelupisteen lämpimämmissä olosuhteissa kuin paksummalla eristepaksuudella. 200 mm eristepaksuudella tarkastelupisteen lämpötila käy hetkittäin pakkasen puolella. Lämpötilalla on suora vaikutus homeen kasvuun, joten talvella tarkastelupisteessä homeen kasvuun suotuisimmat olosuhteet syntyvät ohuella lämmöneristepaksuudella.

Taulukko 5.4 Maksimihomeindeksit kalsiumsilikaattieristeen paksuuden mukaan. (Tiiliseinä 360 mm, Vantaa 2050)

Rakenne	lämmöneriste	paksuus [mm]	U-arvo [W/(m ² ·K)]	TP1	TP2	TP3	TP4
-	kalsiumsilikaatti	50	0,64	1,43	1,29	1,26	1,07
US2	kalsiumsilikaatti	100	0,43	1,32	1,17	1,17	0,94
-	kalsiumsilikaatti	200	0,26	1,45	1,36	1,09	0,77



Kuva 5.11 Homeindeksien kehittyminen ajan funktiona tarkastelupisteessä 1 kalsiumsilikaattieristeen paksuuden [mm] mukaan.

Homeindeksin maksimiarvot eri kalsiumsilikaattieristeen paksuuksilla on esitetty taulukossa 5.4. Homeindeksien kehittyminen tarkastelupisteessä 1 on laskettu tunnin välein ja esitetty kuvassa 5.11. Huhtikuun alun ja syyskuun lopun (9–12; 0–3) välisenä aikana tarkastelupisteessä 1 havaittu korkeampi suhteellinen kosteus paksummalla lämmöneristeellä näkyy kuvassa 5.11 siten, että homeindeksi kasvaa silloin paksuimmalla eristeellä eniten. Tarkastelupisteessä 1 havaitun lämmöneristepaksuuksien keskinäisen lämpötilaeron vuoksi homeindeksi kasvaa talvella muita nopeammin ohuella lämmöneristeellä. Lopulta homeindeksin maksimiarvot ovat kaikilla eristepaksuuksilla lähellä toisiaan.

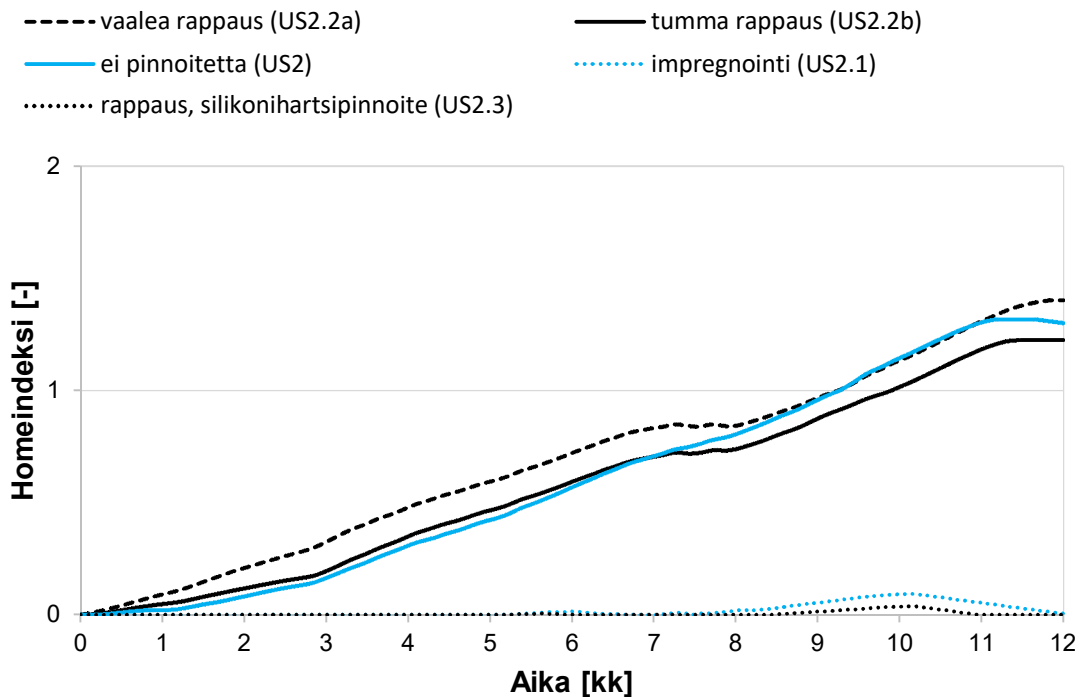
5.3 Pinnoitteen vaikutukset

5.3.1 Eri pinnoitevaihtoehdot

Kalsiumsilikaattieristeellä lämmöneristetyyn rakenteen US2 toimintaa tutkittiin erilaisilla pinnoitteilla. Homeindeksien kehittyminen ajan funktiona rakenteen pinnoitteen mukaan on esitetty kuvassa 5.12 ja homeindeksin maksimiarvot taulukossa 5.5, jossa on esitetty myös pinnoitteiden veden imeytymiskertoimet A_w ja pinnoitteen paksuus tai impregnoinnin tapauksessa täysin impregnoituneen kerroksen paksuus d_p . Rakenteen US2 eri versiot on numeroitu pinnoitteen perusteella. Rakenteessa US2.3 tiiliseinän ulkopuolelle on asennettu 20 mm paksu kalkkisementtirappaus, jonka päälle on asennettu 2 mm paksu silikonihartsipinnoite.

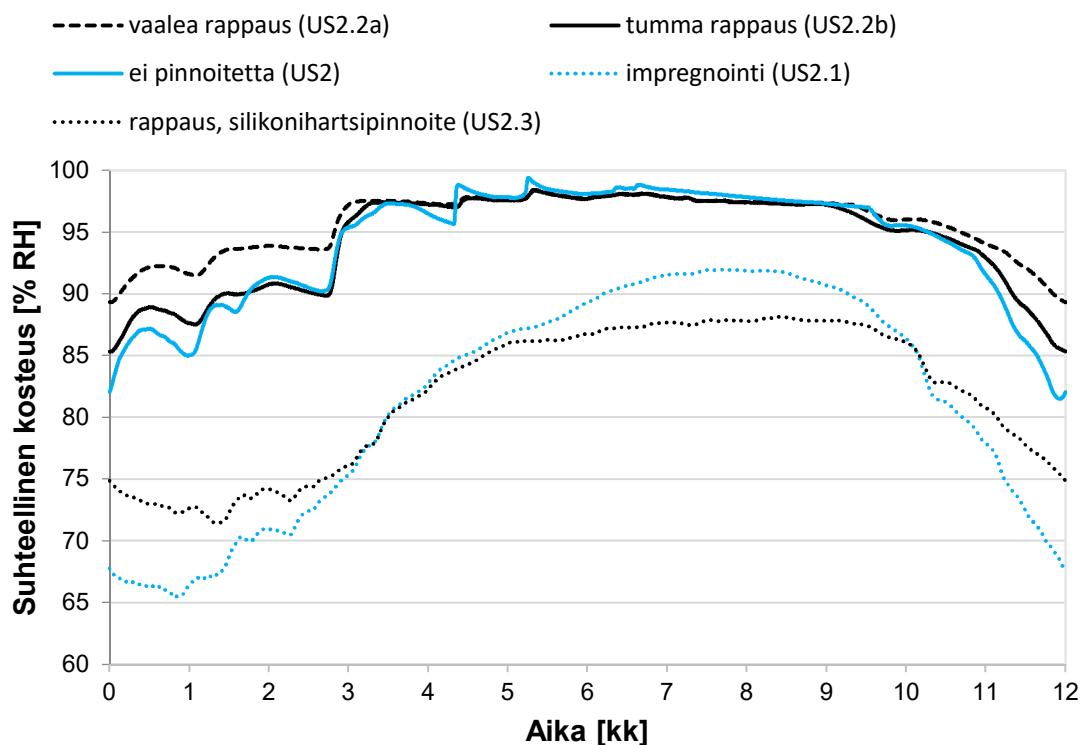
Taulukko 5.5 Maksimihomeindeksit eri pinnoitevaihtoehtojen mukaan. (Tiiliseinä 360 mm, kalsiumsilikaatti 100 mm)

Rakenne	A_w [kg/(m ² ·s ^{0,5})]	d_p [mm]	pinnoite	TP1	TP2	TP3	TP4
US2	0,4	-	-	1,32	1,17	1,17	0,94
US2.1	0,0018	2,6	impregnointi	0,09	0,09	0	0
US2.2a	0,033	20	KS-rappaus (vaalea)	1,40	1,27	0,90	0,36
US2.2b	0,033	20	KS-rappaus (tumma)	1,22	1,06	0,81	0,34
US2.3	0,00016	2 + 20	silikonihartsipinnoite + KS-rappaus (vaalea)	0,04	0,03	0	0



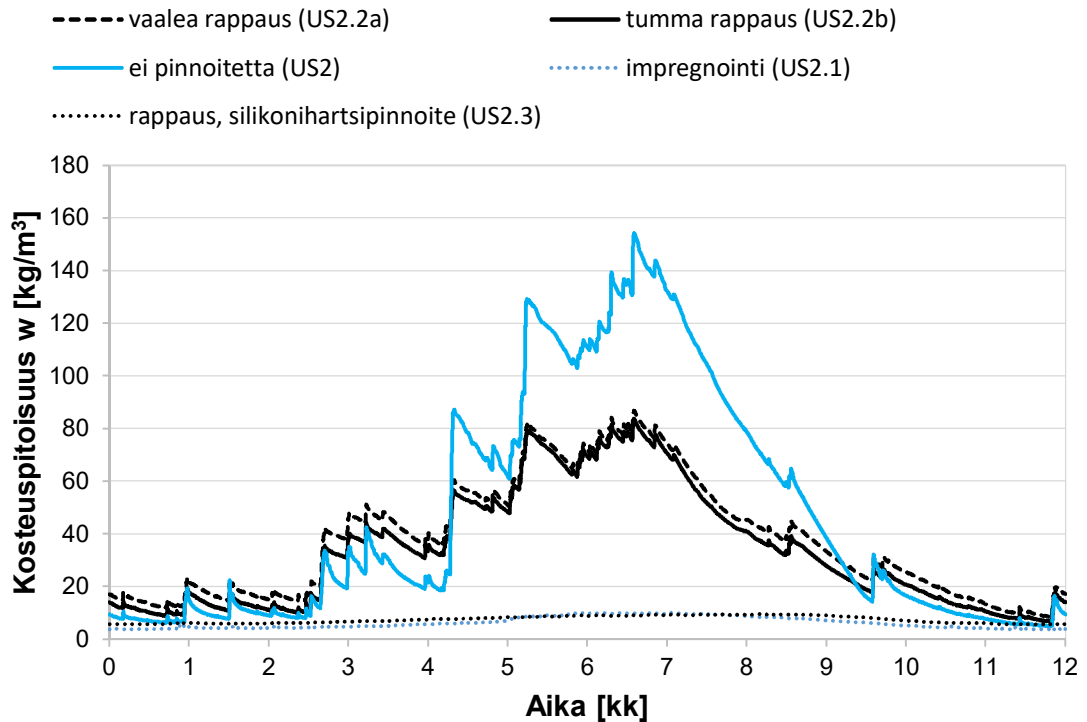
Kuva 5.12 Homeindeksien kehittyminen ajan funktiona tarkastelupisteessä 1 eri pinnoitevaihtoehtojen mukaan. (Tiiliseinä 360 mm, kalsiumsilikaatti 100 mm)

Pelkkä rappaaminen pienentää homeindeksejä tarkastelupisteissä vain vähän. Rappauksen värillä on vaikutusta ulkopinnan säteilyominaisuuksiin ja siten seinän absorboimaan lämpösäteilyyn. Vaalea rappaus voi jopa kasvattaa homeindeksiä pinnoittamattomaan tiileen verrattuna. Rappauksen vaikutus rakenteen toimintaan havaitaan hyvin kuvista 5.13 ja 5.14. Rappaus vähentää rakenteeseen tunkeutuvan veden määrää ja talvella koko rakenteen keskimääräinen kosteuspitoisuus jopa puolittuu pinnoittamattomaan tiileen verrattuna. Rappaus kuitenkin hidastaa kosteuden poistumista seinästä, joten suhteellinen kosteus tarkastelupisteissä pysyy kesällä korkeamana kuin pinnoittamattomalla seinällä.



Kuva 5.13 Tarkastelupisteen 1 suhteellinen kosteus pinnoitteen mukaan. Vaaka-akseli alkaa heinäkuun alusta ja päättyy seuraavan vuoden heinäkuuhun.

Impregnointiaineen käyttö parantaa rakenteen lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa huomattavasti. Ero impregnoitun ja pinnoittamattoman tiilen välillä on suuri kaikkina vuodenaikoina. Impregnointi alentaa tarkastelupisteiden suhteellista kosteutta pinnoittamattomaan tiileen verrattuna, eikä vaikuta hidastavan rakenteen kuivumista. Rappauksen päälle asennettava silikonihartsipinnoite hidastaa veden tunkeutumista rakenteeseen jopa paremmin kuin impregnointi, mutta myös silikonihartsipinnoitteen kohdalla rappauksen kuivumista hidastava vaikutus on havaittavissa keväällä ja alkukesällä (kuvissa kuukaudet 8–12) impregnointiin verrattuna.



Kuva 5.14 Seinärakenteen keskimääräinen kosteuspitoisuus pinnoitteen mukaan.

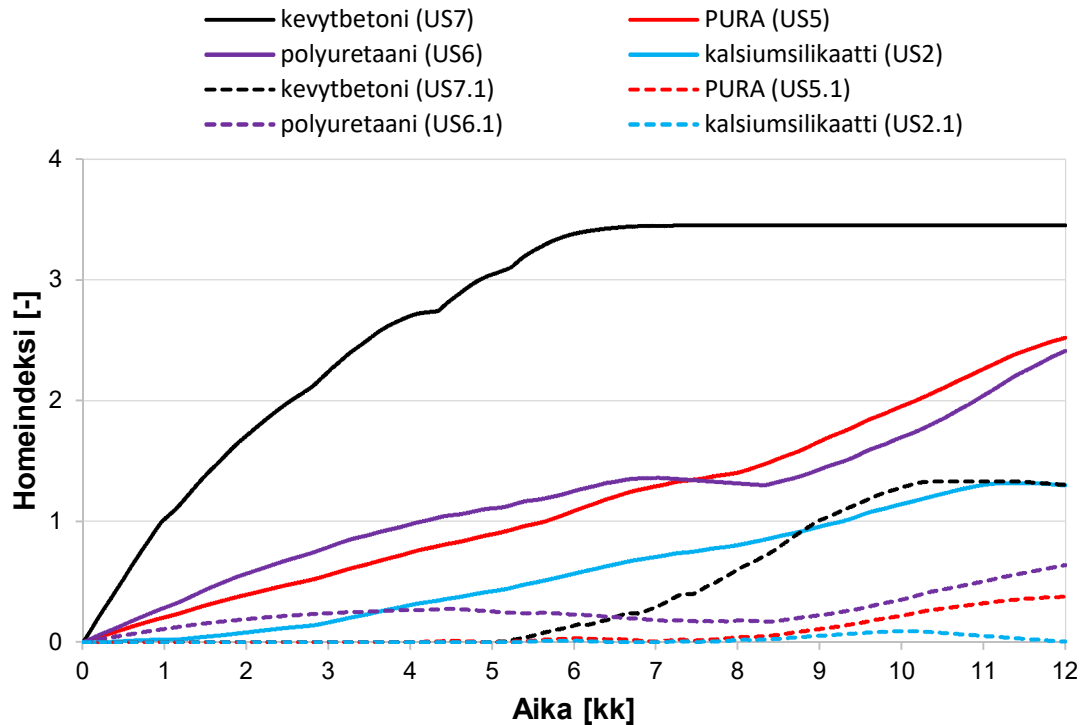
Rakenteen kosteuspitoisuudella on vaikutusta rakenteen lämmönjohtavuuteen ja kuvasta 5.14 voidaan havaita rappauksen etu pinnoittamattomaan seinään koko rakenteen kosteuspitoisuudessa. Impregnointi ja rappauksen silikonihartsipinnoite alentavat rakenteen kosteuspitoisuutta selvästi enemmän pelkkään rappaukseen verrattuna.

5.3.2 Impregnoinnin vaikutus eri lämmöneristeillä

Aiemmin tutkittujen lämmöneristeiden toimintaa tutkittiin uudelleen tiilen impregnointipinnoitteen kanssa. Impregnoinnin vaikutus rakenteiden maksimihomeindeksiin on esitetty taulukossa 5.6 ja homeindeksien kehittymiseen ajan funktiona kuvassa 5.15.

Taulukko 5.6 Maksimihomeindeksien maksimiarvot lämmöneristeen mukaan. (Tiiliseinä 360 mm, lämmöneristeen paksuus 100 mm)

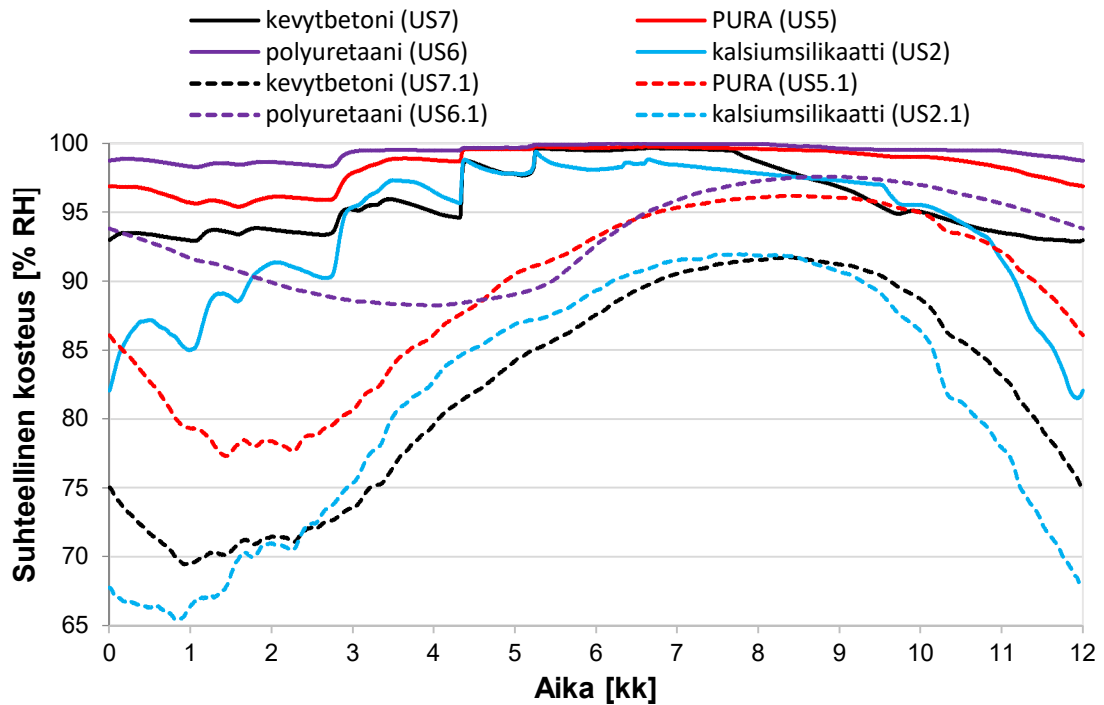
Rakenne	pinnoite	lämmöneriste	paksuus [mm]	TP1	TP2	TP3	TP4
US2	-	kalsiumsilikaatti	100	1,32	1,17	1,17	0,94
US2.1	impregnointi	kalsiumsilikaatti	100	0,09	0,09	0	0
US3.1	impregnointi	perliitti	100	0,61	0,68	0	0
US4.1	impregnointi	IQ-Therm	100	0,47	0,47	0	0
US5.1	impregnointi	Redstone PURA	100	0,38	0,38	0	0
US6.1	impregnointi	al. pinnoitettu PUR-levy	100	0,72	0,72	0	0
US7.1	impregnointi	kevytbetoni	100	1,33	1,32	0	0



Kuva 5.15 Homeindeksien kehittyminen ajan funktiona tarkastelupisteessä 1 lämmöneristeen mukaan. Impregnoituneet rakenteet on esitetty katkoviivalla. Vaaka-akseli alkaa heinäkuun alusta ja päättyy seuraavan vuoden heinäkuuhun. (Tiiliseinä 360 mm, lämmöneristeen paksuus 100 mm)

Impregnointi parantaa rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa kaikilla lämmöneristeillä. Kuvassa 5.15 on esitetty tarkastelupisteessä 1 homeindeksien kehittyminen ajan funktiona lämmöneristeen mukaan sekä impregnoituilla rakenteilla US2.1, US5.1, US6.1 ja US7.1 että pinnoittamattomilla rakenteilla US2, US5, US6, US7. Polyuretaanilevy, PURA ja kalsiumsilikaatti toimivat impregnoituna hyvin, eikä homeen kasvua esiinny. Kevytbetonilla lämmöneristetyssä rakenteessa homeen kasvua voi esiintyä myös impregnointipinnoitteen kanssa.

Kuvassa 5.16 on esitetty tarkastelupisteessä 1 suhteellinen kosteus lämmöneristeen mukaan sekä impregnoituilla rakenteilla että pinnoittamattomilla rakenteilla. Suhteellinen kosteus pienenee kaikilla lämmöneristeillä impregnoinnin vaikutuksesta. Impregnoitussa rakenteessa kevytbetoni vaikuttaa toimivan tarkastelupisteessä suhteellisen kosteuden kannalta lähes yhtä hyvin kuin kalsiumsilikaatti, mutta homeen kasvu tapahtuu kevytbetonissa muita tarkasteltuja materiaaleja nopeammin. Impregnoinnista huolimatta polyuretaanilevyllä suhteellinen kosteus pysyy homeen kasvulle mahdollisena läpi vuoden, mutta 100 mm paksulla eristeellä tarkastelupisteessä lämpötila laskee talviaikaan homeen kasvun kannalta liian matalaksi.



Kuva 5.16 Suhteellinen kosteus tarkastelupisteessä 1 lämmöneristeen mukaan. Impregnoitujen rakenteiden on esitetty katkoviivalla. (Tiiliseinä 360 mm, lämmöneristeen paksuus 100 mm)

5.4 Tulevaisuuden ilmastot

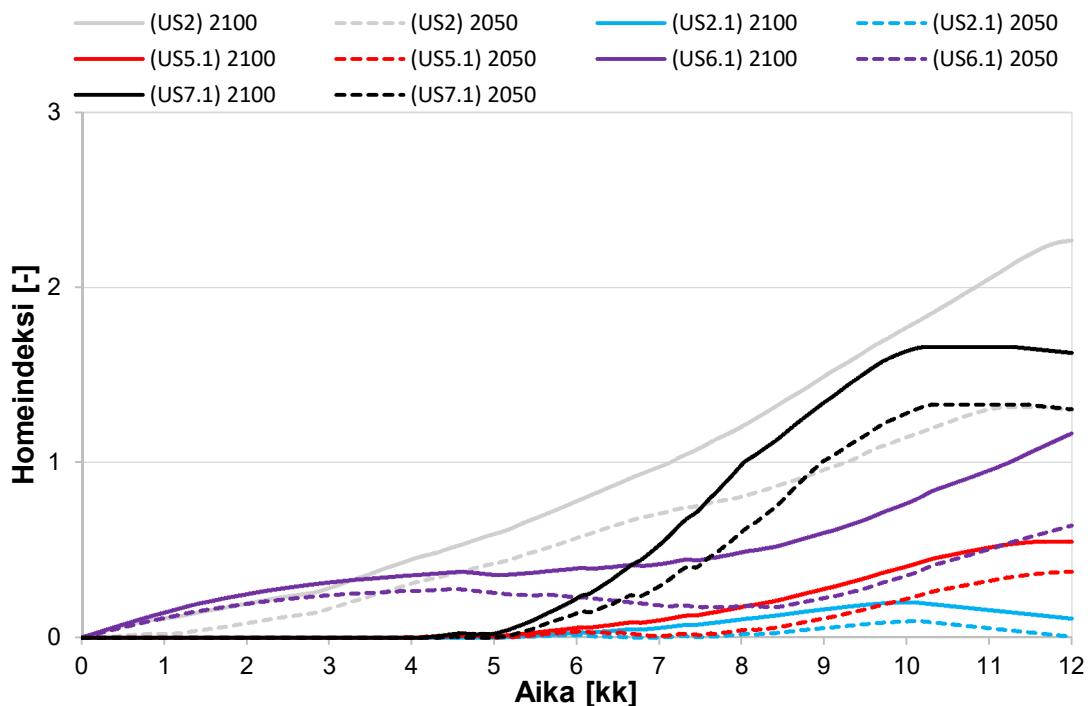
Alkuperäisen rakenteen US1, lämmöneristetyt rakenteet US2 sekä impregnoitujen lämmöneristettyjen rakenteiden US2.1...US7.1 toimintaa on tarkasteltu myös tulevaisuuden ilmastossa. Tässä työssä nykyilmaston olosuhteina pidetään nykyisten rakennusfysikaalisten testivuosiensa kehitystyössä vuodelle 2050 ennustettuja olosuhteita ja vuoden 2100 testivuodet ovat vielä ankarampia tulevaisuutta kuvaavia ilmastoja. Rakenteiden maksimihomeindeksit nykyisissä ja tulevissa ilmastoissa on esitetty taulukossa 5.7, josta havaitaan tulevien ilmastojen nostavan homeindeksien maksimi-arvoja nykyisestä tasosta. Maksimihomeindeksi nousee hieman yli sallitun tason jo olemassa olevan lämmöneristämättömän rakenteen US1 sisäpinnassa. Lämmöneristetyssä rakenteessa US2 maksimihomeindeksien kasvu kaikissa tarkastelupisteissä tulevaisuuden ilmastossa on huomattava nykyilmastoon verrattuna. Vuoden 2100 olosuhteissa maksimihomeindeksi ylittää raja-arvon 1 myös rakenteen US2 sisäpinnassa.

Taulukko 5.7 Maksimihomeindeksit nykyisissä ja tulevaisuuden ilmastossa. Harmaa pohja tarkoittaa impregnoitua rakennetta. (Tiiliseinä 360 mm)

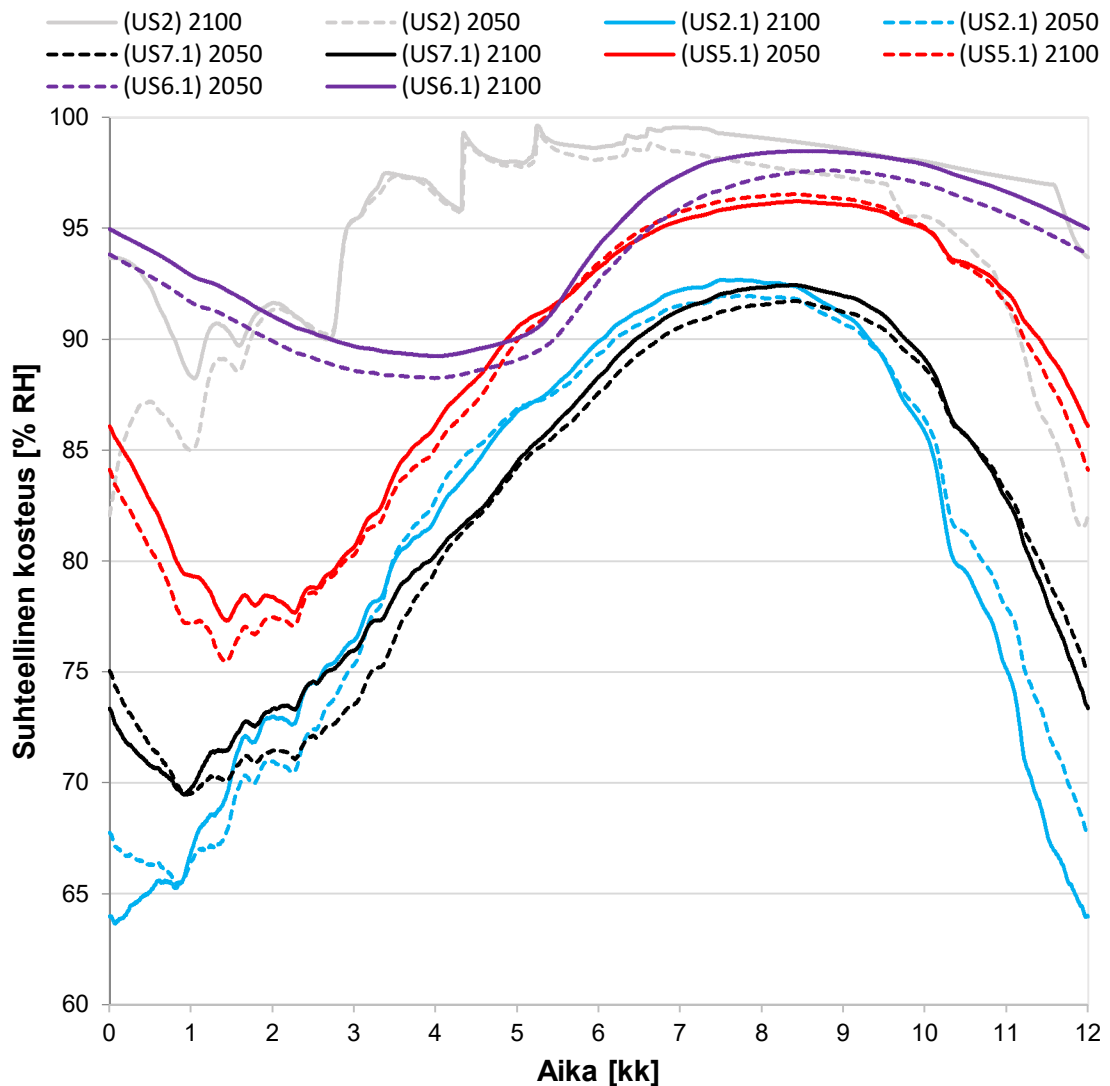
Rakenne	lämmöneriste	paksuus [mm]	ilmasto	suunta	TP1	TP2	TP3	TP4
US1	-		Vantaa 2050	S	0,98			
US1	-		Vantaa 2100	S	1,27			
US2	kalsiumsilikaatti	100	Vantaa 2050	S	1,32	1,17	1,17	0,94
US2	kalsiumsilikaatti	100	Vantaa 2100	S	2,27	2,16	2,00	1,77

US2.1	kalsiumsilikaatti	100	Jokioinen 2050	N	0,09	0,09	0	0
US2.1	kalsiumsilikaatti	100	Jokioinen 2100	N	0,20	0,19	0	0
US3.1	perliitti	100	Jokioinen 2050	N	0,61	0,68	0	0
US3.1	perliitti	100	Jokioinen 2100	N	0,81	0,84	0	0
US4.1	IQ-Therm	100	Jokioinen 2050	N	0,47	0,47	0	0
US4.1	IQ-Therm	100	Jokioinen 2100	N	0,75	0,76	0	0
US5.1	Redstone PURA	100	Jokioinen 2050	N	0,38	0,38	0	0
US5.1	Redstone PURA	100	Jokioinen 2100	N	0,55	0,56	0	0
US6.1	al. pinnoitettu PUR-levy	100	Jokioinen 2050	N	0,72	0,72	0	0
US6.1	al. pinnoitettu PUR-levy	100	Jokioinen 2100	N	1,17	1,18	0	0
US7.1	kevytbetoni	100	Jokioinen 2050	N	1,33	1,32	0	0
US7.1	kevytbetoni	100	Jokioinen 2100	N	1,66	1,65	0	0

Homeindeksin kehittyminen ajan funktiona rakenteiden tarkastelupisteessä 1 on lisäksi esitetty myös kuvassa 5.17. Impregnoitu rakenne US2.1 toimii hyvin myös tulevaisuuden ilmastossa. Maksimihomeindeksi kasvaa nykyilmastoon verrattuna, mutta pysyy selvästi alle sallitun tason. Myös kalsiumsilikaattia vähemmän kapillaarinen PURA toimii impregnoituna rakenteena US5.1 tulevaisuuden ilmastossa. Polyuretaanilla lämmöneristetyt rakenteet US6.1 homeindeksi kasvaa nykyilmaston arvoon verrattuna enemmän kuin muilla lämmöneristeillä, ja ylittää homeindeksin raja-arvon tulevaisuuden olosuhteissa impregnoinnista huolimatta. Kevytbetonilla lämmöneristetty rakenne US7.1 ylitti homeindeksin raja-arvon jo nykyilmastossa. Vuoden 2100 ilmastossa kypseisen rakenteen homeindeksin maksimiarvo kasvaa vielä entisestään.



Kuva 5.17 Homeindeksien kehittyminen ajan funktiona tarkastelupisteessä 1 nykyisissä (2050) (katkoviiva) ja tulevaisuuden ilmastoissa (ehjä viiva). Impregnoimaton rakenne US2 harmaalla. (Tiiliseinä 360 mm, lämmöneriste 100 mm)



Kuva 5.18 Suhteellinen kosteus tarkastelupisteessä 1 nykyisessä (2050) (katkoviiva) ja tulevaisuuden ilmastossa (ehjä viiva). Impregnoimaton rakenne US2 harmaalla. (Tiiliseinä 360 mm, lämmöneriste 100 mm)

Tarkastelupisteen 1 suhteellinen kosteus eri ilmastoissa on esitetty kuvassa 5.18. Pinnoittamattomalla rakenteella US2 suhteellinen kosteus pysyy korkealla tulevaisuuden ilmastossa etenkin keväällä, kun kuivuminen alkaa nykyistä myöhemmin. Suhteellinen kosteus ei laske kesällä enää homeen kasvun kannalta kriittisen tason alapuolelle kuten nykyilmastossa.

Kalsiumsilikaatilla lämmöneristetyt impregnoitun rakenteen US2.1 osalta tulevaisuuden ilmasto ei muuta suhteellista kosteutta merkittävästi. Kesäaikainen suhteellisen kosteuden lasku selittyy tulevaisuuden ilmaston korkeammilla lämpötiloilla. Myös muilla lämmöneristeillä suhteellinen kosteus pääasiassa kasvaa koko tarkasteluvuoden aikana tulevaisuuden ilmastossa. PURA eristeellä suhteellinen kosteus laskee hieman talvikuukausina ja kasvaa kesäkuukausina nykyilmastoon verrattuna. Polyuretaanilla lämmöneristetyt rakenteen US6.1 suhteellinen kosteus kasvaa nykyilmaston arvoon verrattuna enemmän kuin muilla lämmöneristeillä, ja pysyy 90 % RH yläpuolella lähes koko tarkasteluvuoden.

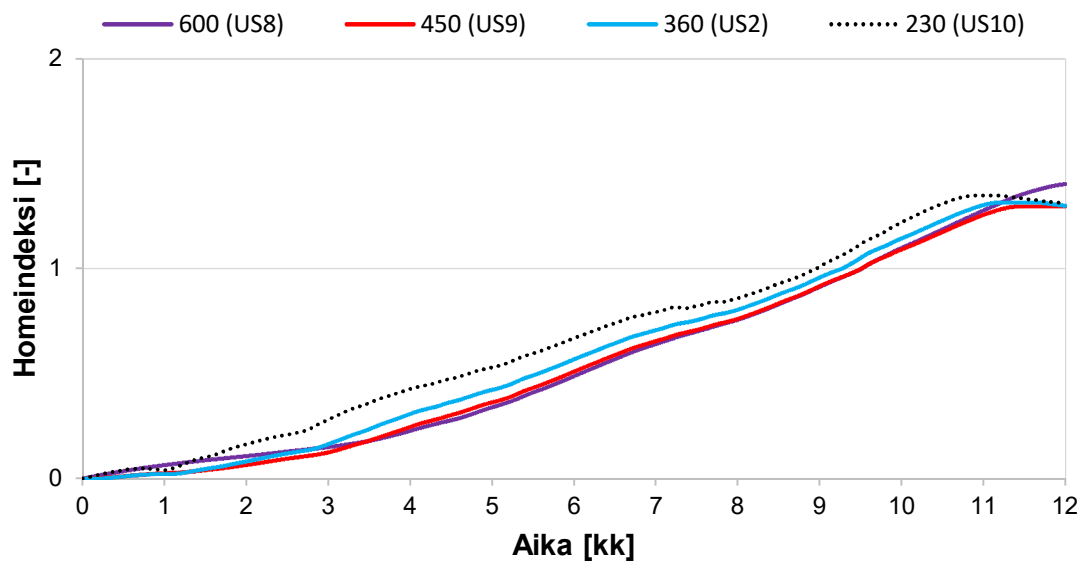
5.5 Tiiliseinän paksuus

Tiiliseinän paksuuden vaikutusta tuloksiin on tutkittu neljällä seinäpaksuudella. Rakenteiden maksimihomeindeksit on esitetty taulukossa 5.8 ja homeindeksien kehittyminen ajan funktiona kuvassa 5.19.

Taulukko 5.8 Maksimihomeindeksit tiiliseinän paksuuden mukaan. (Vantaa 2050)

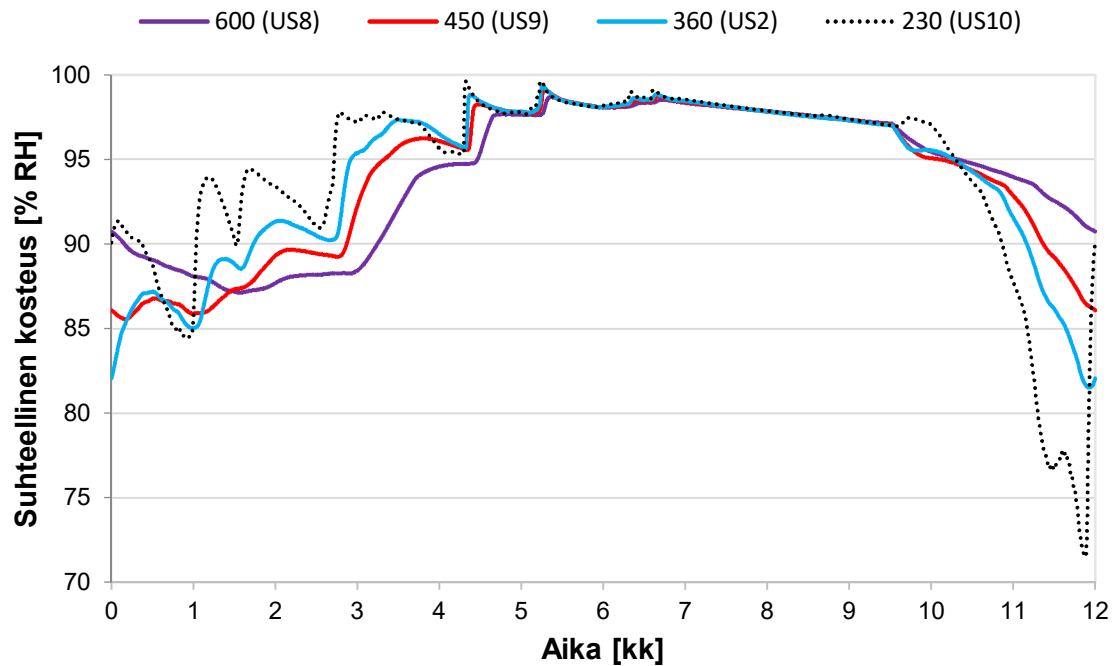
Rakenne	seinäpaksuus [mm]	lämmöneriste	paksuus [mm]	U-arvo [W/(m ² ·K)]	TP1	TP2	TP3	TP4
US8	600	kalsiumsilikaatti	100	0,37	1,40	1,21	0,92	0,72
US9	450	kalsiumsilikaatti	100	0,41	1,30	1,12	1,07	0,87
US2	360	kalsiumsilikaatti	100	0,43	1,32	1,17	1,17	0,94
US10	230	kalsiumsilikaatti	100	0,48	1,35	1,25	1,35	1,02

Sisäpuolelta lämmöneristettävän tiiliseinän paksuus vaikuttaa siihen missä tarkastelupisteissä homeen kasvua ei homeindeksin maksimiarvon perusteella havaita. Paksuimmalla rakenteella US8 homeindeksin maksimiarvon raja-arvo ylittyy vain lämmöneristeen ulkopuolisissa tarkastelupisteissä TP1 ja TP2. Ohuimmalla rakenteella US10 homeen kasvun raja-arvo ylittyy myös rakenteen sisäpinnassa.



Kuva 5.19 Homeindeksien kehittyminen ajan funktiona tarkastelupisteessä 1 tiiliseinän paksuuden [mm] mukaan. (Vantaa 2050, kalsiumsilikaatti 100 mm)

Tarkastelupisteessä 1 seinäpaksuus ei näytä vaikuttavan homeindeksin maksimiarvojen suuruuteen oleellisesti, mutta se vaikuttaa homeen kasvun ajoittumiseen. Ohuemmalla seinäpaksuudella homeindeksi kasvaa loppukesällä ja syksyllä nopeammin kuin paksummilla seinillä. Paksuimmalla seinällä homeindeksi kasvaa loppukevällä ja kesällä nopeammin kuin ohuemmillä seinillä.



Kuva 5.20 Suhteellinen kosteus tarkastelupisteessä 1 tiiliseinän paksuuden [mm] mukaan. Vaaka-akseli alkaa heinäkuun alusta ja päättyy seuraavan vuoden heinäkuuhun. (Vantaa 2050, kalsiumsilikaatti 100 mm)

Syyt homeen kasvun ajoittumiseen nähdään hyvin kuvasta 5.20. Ohuella seinäpaksuudella rakenteella US10 (230 mm) tarkastelupisteen 1 suhteellinen kosteus vaihtelee sään mukaan nopeammin kuin paksuimmilla seinillä. Huomion arvoista on suhteellisen kosteuden lasku alle 75 % RH ja nousu takaisin 90 % RH tuntumaan lyhyessä ajassa kesäaikaan (kuvissa kuukaudet 11–12). Tarkastelupisteen 1 olosuhteita tarkasteltaessa havaitaan, että paksumpi seinä kastuu ja kuivuu hitaammin kuin ohut seinä. Seinäpaksuudella on myös vaikutus tarkastelupisteen lämpötilaan, joka muuttuu ohuella seinällä enemmän ulkoilman lämpötilan muutosten mukaan kuin paksulla seinällä. Tämä hidastaa homeen kasvua talvella eniten ohuilla seinäpaksuuksilla, sillä homeen kasvu on hitaampaa kylmissä lämpötiloissa.

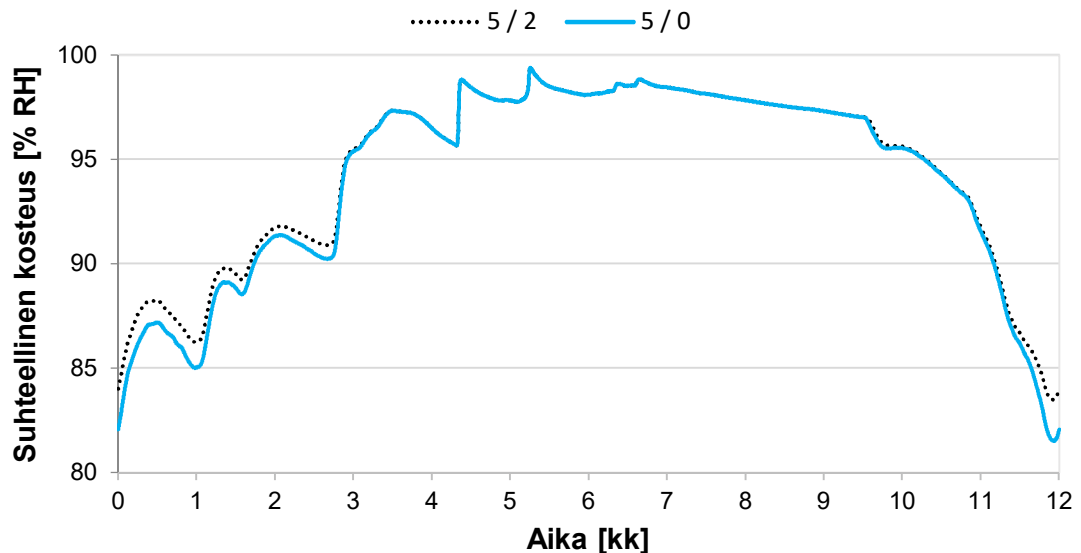
5.6 Suoritetut herkkyystarkastelut

5.6.1 Sisäilman kosteuslisä

Sisäilman kesäaikaisena kosteuslisänä tulisi oppaan RIL 107-2012 (2012) mukaan käyttää arvoa 2 g/m^3 , aiemmissa työssä tehdyissä tarkasteluissa on käytetty arvoa 0 g/m^3 . Homeindeksien maksimi-arvot kummallakin tavalla on esitetty taulukossa 5.9. RIL 107:n mukainen arvo kasvattaa maksimihomeindeksien arvoja hieman, muttei erolla vaikuta olevan rakenteen toiminnan kannalta ratkaisevaa merkitystä.

Taulukko 5.9 Maksimihomeindeksit sisäilman kosteuslisän mukaan. (Vantaa 2050, tiiliseinä 360 mm)

Rakenne	lämmöneriste	paksuus [mm]	sisäilman kosteuslisä [g/m ³]	TP1	TP2	TP3	TP4
US2	kalsiumsilikaatti	100	5 / 0	1,32	1,17	1,17	0,94
US2	kalsiumsilikaatti	100	5 / 2	1,37	1,23	1,19	0,94



Kuva 5.21 Suhteellinen kosteus tarkastelupisteessä 1 sisäilman kosteuslisän (talvella / kesällä) [g/m³] mukaan. (Vantaa 2050, tiiliseinä 360 mm, kalsiumsilikaatti 100 mm)

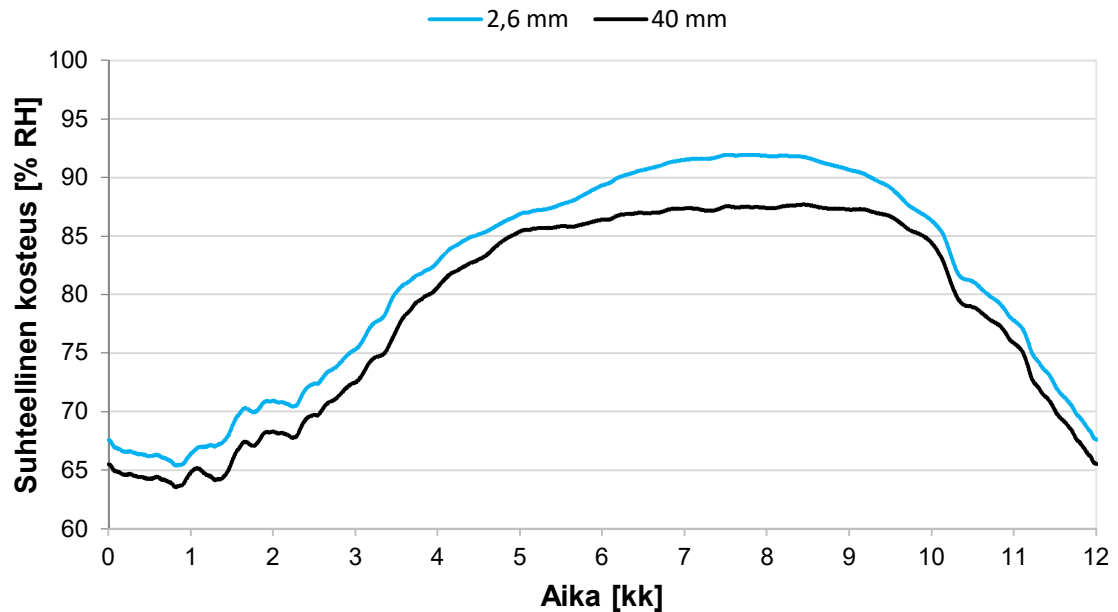
Tarkastelupisteen 1 kesäaikainen suhteellisen kosteuden nousu havaitaan kuvasta 5.21. Kosteuslisän muutoksen vaikutus on kohtuullisen pieni ja kohdistuu homeen kasvun kannalta vähiten kriittiseen aikaan.

5.6.2 Impregnointiaineen tunkeutumissyvyys

Tässä tutkimuksessa tiilen impregnointiaineen tunkeutumissyvyytenä d_p on käytetty 2,6 mm. Soulios tutkimusryhmineen on tutkinut tunkeutumissyvyyttä julkaisussaan (2020) ja havainnut tunkeutumissyvyyden voivan olla käytetystä tiilestä ja impregnointiaineesta riippuen paljon tätä suurempi. Kalsiumsilikaatilla lämmöneristetyin rakenteen maksimihomeindeksit on laskettu kahdella tunkeutumissyvyydellä ja esitetty taulukossa 5.10. Suurempi tunkeutumissyvyys pienentää tarkastelupisteiden homeindeksien maksimi-arvoja entisestään.

Taulukko 5.10 Maksimihomeindeksit impregnointiaineen tunkeutumissyvyyden mukaan. (Jokioinen 2050, tiiliseinä 360 mm)

Rakenne	d_p [mm]	lämmöneriste	paksuus [mm]	TP1	TP2	TP3	TP4
US2.1	2,6	kalsiumsilikaatti	100	0,09	0,09	0	0
US2.1	40	kalsiumsilikaatti	100	0,03	0,02	0	0



Kuva 5.22 Suhteellinen kosteus tarkastelupisteessä 1 impregnointiaineen tunkeutumissyvyyden mukaan. (Jokioinen 2050, tiiliseinä 360 mm, kalsiumsilikaatti 100 mm)

Kuvasta 5.22 havaitaan, miten suurempi impregnointiaineen tunkeutumissyvyys laskee tarkastelupisteeseen 1 suhteellista kosteutta, eron ollessa suurimmillaan talvella. Suurempi tunkeutumissyvyys ei näytä hidastavan rakenteen kuivumista keväällä ja lyhentää homeen kasvun kannalta otollisten olosuhteiden esiintymisaikaa tiilen ja lämmöneristeen välissä.

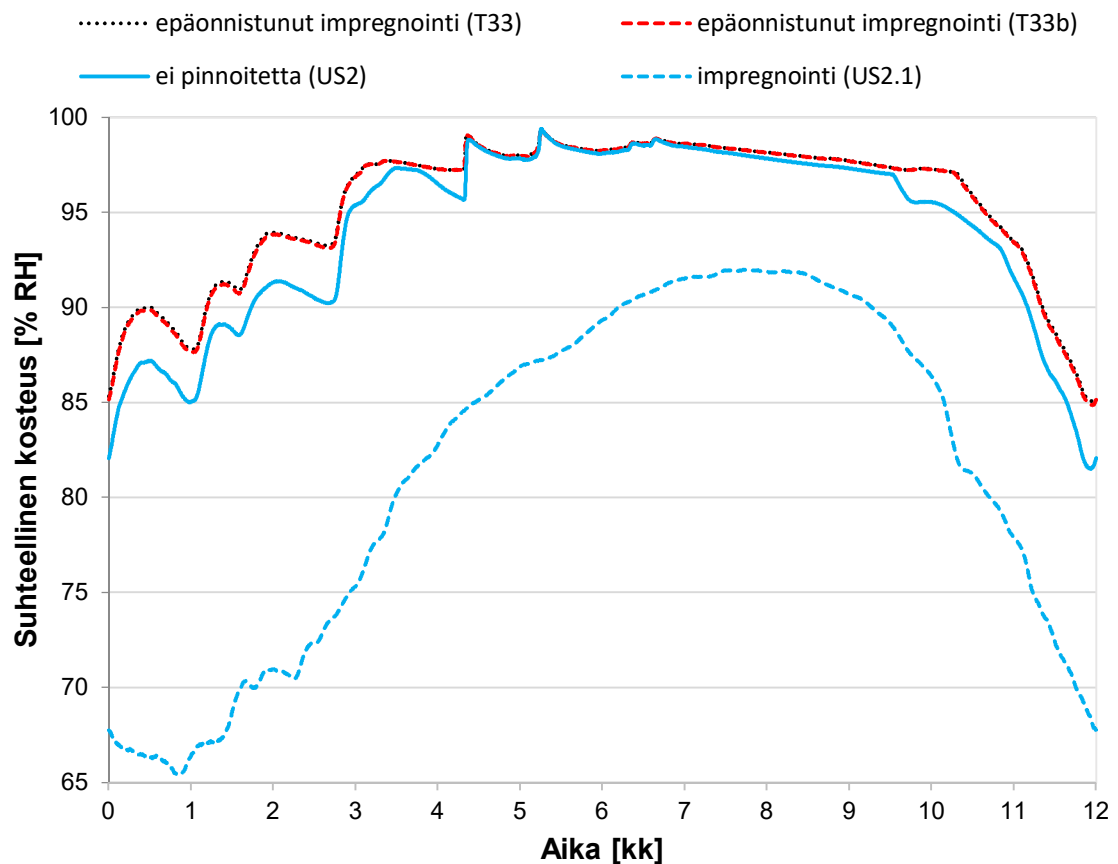
5.6.3 Epäonnistunut impregnointi

Impregnointi voi muodostua joillakin vesiliukoisilla impregnointiaineilla aluksi heikoksi, mutta paranee lopulta sateen vaikutuksesta. Pysyvästi heikko impregnointi voi kuitenkin syntyä työvirheen seurauksena, esimerkiksi asennettaessa impregnointiaine puhdistamattomalle tiilipinnalle. (Soulis *et al.*, 2020; Soulis, de Place Hansen & Peuhkuri, 2021a) Tässä tarkastelussa tiilen hydrofobisen kerroksen ominaisuudet vastaavat vesiliukoisella impregnointiaineella käsitellyn tiilen ominaisuuksia ennen sadeveden vaikutusta. Tarkasteltava tilanne on siis pitkän ajan näkökulmasta hypoteettinen, mutta lämmöneristetyn rakenteen osalta ollaan kiinnostuneita miten verrattain heikko impregnointi vaikuttaa tuloksiin.

Taulukko 5.11 Maksimihomeindeksit impregnoinnin epäonnistuessa. Tulosten vertailua varten eri tapaukset on numeroitu kuten liitteessä B. (Tiiliseinä 360 mm)

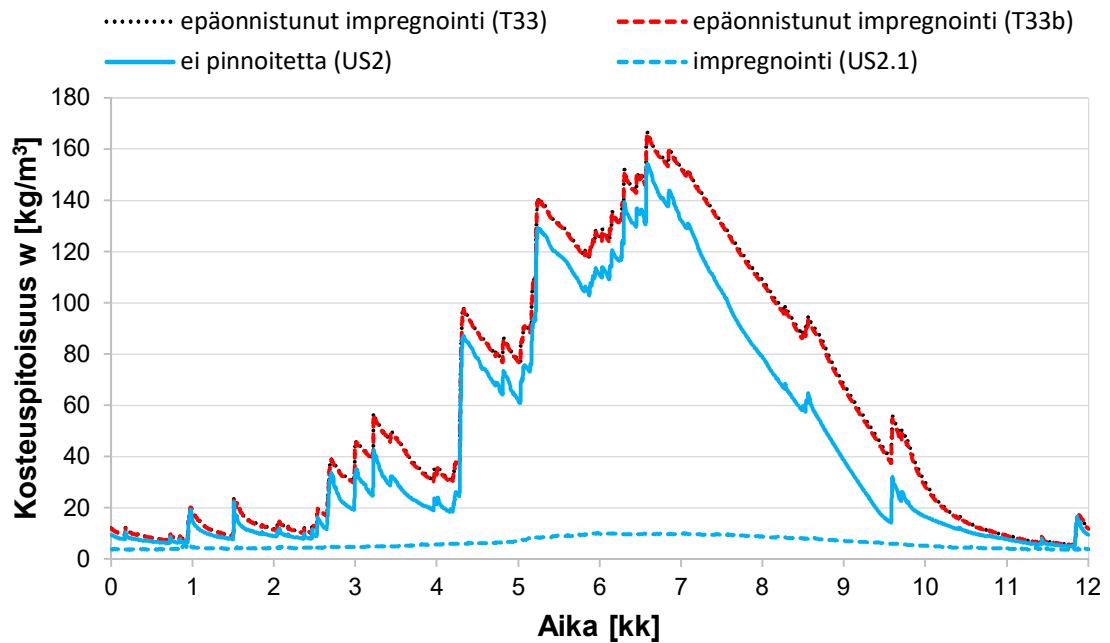
Rakenne	Tapaus	A_w [kg/(m ² ·s ^{0,5})]	lämmöneriste	paksuus [mm]	TP1	TP2	TP3	TP4
US2	3	0,4	kalsiumsilikaatti	100	1,32	1,17	1,17	0,94
US2.1	4	0,0018	kalsiumsilikaatti	100	0,09	0,09	0	0
-	33	0,033	kalsiumsilikaatti	100	1,65	1,50	1,50	1,14
-	33b	0,033	kalsiumsilikaatti	100	1,63	1,49	1,48	1,13

Taulukossa 5.11 on esitetty maksimihomeindeksit lämmöneristetylle rakenteelle ilman impregnointia sekä pinnoitettuna impregnoituneen tiilen veden imeytymiskertoimen A_w mukaan. Epäonnistunutta impregnointia on tutkittu kahdella eri diffuusiovastuskertoimella. Tapauksessa 33 impregnointiaine kasvattaa tiilen diffuusiovastuskerrointa vastaavalla tavalla kuin onnistuneessa impregnoinnissa, mutta tiilen veden imeytymiskerroin jää suuremmaksi kuin onnistuneessa impregnoinnissa. Tapauksessa 33b impregnoitun tiilen diffuusiovastuskerroin vastaa käsittelemätöntä tiiltä, eli on noin 10 % pienempi kuin tapauksessa 33. Hyvin heikko impregnointi nostaa tarkastelupisteiden maksimihomeindeksit korkeammaksi kuin pinnoittamattomalla seinärakenteella.



Kuva 5.23 Suhteellinen kosteus tarkastelupisteessä 1 impregnoinnin epäonnistuessa. (Tiiliseinä 360 mm, kalsiumsilikaatti 100 mm)

Epäonnistuneen impregnoinnin vaikutus tarkastelupisteessä 1 suhteelliseen kosteuteen on esitetty kuvassa 5.23. Epäonnistunut impregnointi nostaa suhteellista kosteutta ja hidastaa kuivumista pinnoittamattomaan tiileen verrattuna. Ero heikon ja hyvän impregnoinnin välillä on huomattava.



Kuva 5.24 Seinärakenteen keskimääräinen kosteuspitoisuus impregnoinnin epäonnistuessa.

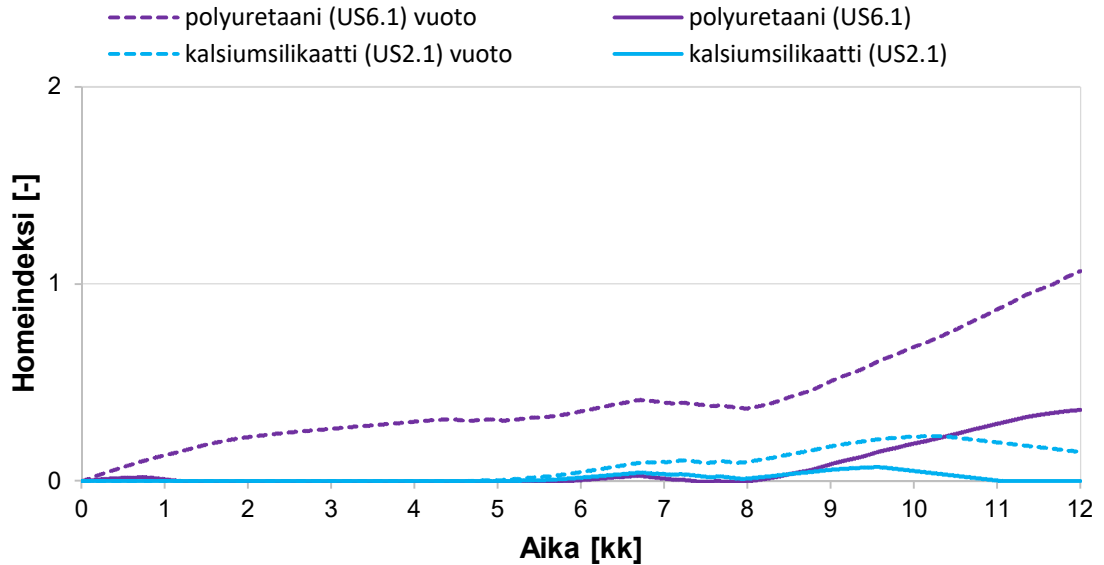
Kuvan 5.24 perusteella voidaan todeta, että toistuvissa kastumis-kuivumissykleissä epäonnistunut impregnointi päästää sadevettä rakenteeseen kuten pinnoittamaton rakenne, mutta kuivuminen alkaa ja jatkuu pinnoittamatonta rakennetta hitaammin. Tutkittujen impregnointiaineiden vaikutus tiilen vesihöyrynvastukseen on kohtalaisen pieni, mutta impregnointi hidastaa myös tiilen kapillaarista kuivumista, mikä näkyy tilanteissa, joissa impregnoinnin läpi on päässyt suuria määriä vettä.

5.6.4 Halkeamat impregnoinnissa

Impregnoinnin jälkeen seinään syntyvät halkeamat voivat päästää sadevettä impregnoinnin taakse, josta se voi uudelleen jakautua tiilimuuriin. Kalsiumsilikaatilla ja polyuretaanilla eristetyt rakenteet simuloitiin uudelleen siten, että 2 % seinälle kohdistuvasta viistosateesta kohdistuu vuotovenä suoraan ulkopinnan taakse 50 mm syvyyteen. Vuotoveden vaikutus rakenteiden maksimihomeindekseihin on esitetty taulukossa 5.12 ja homeindeksien kehittymiseen ajan funktiona kuvassa 5.25. Halkeilleen impregnoinnin tapauksessa mitoittava testivuosi on Vantaa 2050, kun ilman halkeamien vaikutusta testivuodeksi valikoitui Jokioinen 2050.

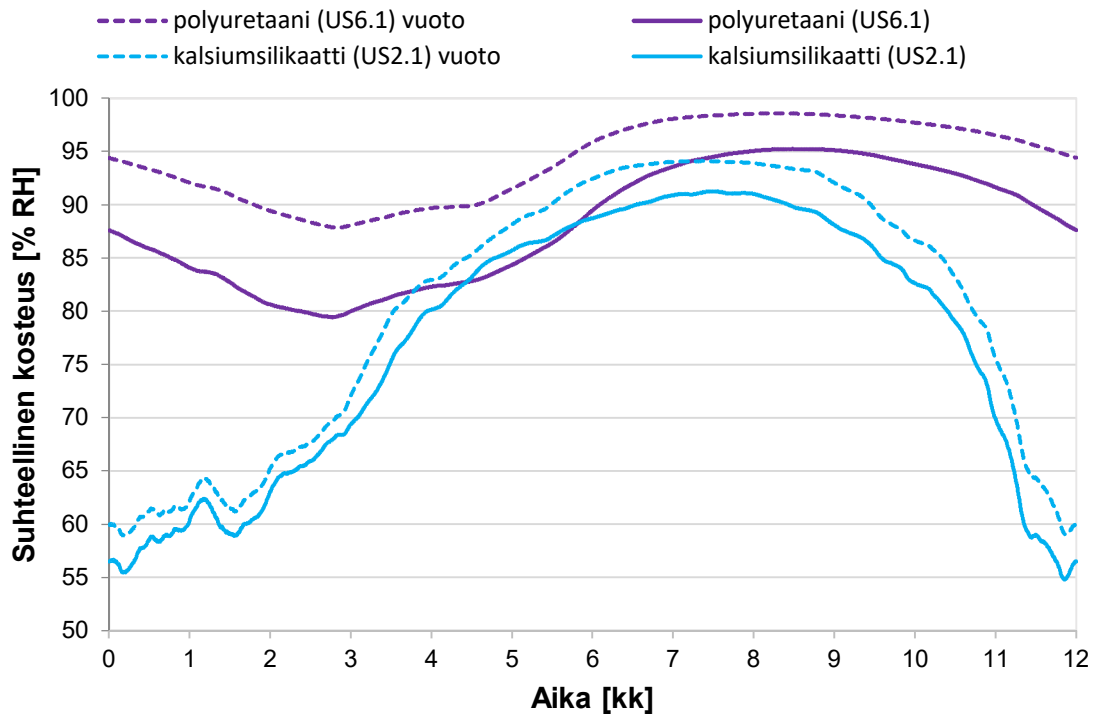
Taulukko 5.12 Impregnoinnin halkeamien vaikutus maksimihomeindekseihin.

Rakenne		lämmöneriste	paksuus [mm]	TP1	TP2	TP3	TP4
US2.1		kalsiumsilikaatti	100	0,09	0,09	0	0
US2.1	vuoto	kalsiumsilikaatti	100	0,23	0,21	0	0
US6.1		al. pinnoitettu PUR-levy	100	0,72	0,72	0	0
US6.1	vuoto	al. pinnoitettu PUR-levy	100	1,07	1,08	0	0



Kuva 5.25 Impregnoinnin halkeamien vaikutus homeindeksien kehittymiseen ajan funktiona tarkastelupisteessä 1. Halkeilun vaikutus on esitetty katkoviivalla. (Tiiliseinä 360 mm)

Kalsiumsilikaatilla eristetty rakenne toimii hyvin myös vuotoveden vaikuttaessa. Polyuretaanilla eristetyssä rakenteessa homeindeksi kasvaa vuotoveden tapauksessa enemmän ja homeindeksin maksimiarvo ylittää sallitun tason. Polyuretaanieristys toimii kuitenkin yllättävän hyvin, vaikka tarkastelupisteet voivat kuivua sisäänpäin melko huonosti. Homeindeksitarkastelun perusteella kalsiumsilikaatilla lämmöneristetty massiivitiiliseinä on vikasietoinen impregnoinnin läpäisemälle vuotovedelle.



Kuva 5.26 Impregnoinnin halkeamien vaikutus tarkastelupisteessä 1 suhteelliseen kosteuteen. Halkeilun vaikutus katkoviivalla.

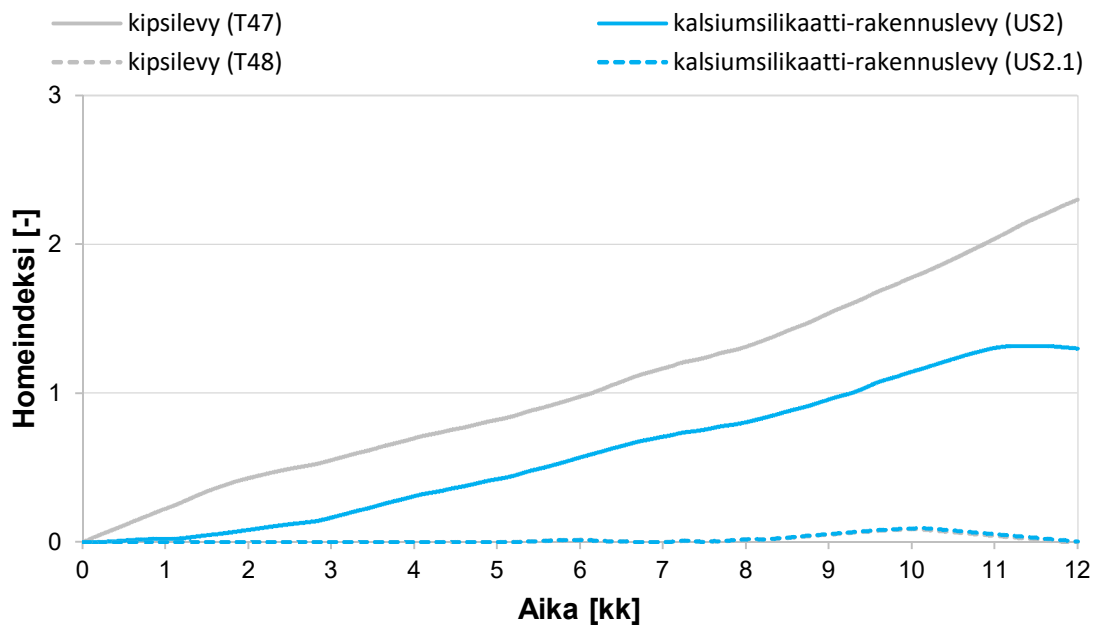
Kalsiumsilikaattieristeellä vuotovesi nostaa tarkastelupisteen 1 suhteellista kosteutta vähemmän kuin polyuretaanieristeellä, mikä on nähtävissä kuvasta 5.26. Laskettaessa tarkastelupisteen 1 suhteellista kosteutta, eri rakenteille on vertailtavuuden parantamiseksi käytetty impregnoitujen rakenteiden testivuotena Vantaa 2050, vaikka maksimihomeindeksin kannalta mitoittava testi-vuosi ilman halkeamien vaikutusta on Jokioinen 2050.

5.6.5 Väärä sisäverhouslevy

Aiemmin tutkituissa tapauksissa kapillaaristen lämmöneristeiden kanssa on käytetty sisäverhouslevynä myös kapillaarisia ominaisuuksia omaavaa kalsiumsilikaatti-sisäverhouslevyä. Tässä tarkastelussa on tutkittu kalsiumsilikaatilla eristetyn rakenteen toimintaa, kun sisäverhouslevynä onkin tavallinen kipsilevy. Sisäverhouslevyn vaikutus maksimihomeindekseihin pinnoittamattomassa ja impregnoitussa rakenteessa on esitetty taulukossa 5.13 ja homeindeksien kehittymiseen ajan funktiona kuvassa 5.27.

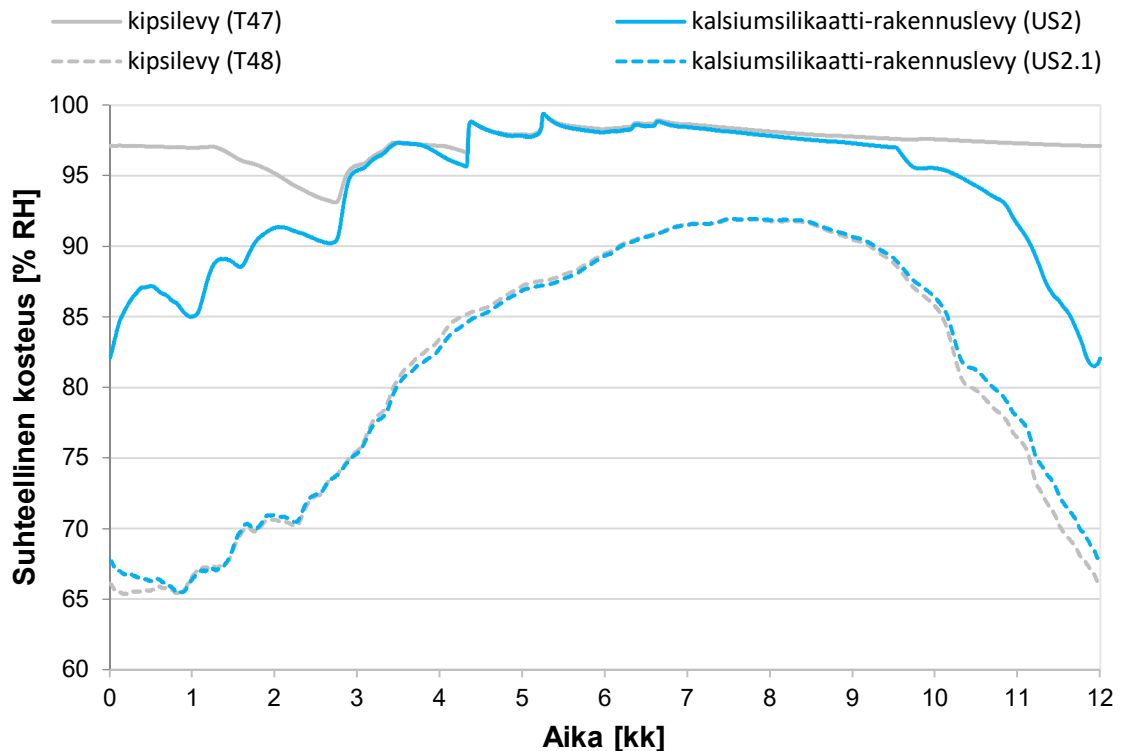
Taulukko 5.13 Väärän sisäverhouslevyn vaikutus maksimihomeindekseihin. Tapaukset on numeroitu kuten liitteessä B. Harmaa pohja tarkoittaa impregnoitua rakennetta. (Tiiliseinä 360 mm)

Rakenne	Tapaus	lämmöneriste	paksuus [mm]	TP1	TP2	TP3	TP4	
US2	3	kalsiumsilikaatti	100	1,32	1,17	1,17	0,94	
-	47	kipsilevy	kalsiumsilikaatti	100	2,30	2,25	2,45	0,52
US2.1	4	kalsiumsilikaatti	100	0,09	0,09	0	0	
-	48	kipsilevy	kalsiumsilikaatti	100	0,09	0,08	0	0



Kuva 5.27 Väärän sisäverhouslevyn vaikutus homeindeksien kehittymiseen ajan funktiona tarkastelupisteessä 1. Impregnoitut rakenteet on esitetty katkoviivalla. (Tiiliseinä 360 mm, kalsiumsilikaatti 100 mm)

Kipsilevy kasvattaa kalsiumsilikaatilla lämmöneristetyyn rakenteen homeindeksiä merkittävästi homeen kasvun jatkuessa myös kesällä. Impregnoidulla rakenteella käytettävällä sisäverhouslevyllä ei näytä olevan vaikutusta maksimihomeindeksin suuruuteen.



Kuva 5.28 Väärän sisäverhouslevyn vaikutus tarkastelupisteen 1 suhteelliseen kosteuteen. Impregnoidut rakenteet katkoviivalla.

Kipsilevy hidastaa kalsiumsilikaattieristeen kuivumista sisäilmaan, mikä on selvästi havaittavissa impregnoimattoman rakenteen osalta kuvasta 5.28. Kipsilevyllisessä rakenteessa tarkastelupisteen suhteellinen kosteus pysyy korkeana koko testivuoden ajan. Impregnoidulla rakenteella vastaavaa ilmiötä ei tapahdu. Kapillaaristen lämmöneristeiden kanssa on syytä käyttää tuotteiden kanssa yhteensopivia sisäverhouslevyjä, etenkin kun impregnointipinnoitetta ei käytetä.

Tanskalaisessa tutkimuksessa (Soulios, de Place Hansen & Peuhkuri, 2021a) on käytetty kalsiumsilikaattieristeen kanssa kipsilevyä, joka on huomattavasti kapillaarisempaa kuin tässä työssä käytetty FRAME-raportin (Vinha *et al.*, 2013a) mukainen kipsilevy. Kipsilevyjen ja muiden sisäverhouslevyjen ominaisuudet voivat siis vaihdella oleellisesti tuotteen mukaan. On tärkeää tiedostaa, ettei kapillaarinen lämmöneriste toimi odotetulla tavalla kaikilla mahdollisilla sisäverhouslevyillä.

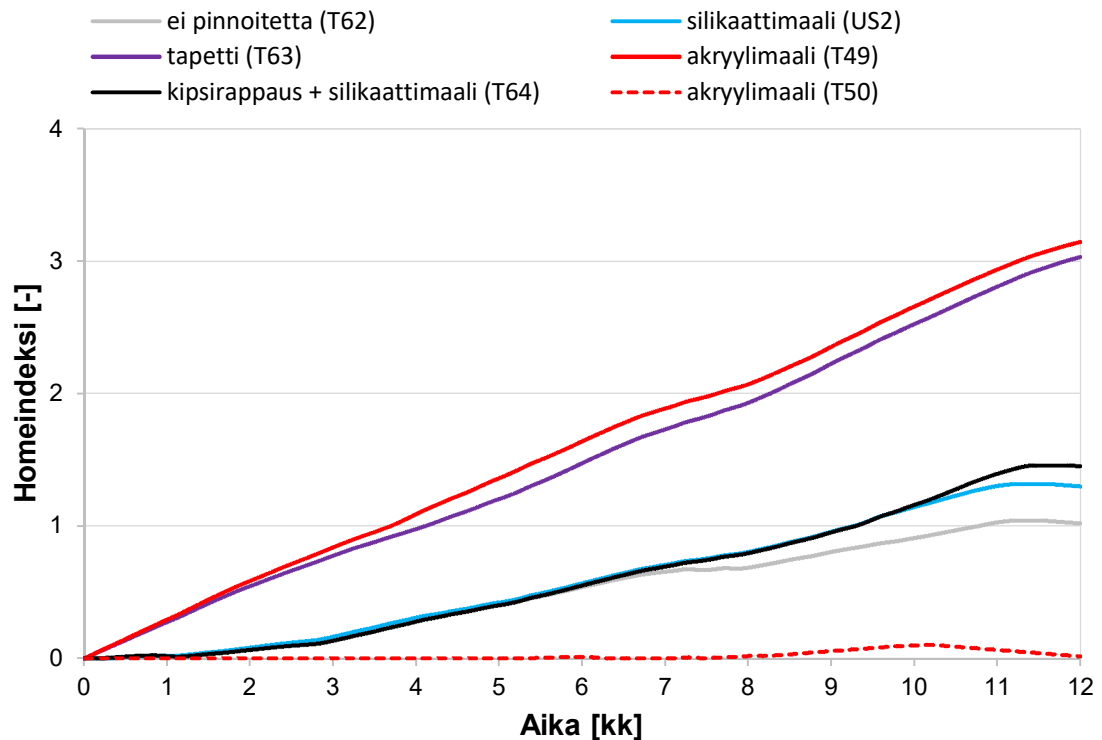
5.6.6 Sisäpinnan vesihöyryn diffuusiovastus

Sisäpinnan pinnoitteella on merkitystä sisätilojen ulkonäköön. Sisäpinnan pinnoitteet erotetaan toisistaan vesihöyryn suhteellisen diffuusiovastuksen suuruuden perusteella. Pinnoitteita ei ole

mallinnettu erillisillä rakennekerroksilla vaan ne käsitellään pintavastuksina. Kalsiumsilikaatilla sisäpuolelta lämmöneristetyin rakenteen maksimihomeindeksit sisäpinnan pinnoitteen mukaan on esitetty taulukossa 5.14 ja homeindeksien kehittyminen ajan funktiona kuvassa 5.29.

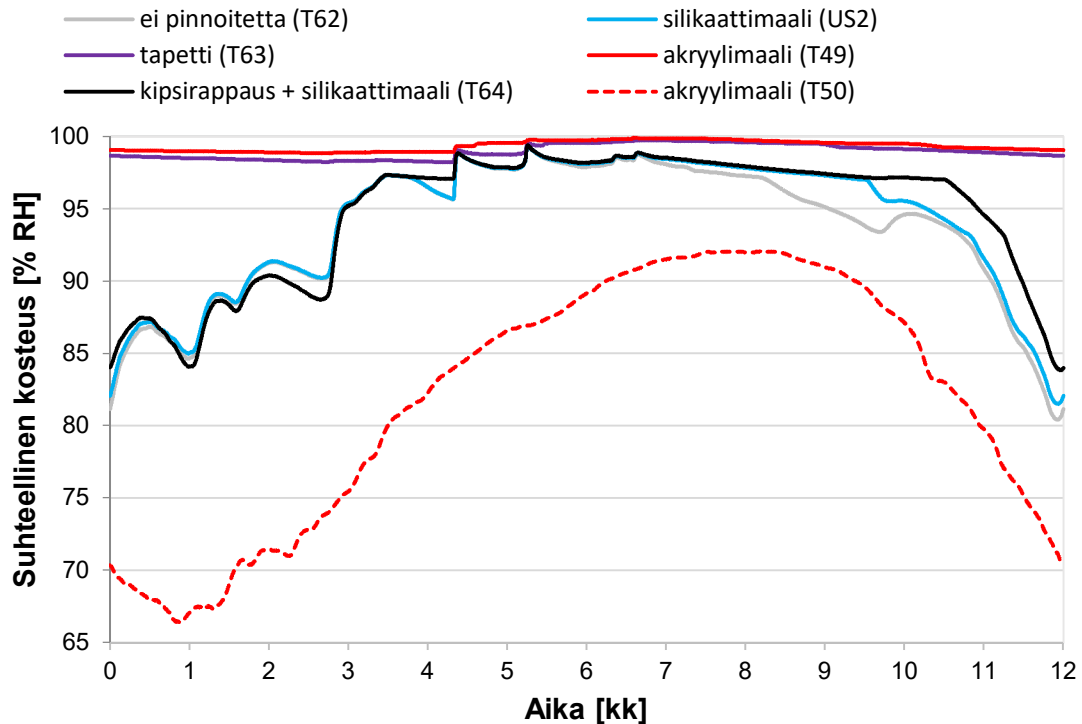
Taulukko 5.14 Sisäpinnoitteiden vaikutus homeindeksin maksimiin. Tulosten vertailua varten eri tapaukset on numeroitu kuten liitteessä B. Tapauksessa T64 sisäverhouslevy on korvattu kipsirappauksella (15 mm), muilta osin rakenne on rakenteen US2 kaltainen. Impregnoitu rakenne harmaalla pohjalla. (Tiiliseinä 360 mm, kalsiumsilikaatti 100 mm)

Rakenne	tapaus	sisäpinta	s_d [m]	TP1	TP2	TP3	TP4
-	62	ei pinnoitetta	0	1,04	0,91	0,75	0,37
US2	3	silikaattimaali	0,01	1,32	1,17	1,17	0,94
-	64	kipsirappaus, silikaattimaali	0,01 + rappaus	1,46	1,32	1,64	0,83
-	63	tapetti	0,07	3,03	3,04	3,25	3,25
-	49	akryylimaali	0,18	3,15	3,16	3,33	3,34
-	50	akryylimaali	0,18	0,10	0,10	0	0



Kuva 5.29 Sisäpinnoitteiden vaikutus tarkastelupisteen 1 homeindekseihin ajan funktiona. Impregnoitu rakenne katkoviivalla. (Tiiliseinä 360 mm, kalsiumsilikaatti 100 mm)

Tarkastelupisteen 1 homeindekseistä kuvassa 5.29 nähdään, että jo pienikin silikaattimaalista syntyvä lisäys sisäpinnan vesihöyrynvastukseen nostaa homeindeksiä pinnoittamattomaan sisäverhouslevyyn verrattuna. Akryylimaali ja tapetti nostavat kaikkien tarkastelupisteiden homeindeksit erittäin korkeiksi. Homeindeksin maksimiarvo jää kuitenkin pieneksi, mikäli rakenteen ulkopinnassa on käytetty impregnointipinnoitetta. Kaikki tutkimuksen aiemmat tarkastelut on tehty rakenteilla, joissa sisäpinnoitteena on silikaattimaali.



Kuva 5.30 Sisäpinnoitteiden vaikutus tarkastelupisteen 1 suhteelliseen kosteuteen. Impregnoitu rakenne katkoviivalla.

Tarkastelupisteen 1 suhteellinen kosteus pinnoitteen mukaan on esitetty kuvassa 5.30. Akryyli- maali ja tapetti hidastavat rakenteen kuivumista, eikä suhteellinen kosteus tarkastelupisteessä laske hygroskooppiselle alueelle lainkaan. Myös silikaattimaali ja maalattu kipsirappaus hidastavat rakenteen kuivumista verrattuna pinnoittamattomaan sisäpintaan. Tiilen impregnointia käytettäessä myös silikaattimaalia tiiviimmät pinnoitteet ovat sisäpinnassa mahdollisia.

5.6.7 Tiilen tasapainokosteuskäyrä

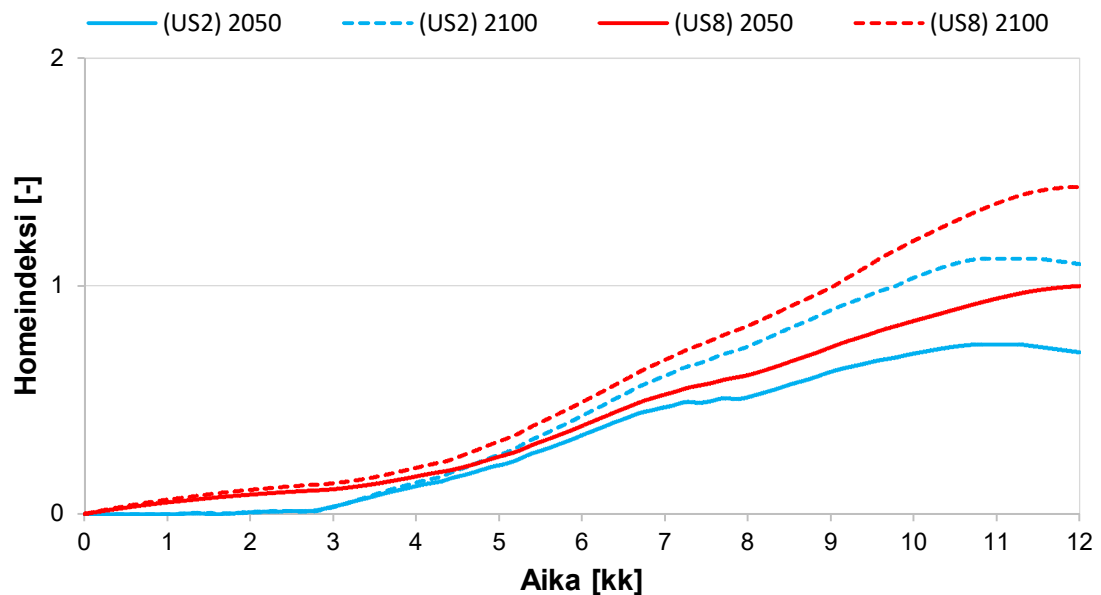
Kuten tiilen mallinnustavan valinnassa kuvassa 4.6 aiemmin havaittiin, mallinnuksessa käytettävän tiilen ominaisuudet vaikuttavat homeindeksien suuruuteen. Tiilen mallintaminen homogeenisena tiilikerroksena voi johtaa tietyissä olosuhteissa ylikriittisiin tuloksiin rakenteiden kosteuspitoisuuksien kannalta. Homogeenisella tiilellä mallinnettuna ei löydetty sisäpuolelta lämmöneristettyjä rakenteita, joissa ei homeindeksin maksimiarvon perusteella esiinny homeen kasvua, vaan rakenteiden kosteustekninen toimivuus edellytti vettä hylkivien pinnoitteiden käyttöä.

Keskeiset tutkimustulokset haluttiin tuottaa myös mallintamalla tiili WUFI:n materiaalikirjastosta löytyvällä tiilimuurauksella, joka ottaa huomioon laastisaumojen vaikutuksia. Maksimihomeindeksit tällä mallinnustavalla on esitetty taulukossa 5.15 ja homeindeksien kehittyminen ajan funktiona kuvassa 5.31 kahdella seinäpaksuudella nykyisessä (2050) sekä tulevaisuuden ilmastossa. Taulukossa 5.15 on esitetty myös mallinnustavasta syntyvä muutos tarkastelupisteiden maksimihomeindekseissä homogeenisella tiilellä mallinnettuihin vastaaviin tapauksiin verrattuna.

Taulukko 5.15 Maksimihomeindeksit, kun tiili on mallinnettu laastisaumoja huomioon ottaen tiilimuurauksena. Kaksi eri seinäpaksuutta. (Kalsiumsilikaatti 100 mm)

Vantaa 2050										
Rakenne	tiili	paksuus [mm]	TP1	ero	TP2	ero	TP3	ero	TP4	ero
US2	tiilimuuraus	360	0,74	-44 %	0,69	-41 %	0,80	-32 %	0,64	-32 %
US8	tiilimuuraus	600	1,00	-29 %	0,85	-30 %	0,68	-26 %	0,52	-28 %

Vantaa 2100										
Rakenne	tiili	paksuus [mm]	TP1	ero	TP2	ero	TP3	ero	TP4	ero
US2	tiilimuuraus	360	1,12	-51 %	1,06	-51 %	1,15	-43 %	1,06	-40 %
US8	tiilimuuraus	600	1,43		1,26		1,01		0,86	



Kuva 5.31 Tarkastelupisteen 1 homeindeksien kehittyminen ajan funktiona, kun tiili ja laastisaumat on mallinnettu tiilimuurauksena. Kaksi eri seinäpaksuutta. Tulevaisuuden ilmaston vaikutus on esitetty katkoviivalla. (kalsiumsilikaatti 100 mm)

Tiilen mallintaminen tiilimuurauksena pienentää rakenteiden homeindeksiä merkittävästi seinäpaksuudesta riippuen. Rakenteiden homeindeksien maksimiarvot pysyvät sallituissa rajoissa nykyilmastossa, mutteivat enää 2100 vuoden ilmastossa. Tiilen mallinnustavan muutos toi esille myös tiiliseinän paksuuden vaikutuksen homeindeksien suuruuteen. Ohuemmalla seinäpaksuudella homeindeksit jäävät pienemmiksi kuin paksummalla seinällä.

Tulevaisuuden ilmastossa toimivia sisäpuolelta lämmöneristettyjä rakenteita etsittiin vielä pienentämällä lämmöneristepaksuutta. Lämmöneristepaksuuden pienentäminen ei kuitenkaan pienentänyt rakenteiden homeindeksejä, vaan tiilimuurauksella mallinnettaessa tapahtui sama ilmiö kuin aiemmin lämmöneristepaksuuksia vertailtaessa. Lämmöneristepaksuuden pienentäminen

nostaa tiilimuurin ja kalsiumsilikaattieristeen välissä olevien tarkastelupisteiden lämpötilaa talvella, jolloin homeen kasvu kiihtyy suurempaan lämmöneristepaksuuteen verrattuna. Lisätarkasteluja tehdessä havaittiin, että eristepaksuuden pienentäminen 20 millimetriin pienentää tarkastelupisteen 1 suhteellista kosteutta vain vähän 100 mm eristepaksuuteen verrattuna.

6. YHTEENVETO

Kosteusteknisesti toimivien rakenteiden löytäminen osoittautui haastavaksi jo alkuperäistä lämmöneristämätöntä rakennetta mallinnettaessa. Valituilla materiaaliominaisuuksilla tiiliseinä kasvaa rakennusfysikaalisen testivuoden olosuhteissa sisäpintaan saakka useiden kuukausien ajaksi. Rakenteen sisäpinnassa homeindeksin maksimiarvo nousi lähelle rakenteen toimivuudelle asetettua kriteeriä $M_{max} < 1$ jo nykyilmastossa, ja homeen kasvun havaittiin olevan mahdollista, jos rakenteen sisäpinnassa on vesihöyryn siirtymistä hidastavia pinnoitteita.

Kaikilla tutkituilla sisäpuolisilla lämmöneristeillä havaittiin laskennallista homeen kasvua lämmöneristeen ja tiiliseinän välisissä tarkastelupisteissä. Kosteusteknisesti paras ratkaisu saatiin kalsiumsilikaattieristeellä ja heikoin ratkaisu kevytbetonilla. Perliitti, valkokalkkihydraatti, IQ-Therm ja alumiinilaminaatilla pinnoitettu polyuretaanilevy toimivat kosteusteknisesti paremmin kuin kevytbetoni, mutta selvästi huonommin kuin kalsiumsilikaatti. Rakenteille oli ominaista, että tiileen ja kapillaarisiin lämmöneristeisiin sitoutui suuri määrä kosteutta useiden kuukausien ajaksi, jolloin tarkastelupisteiden suhteellinen kosteus pysyi kapillaarisella alueella pitkiä aikoja.

Kalsiumsilikaattieristeen paksuus vaikutti rakenteen lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan, mutta maksimihomeindeksien suuruuksissa ei havaittu suuria eroja eristepaksuuden mukaan. Paksummalla tutkitulla eristepaksuudella 200 mm tarkastelupisteiden suhteellinen kosteus on kesäaikana korkeampi kuin 50 mm eristepaksuudella, sillä keväällä paksun lämmöneristeen myötä viileämpi tiiliseinä kuivuu hitaammin, ja paksumpi lämmöneristekerros hidastaa rakenteen kuivumista sisäänpäin. Talvella tarkastelupisteiden suhteellinen kosteus nousee korkeaksi myös ohuella lämmöneristeellä, ja pienemmästä lämmöneristepaksuudesta johtuen lämmöneristeen ulkopuolisten tarkastelupisteiden lämpötila on 50 mm eristepaksuudella ajoittain jopa 10 °C korkeampi kuin 200 mm eristepaksuudella. Korkeamman lämpötilan vuoksi ohuemmalla lämmöneristeellä homeen kasvu on talvella nopeampaa kuin paksummalla eristeellä. Erot homeen kasvunopeuksissa eri vuodenaikoina kuitenkin tasoittuvat siten, että homeindeksin maksimiarvojen erot lämmöneristeen paksuuden mukaan eivät ole suuria.

Sisäpuolelta lämmöneristettyjen rakenteiden kosteusteknistä toimintaa voidaan parantaa merkittävästi vettä hylkivien pinnoitteiden avulla. Tiilen impregnointi vähentää seinään imeytyvän veden määrää oleellisesti, ja homeen kasvun kannalta kriittisimmässä tarkastelupisteessä suhteellinen kosteus vaihteli testivuoden olosuhteissa välillä 62–92 % RH. Vastaavalla pinnoittamattomalla seinärakenteella suhteellinen kosteus oli huomattavasti korkeampi, vaihdellen välillä 82–99 % RH. Silikonihartsipinnoitettu rappaus hidastaa sadeveden tunkeutumista seinärakenteeseen vielä impregnointiakin paremmin, ja kummallakin pinnoitteella homeindeksin maksimiarvo on

nykyilmastossa alle 0,1. Pelkkä kalkkisementtirappaus vähentää rakenteen kokonaiskosteuspitoisuutta enimmillään noin 50 % pinnoittamattomaan tiiliseinään verrattuna, mutta rappaus hidastaa tiilen kuivumista, joten pelkkä rappaus pienentää homeindeksin maksimiarvoa vain noin 8 %. Rappaus ei ole riittävä pinnoite sisäpuolelta lämmöneristetyssä massiivitiiliseinän kosteusteknisen toiminnan varmistamiseksi.

Impregnoinnin havaittiin parantavan rakenteiden kosteusteknistä toimintaa niin paljon, että myös vähemmän kapillaariset lämmöneristeet ja diffuusiotiivis polyuretaanilevy toimivat hyvin nykyilmastossa. Kalsiumsilikaattieriste erottui muita lämmöneristeitä paremmin toimivaksi myös impregnoituissa rakenteissa, eikä pinnoittamattomassa rakenteessa maksimihomeindeksin perusteella heikoiten toiminut kevytbetoni toiminut kosteusteknisesti hyväksyttävästi edes impregnointipinnoitteen kanssa. Impregnoinnin halkeamien vaikutusta tutkittiin erikseen vuototarkasteluilla kalsiumsilikaatti- ja polyuretaanieristeellä. Kohtuullisen runsaaksi asetetusta vuotovedestä, 2 % osuus viistosateesta, huolimatta rakenteen US2.1 (kalsiumsilikaatti 100 mm) homeindeksin maksimiarvo kasvoi melko vähän arvosta 0,09 arvoon 0,23. Polyuretaanilla eristetyn rakenteen US6.1 homeindeksin maksimiarvo kasvoi 0,72:sta vain 1,08:aan, mikä osoittaa, että seinään tunkeutunut sadevesi kykenee kuivumaan impregnoinnin läpi ulkoilmaan.

Rakenteiden kosteustekninen toiminta heikkenee merkittävästi tulevaisuuden ilmastoissa. Nykyilmastossa parhaiten toiminut rakenne US2 (kalsiumsilikaatti 100 mm) toimii heikosti vuoden 2100 ilmastossa, ja nykyilmastossa laskettu homeindeksin maksimiarvo 1,32 kasvaa arvoon 2,27. Tulevaisuuden ilmastossa rakenteen kriittisimmän tarkastelupisteen suhteellinen kosteus pysyy homeen kasvun kriittisen rajan 85 % RH yläpuolella koko testivuoden ajan. Impregnoituista rakenteista kalsiumsilikaatti (US2.1), valkokalkkihydraatti (US5.1), IQ-Therm (US4.1) ja perliitti (US3.1) toimivat myös tulevaisuuden ilmastossa. Polyuretaanilla lämmöneristetyssä rakenteessa (US6.1) homeindeksin raja-arvo ylittyy 2100 ilmastossa hieman (homeindeksin maksimiarvo 1,18). Eli kyseisen rakenteen kosteustekninen toimivuus tulevaisuudessa on impregnoinnista huolimatta epävarma. Kevytbetonilla lämmöneristetty rakenne US7.1 ei toimi kosteusteknisesti riittävän hyvin edes impregnointiaineen kanssa.

Kapillaarisen lämmöneristeen toimivuus riippuu sen sisäpuolista rakenteista. Kalsiumsilikaattirakennuslevy vähemmän kosteutta siirtävä ja varastoiva kipsilevy heikensi rakenteen kosteusteknistä toimintaa huomattavasti. Lisäksi pienikin vesihöyryn diffuusiovastus rakenteen sisäpinnassa nosti jokaisen tarkastelupisteen suhteellista kosteutta ja homeindeksiä. Paras sisäpinnan pinnoite on mahdollisimman diffuusioavoin silikaattimaali, ja laskentatulosten perusteella tapetia, akryylimaalaa tai kalsiumsilikaattieristeen kanssa yhteensopimatonta sisäverhouslevyä ei tule käyttää. Kuitenkin tiilen impregnointia käytettäessä myös tiiviimmät sisäpinnoitteet ja kipsilevy

sisäverhouslevynä ovat kosteusteknisesti toimivia. Impregnointipinnoitteita ei usein voida kuitenkaan käyttää, sillä niiden pelätään vaikuttavan julkisivun ulkonäköön, mikä tekee massiivitiiliseinän sisäpuolisesta lämmöneristämisestä edelleen ongelmallista.

Keskeiset tuloksiin vaikuttavat epävarmuustekijät ovat tiilen mallinnustapa ja sen ominaisuudet. Tutkituista rakenteista parhaiten toiminut US2 ja paksumpi tiiliseinä US8 mallinnettiin uudelleen WUFI-ohjelmien materiaalikirjastosta löytyvän laastisaumojen vaikutuksia huomioon ottavan tiilen ominaisuuksia mukaillemalla. Tiilen mallinnustavan muutos pienentää tarkastelupisteiden suhteellista kosteutta, jolloin homeindeksien maksimi-arvot pienenevät rakenteessa US2 nykyilmastossa 44 % ja tulevaisuuden ilmastossa 51 %. Paksumman seinärakenteen havaittiin aiheuttavan homeen kasvun kannalta kriittisemmät olosuhteet ohuempaan rakenteeseen verrattuna. Syynä tähän ovat paksun seinän tarkastelupisteiden korkeampi lämpötila ja hitaampi kuivuminen.

Vaihtoehtoisen mallinnustavan perusteella sisäpuolisella 100 mm kalsiumsilikaattieristeellä lämmöneristetyt massiivitiiliseinät toimivat nykyilmastossa kosteusteknisesti riittävän hyvin. Rakenteiden toiminta tulevaisuuden ilmastoissa on kuitenkin epävarmaa, ja homeen kasvu on mahdollista varsinkin paksummalla 600 mm tiiliseinällä. Sisäpuolelta lämmöneristettyjen massiivitiiliseinien kosteusteknisen toimivuuden varmistamiseksi on tiiliseinän ulkopinnassa suositeltavaa käyttää vettä hylkivää impregnointikäsitelyä.

Tutkimuksessa ei löydetty kosteusteknisesti toimivia ratkaisuja niin paljon kuin toivottiin. Tutkimuksen tekeminen osoittautui haasteelliseksi, ja sen edetessä havaittiin yllättäviä tuloksiin vaikuttavia tekijöitä. Laskennallisten tarkasteluiden loppuvaiheessa havaittu pienenkin sisäpinnan vesihöyryn diffuusiovastuksen aiheuttama merkittävä vaikutus tuloksiin otettiin huomioon suorittamalla laskentatapauksia uudelleen. Aikataulullisia haasteita aiheuttivat myös alun ongelmat WUFI-ohjelmien toiminnassa, ja laskennan edetessä havaittu tarve muuttaa homeindeksin laskenta-ajanjakson alku vuoden alusta heinäkuun alkuun.

Tutkittujen rakenteiden keskinäinen paremmuusjärjestys saatiin selville melko luotettavasti, mutta kaikkien laskettujen homeindeksien suuruustaso sisältää epävarmuutta, joten tämän tutkimuksen perusteella ei voida luotettavasti todeta, onko edes parhaiten toiminut US2 kosteusteknisesti toimiva rakenne, vai edellyttääkö sisäpuolinen lämmöneristäminen aina impregnointipinnoitteen käyttöä. Laskentamallien luotettavuuden parantamiseksi tarvitaan lisää tietoa materiaalien kosteudenjohtavuusominaisuuksista ja laskentamallien mukaisia olosuhteita olisi tärkeää päästä vertaamaan kokeelliseen dataan, jota voidaan saada esimerkiksi koerakennuksista tai kenttämittauksista.

LÄHTEET

- Björkholtz, D. (1997) *Lämpö ja kosteus : rakennusfysiikka*. 2nd edn. Helsinki: Rakennustieto.
- Charola, A. E. (1995) Water-Repellent Treatments for Building Stones: A Practical Overview, *APT bulletin* (1986), 26(2/3), pp. 10–17. doi: 10.2307/1504480.
- Hagentoft, C.-E. (2001) *Introduction to building physics*. Lund: Studentlitteratur.
- Hansen, T., Bjarløv, S., Peuhkuri, R. & Hansen, K. (2018) Performance of hydrophobized historic solid masonry – Experimental approach, *Construction & building materials*, 188, pp. 695–708. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.145.
- Häupl, P., Fechner, H. & Petzold, H. (2004) Interior Retrofit of Masonry Wall to Reduce Energy and Eliminate Moisture Damage: Comparison of Modeling and Field Performance, in *Thermal performance of the exterior envelopes of buildings IX*. Clearwater Beach, FL, 5–10 Joulukuu 2004.
- Hens, H. (2007) *Building physics : heat, air and moisture : fundamentals and engineering methods with examples and exercises*. Berlin: Ernst & Sohn.
- Höyhtyä, M. & Vanttinen, Y. (1989) *Muuratut rakenteet*. 1, Talonrakennus. Hki: Rakentajain kustannus.
- Jensen, N. F., Bjarløv, S., Rode, C., Andersen, B. & Møller, E. (2021) Hygrothermal performance of six insulation systems for internal retrofitting solid masonry walls, *Journal of Building Physics*, 44(6), pp. 539–573. doi: 10.1177/1744259120988745.
- Jokela, T, Laukkarinen, A & Vinha, J 2019, Ilmakehän pitkäaaltainen säteily rakennusfysikaalisissa laskentatarkasteluissa. in J Vinha & T Raunima (eds), *Rakennusfysiikka 2019: Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut*. 28.-30.10.2019, Tampere. vol. Seminaarijulkaisu 6, Tampere, pp. 55-60, *Rakennusfysiikka 2019*, Tampere, Finland, 28/10/19. <<http://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202002202255>>
- Klößeiko, P., Arumägi, E. & Kalamees, T. (2015) Hygrothermal performance of internally insulated brick wall in cold climate: A case study in a historical school building, *Journal of Building Physics*, 38(5), pp. 444–464. doi: 10.1177/1744259114532609.
- Künzel, H. M. (1995) *Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters*. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart. Available at: <http://publica.fraunhofer.de/documents/PX-56656.html>.
- Künzel, H. M. & Kießl, K. (1996) Trocknen von Ziegelmauerwerk durch Hydrophobieren / Drying of brick walls after impregnation. *Restoration of Buildings and Monuments*, Vol. 2 (Issue 2), pp. 87–100. doi: 10.1515/rbm-1996-5090
- Lahdensivu, J. (2005) *Rappauskirja 2005*. Helsinki: Suomen betoniyhdistys (BY / Suomen betoniyhdistys ; 46).

- Lahdensivu, J., Köliö, A., Pakkala, T., Lemberg, A., Eronen, M. & Hyyrynen, S. (2021) Muurattujen ja rapattujen julkisivujen kuntotutkimus 2021. Helsinki: BY-Koulutus Oy (BY. Tekniset ohjeet, 75).
- Neuvonen, P., Mäkiö, E. & Malinen, M. (2002) Kerrostalot. 1880–1940. Helsinki: Rakennustieto.
- Niemelä, J. (2006) Tiilestä tehty Tampere : punatiilirakennuksia eilen, tänään ja huomenna. Tampere: Tampere-seura.
- Nieminen, J. & Virta, J. (2016) Rakennusten lisälämmöneristäminen. Helsinki: Kiinteistöalan Kustannus Oy.
- Pfundstein, M., Gellert, R., Spitzner, M. & Rudolphi, A (2012) Insulating Materials : Principles, Materials, Applications. Basel: Birkhäuser, (Detail practice), p. 27. doi: 10.11129/detail.9783034614757.
- SFS-EN ISO 6946 (2017) Building components and building elements . Thermal resistance and thermal transmittance . Calculation methods (ISO 6946 : 2017), Suomen standarditoimistoliitto SFS, 48 p.
- RIL 107-2012 (2012) Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL.
- RIL 255-1-2014 (2014) Rakennusfysiikka. 1, Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien liitto.
- Roos, M., König, F., Stadtmüller, S. & Weyershausen, B. (2008) Evolution of silicone based water repellents for modern building protection, 5th International Conference on Water Repellent Treatment of Building Materials, Vol. 16, pp. 3–16.
- Slapø, F., Kvande, T., Bakken, N., Haugen, M. & Lohne, J. (2017) Masonry Resistance to Driving Rain: Mortar Water Content and Impregnation, Buildings (Basel), 7(3), p. 70. doi: 10.3390/buildings7030070.
- Soulios, V., de Place Hansen, E. J. & Janssen, H. (2019) Hygric properties of hydrophobized building materials, MATEC Web of Conferences, doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928202048>
- Soulios, V., de Place Hansen, E., Feng, C. & Janssen, H. (2020) Hygric behavior of hydrophobized brick and mortar samples, Building and environment, 176, 106843. doi: 10.1016/j.buildenv.2020.106843.
- Soulios, V., de Place Hansen, E. & Peuhkuri, R. (2021a) Hygrothermal performance of hydrophobized and internally insulated masonry walls - Simulating the impact of hydrophobization based on experimental results, Building and Environment, 187, 107410. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107410>.
- Soulios, V., de Place Hansen, E., Peuhkuri, R., Møller, E. & Ghanbari-Siahkali, A. (2021b) Durability of the hydrophobic treatment on brick and mortar, Building and Environment, 201, 107994. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107994>.

Vainio, M. (2016) Kalsiumsilikaattilevyjen ja ontelolaattojen rakennusfysikaaliset kosteusominaisuudet. Diplomityö. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:tty-201611244761>.

Vereecken, E. and Roels, S. (2013) Hygric performance of a massive masonry wall: How do the mortar joints influence the moisture flux?, *Construction and Building Materials*, 41, pp. 697–707. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.024>.

Vereecken, E. and Roels, S. (2016) Capillary Active Interior Insulation Systems for Wall Retrofitting: A More Nuanced Story, *International Journal of Architectural Heritage*, 10(5), pp. 558–569. doi: 10.1080/15583058.2015.1009575.

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, DSc Thesis, Tampere University of Technology. 338 p. + app. 10 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., Pirinen, M., Aaltonen, A., Suonketo, J., Jokisalo, J., Teriö, O., Koskenvesa, A. & Palolahti, T. (2013a) Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Rakennetekniikka, Tutkimusraportti 159, Tampere, 354 s. + liitt. 43 s.

Vinha, J., Viitanen, H, Peuhkuri, R, Lähdesmäki, K, Ojanen, T & Salminen, K. (2013b) VTT-TTY homemallin toimintaperiaatteet ja käyttö rakenteiden kosteusteknisessä toiminnan tarkastelussa. Rakennusfysiikka 2013: uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut, 22.-24.10.2013, Tampere. Tampere University of Technology, Tampereen teknillinen yliopisto: Rakennustekniikan laitos: Rakennetekniikka. Seminaarijulkaisu, vol. 3, pp. 67-76, Rakennusfysiikka 2013, Tampere, Finland, 22/10/13.

Vinha, J. (2019) RAK-33501 2021 kevät Rakennusfysiikka, L6 Materiaalien ja ilman kosteus, luentomateriaali 18.3.2019.

Vinha, J. (2021) RAK-33501 2021 kevät Rakennusfysiikka, L1.2 Ilmastonmuutoksen ja energiatehokkuuden parantamisen vaikutukset vaipparakenteiden toiminnassa, luentomateriaali 11.1.2021.

Weijo, I., Lahdensivu, J., Turunen, T., Ahola, S., Sistonen, E., Vornanen-Winqvist, C. & Annala, P. (2019) Kosteus- ja mikrobivaurioituneiden rakennusten korjaus. Helsinki: Ympäristöministeriö (Ympäristöministeriön julkaisuja, 2019:18).

YM (2011) D3 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakennusten energiatehokkuus. Määräykset ja ohjeet 2012. Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto. 30.3.2011. Helsinki.

YM (2012) C4 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Lämmöneristys Ohjeet 2012. Luonnos 16.3.2012. Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. Helsinki.

YM (2013) Ympäristöministeriön asetus rakennuksen energiatehokkuuden parantamisesta korjaus- ja muutostöissä. 27.2.2013. Helsinki.

Zhao, J., Grunewald, J., Ruisinger, U., & Feng, S. (2017) Evaluation of capillary-active mineral insulation systems for interior retrofit solution, *Building and Environment*, 115, pp. 215–227. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.01.004>.

Materiaalien perusarvot

LÄMMÖNERISTEET JA SISÄVERHOUS

Materiaali	Tuote / tarkennus	Tiheys	Huokoisuus	Ominaislämpökapasiteetti	Lämmönjohtavuus	Vesihöyryn diffuusio- vastuskerroin
		kg/m ³	m ³ /m ³	J/kgK	W/mK	-
Perliittilevy	Knauf TecTem Insulation board indoor	100 ⁴	0,9622 ⁴	1150 ⁴	0,042 ⁴	8 ⁴
Kiinnityslaasti	Knauf TecTem Adhesive Mortar	1397 ⁴	0,4729 ⁴	1122 ⁴	0,5167 ⁴	15,4 ⁴
Tasoite	Knauf TecTem Interior Plaster	1279 ⁴	0,5173 ⁴	827 ⁴	0,31 ⁴	10,2 ⁴
PUR + kalsiumsilikaatti-levy	Remmers iQ-Therm	44,5 ⁴	0,98 ⁴	1400 ⁴	0,031 ⁴	69 ⁴
Kiinnityslaasti	Remmers iQ-Fix (5 mm)	1313 ⁴	0,5 ⁴	863 ⁴	0,497 ⁴	18,7 ⁴
Tasoite	Remmers iQ-Top (10 mm)	465,5 ⁴	0,81 ⁴	1173 ⁴	0,106 ⁴	8,4 ⁴
Kevytbetoni	Aerated Concrete (density: 500kg/m ³)	500 ⁴	0,77 ⁴	850 ⁴	0,12 ⁴	8 ⁴
Sisäverhouselevy	K-levy Redstone (8 mm)	1162 ¹	0,48 ⁴	900 ⁴	0,35 ⁶	27 ⁶
Valkokalkkihydraattilevy	Redstone PURA	100 ¹	0,8 ³	950 ¹	0,042 ¹	5 ¹
Kalsiumsilikaattilevy	Redstone E	305 ¹	0,83 ¹	1000 ³	0,0627 ¹	4,6 ¹
Kiinnityslaasti	Erikoislaasti / Redstone -levyihin	1800 ³	0,25 ³	1000 ³	1 ³	25 ³
Kipsilevy	Kipsilevy (12,5 mm)	574 ⁷	0,77 ⁷	1100 ⁷	0,19 ⁷	6,9 ⁷
Polyuretaanilevy	Alumiinilaminaatilla pinnoitettu	30 ²	0,95 ²	1400 ²	0,022 ²	4900 ²

TIILET JA PINNOITTEET

Materiaali	Tuote / tarkennus	Tiheys	Huokoisuus	Ominaislämpökapasiteetti	Lämmönjohtavuus	Vesihöyryn diffuusio- vastuskerroin
		kg/m ³	m ³ /m ³	J/kgK	W/mK	-
Punatiili	Punatiili (Hens 2011 brick1)	1800 ⁴	0,3 ⁴	900 ⁴	0,6 ⁴	8,7 ⁵
Tiilimuuraus	Punatiili (WUFI Solid Brick Masonry)	1800 ⁴	0,3 ⁴	900 ⁴	0,6 ⁴	8,7 ⁵
Epäonnistunut impregnointi	Punatiili (Hens 2011 brick1)	1800 ⁴	0,3 ⁴	900 ⁴	0,6 ⁴	9,7 ⁵
Impregnoitu punatiili	Punatiili (Hens 2011 brick1)	1800 ⁴	0,3 ⁴	900 ⁴	0,6 ⁴	9,7 ⁵
Muurauslaasti KS	Lime Cement Mortar, fine	1880 ⁴	0,28 ⁴	850 ⁴	0,6 ⁴	50 ⁴
Kalkkisementtirappaus		1900 ¹⁰	0,24 ¹⁰	850 ¹⁰	0,8 ¹⁰	19 ¹⁰
Silikonihartsipinnoite		1475 ⁹	0,44 ⁹	1000 ⁹	0,689 ⁹	74 ⁹

Tasapainokosteuskäyrät 1/2

LÄMMÖNERISTEET JA SISÄVERHOUS

Materiaali	Tuote / tarkennus																
Perliittilevy	Knauf TecTem Insulation board indoor ⁴	RH [%]	0	57,6	75,4	80	84,7	96	96,7	98	99,67	99,84	99,92	99,96	99,988		
		w [kg/m ³]	0	1,59	2,3	2,54	2,78	4,17	14	35	100,03	105,05	119,56	171,75	257,15		
		RH [%]		99,999	100												
		w [kg/m ³]		508,15	737,77												
Kiinnityslaasti	Knauf TecTem Adhesive Mortar ⁴	RH [%]	0	32,8	43,2	75,2	84,3	90	96	96,9	99,67	99,84	99,92	99,96	99,988		
		w [kg/m ³]	0	4,3	7	27,5	40,9	50,7	70,5	77	167,6	179,2	191,9	196,4	197,1		
		RH [%]		99,999	100												
		w [kg/m ³]		197,8	238,8												
Tasoite	Knauf TecTem Interior Plaster ⁴	RH [%]	0	32,8	43,2	58,2	75,4	84,7	90	96	97,4	99,68	99,80	99,88	99,92		
		w [kg/m ³]	0	2,6	5,4	6	11,9	24,4	28,6	36,3	46,8	144,7	152,5	156,5	210		
		RH [%]		99,96	99,98	99,999	100										
		w [kg/m ³]		213,8	217,5	236,2	283,3										
PUR + kalsium- silikaatti -levy	Remmers iQ-Therm ⁴	RH [%]	0	10	50	80	90	95	99	99,5	99,9	100					
		w [kg/m ³]	0	0,57	2,05	4,05	4,86	5,22	5,44	5,46	5,47	5,47					
Kiinnityslaasti	Remmers iQ-Fix (5 mm) ⁴	RH [%]	0	30	50	80	90	95	99	100							
		w [kg/m ³]	0	0,8	1,84	6,73	13,29	22,55	45,71	60,45							
Tasoite	Remmers iQ- Top (10 mm) ⁴	RH [%]	0	30	50	80	90	95	99	100							
		w [kg/m ³]	0	9,53	19,84	50,7	71,21	85,83	100,9	105,29							
Kevytbetoni ⁴	Aerated Con- crete (density: 500kg/m ³)	RH [%]	0	50	80	93	96,4	99	99,5	99,9	100						
		w [kg/m ³]	0	4,2	9,8	22	145	316	332	344	435						
Sisäverhous- levy ^{1,4,6}	K-levy (8 mm) Redstone	RH [%]	0	10	20	30	40	50	55	60	65	70	75	80	85		
		w [kg/m ³]	0	1,79	4	6,8	10,5	15,5	18,7	22,7	27,7	34,1	42,6	54,6	72,6		
		RH [%]		90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	99,5	100		
		w [kg/m ³]		103	111	121	133	147	164	184	210	243	287	316	350		
Valkokalkkihyd- raattilevy	Redstone PURA ^{1,3,6}	RH [%]	0	10	20	30	40	50	55	60	65	70	75	80	85		
		w [kg/m ³]	0	0,14	0,32	0,54	0,84	1,26	1,54	1,89	2,33	2,93	3,76	5	7,06		
		RH [%]		90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	99,5	100		
		w [kg/m ³]		11,1	12,5	14,1	16,3	19,1	23	28,7	38	55,6	102	173	554		
Kalsiumsilikaatti- levy	Redstone E ¹¹	RH [%]	0	33	57	75	85	93	97	99,27	99,77	100					
		w [kg/m ³]	0	7,20	8,07	9,38	10,57	14,58	34,1	77,22	78,85	83,2					
Kiinnityslaasti	Erikoislaasti / Redstone -levyihin ^{1,3,6}	RH [%]	0	10	20	30	40	50	55	60	65	70	75	80	85		
		w [kg/m ³]	0	0,96	2,15	3,66	5,64	8,35	10,1	12,3	15	18,6	23,3	30	40,2		
		RH [%]		90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	99,5	100		
		w [kg/m ³]		57,7	62,8	68,7	75,7	84,1	94,3	107	123	145	175	195	220		
Kipsilevy ⁷	Kipsilevy (12,5 mm)	RH [%]	0	33	55	65	75	80	83	86	93	97	100				
		w [kg/m ³]	0	4,6	6,3	6,7	7,1	8	8,6	10,1	13,5	17,7	37,1				
Polyuretaanilevy ⁷	Alumiini- laminaatilla pinnoitettu	RH [%]	0	35	50	70	80	90	98	100							
		w [kg/m ³]	0	0,12	0,16	0,16	0,18	0,27	0,38	45							

Tasapainokosteuskäyrät 2/2

TIILET JA PINNOITTEET

Materiaali	Tuote / tarkennus														
Punatiili ⁸	Punatiili (Hens 2011 brick1)	RH [%]	0	10	20	30	40	50	55	60	65	70	75	80	85
		w [kg/m ³]	0	0,57	0,71	0,86	1,02	1,21	1,33	1,47	1,64	1,84	2,11	2,47	3,02
		RH [%]		90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	99,5	100
		w [kg/m ³]		3,96	4,25	4,59	5,01	5,54	6,23	7,19	8,63	11,16	17,23	26,45	249,00
Tiilimuuraus ⁴	Punatiili (WUFI Solid Brick Masonry)	RH [%]	0	10	20	30	40	50	55	60	65	70	75	80	85
		w [kg/m ³]	0	0,54	1,21	2,06	3,19	4,76	5,79	7,07	8,69	10,8	13,7	18	24,8
		RH [%]		90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	99,5	100
		w [kg/m ³]		37,1	41	45,6	51,2	58,2	67,3	79,3	96,2	122	164	198	249
Epäonnistunut impregnointi / punatiili ⁸	Punatiili (Hens 2011 brick1)	RH [%]	0	10	20	30	40	50	55	60	65	70	75	80	85
		w [kg/m ³]	0	0,57	0,71	0,86	1,02	1,21	1,33	1,47	1,64	1,84	2,11	2,47	3,02
		RH [%]		90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	99,5	100
		w [kg/m ³]		3,96	4,25	4,59	5,01	5,54	6,23	7,19	8,63	11,16	17,23	26,45	249
Impregnoitu punatiili ⁸	Punatiili (Hens 2011 brick1)	RH [%]	0	10	20	30	40	50	55	60	65	70	75	80	85
		w [kg/m ³]	0	0,57	0,71	0,86	1,02	1,21	1,33	1,47	1,64	1,84	2,11	2,47	3,02
		RH [%]		90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	99,5	100
		w [kg/m ³]		3,96	4,25	4,59	5,01	5,54	6,23	7,19	8,63	11,16	17,23	26,45	249
Muurauslaasti KS ⁴	Lime Cement Mortar, fine	RH [%]	0	30	50	70	80	90	95	99	99,46	99,70	99,83	99,89	99,92
		w [kg/m ³]	0	12,79	15,88	20,98	25,66	35,28	46,93	79,48	92,74	104,76	116,33	125,15	131,49
		RH [%]		99,94	99,95	99,95	99,966	99,970	99,981	99,989	99,995	99,999	100		
		w [kg/m ³]		135,57	137,57	139,54	145,28	147,14	154,29	162,61	173,20	188,80	210		
Kalkkisementti-rappaus ⁴		RH [%]	0	50	80	90	99	99,9	99,95	99,99	100				
		w [kg/m ³]	0	30	45	65	95	110	140	200	210				
Silikonihartsipinnoite ^{9,4}		RH [%]	0	10	20	30	40	50	55	60	65	70	75	80	85
		w [kg/m ³]	0	0,08	0,18	0,31	0,49	0,73	0,89	1,09	1,35	1,7	2,18	2,9	4,09
		RH [%]		90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	99,5	100
		w [kg/m ³]		6,45	7,22	8,19	9,42	11	13,3	16,6	22	32,1	58,5	98,4	303

Kosteusdiffusiviteetit 1/2

Materiaali	Tuote / tarkennus	Vedenimeytymiskerroin	Kapillaarinen kyllästys-kosteuspitoisuus	kosteuspitoisuus	veden kosteusdiffusiviteetti	uudelleen jakautumisen kosteusdiffusiviteetti
		kg/m ² (s ^{0,5})	kg/m ³	w kg/m ³	DWS m ² /s	DWW m ² /s
Perliittilevy	Knauf TecTem Insulation board indoor		737,8 ⁴	0 ⁴	0 ⁴	0 ⁴
				2,54	3,80E-13	3,80E-13
				35	3,80E-13	3,80E-13
				737,8	5,00E-05	5,00E-05
Kiinnityslaasti	Knauf TecTem Adhesive Mortar	0,0041 ⁴	238,8 ⁴	0 ⁴	0 ⁴	0 ⁴
				34,6	3,05E-12	3,05E-12
				238,8	1,12E-09	1,12E-09
Tasoite	Knauf TecTem Interior Plaster	0,0826 ⁴	283,3 ⁴	0 ⁴	0 ⁴	0 ⁴
				18	4,68E-10	4,68E-10
				283,3	3,23E-07	3,23E-07
PUR + kalsiumsilikaatti-levy	Remmers iQ-Therm		5,47 ⁴	0 ⁴	0 ⁴	0 ⁴
				4,05	4,00E-14	4,00E-14
				4,68	4,10E-14	4,10E-14
				5,4	4,20E-14	4,20E-14
				5,47	9,30E-07	9,30E-07
Kiinnityslaasti	Remmers iQ-Fix (5 mm)	0,0052 ⁴	60,45 ⁴	0	0	0
				6,73	2,81E-08	2,81E-08
				60,45	2,81E-08	2,81E-08
Tasoite	Remmers iQ-Top (10 mm)		105,29 ⁴	0 ⁴	0 ⁴	0 ⁴
				50,7	6,20E-08	6,20E-08
				105,29	6,20E-08	6,20E-08
Kevytbetoni	Aerated Concrete (density: 500kg/m ³)		435 ⁴	0 ⁴	0 ⁴	0 ⁴
				4,4	2,00E-10	2,00E-10
				43,5	4,50E-09	4,50E-09
				348	8,50E-09	8,50E-09
				392	2,20E-08	2,20E-08
				435	1,60E-07	1,60E-07
Sisäverhouslevy	K-levy (8 mm) Redstone	0,0592 ⁶	350 ⁴	0	0	0
				54,6 ¹	3,28E-10	3,28E-10
				350	1,12E-07	1,12E-07
Valkokalkkihydraattilevy	Redstone PURA	0,232 ³	554 ¹	0	0	0
				5 ³	7,10E-10	7,10E-10
				554	6,70E-07	6,70E-07
Kalsiumsilikaattilevy	Redstone E	1,292 ¹	830 ¹	0	0	0
				4,6 ¹	9,57E-09	9,57E-09
				830	9,21E-06	9,21E-06
Kiinnityslaasti	Erikoislaasti / Redstone -levyihin	0,033 ³	220 ³	0	0	0
				30	2,20E-10	2,20E-10
				220	8,60E-08	8,60E-08
Kipsilevy	Kipsilevy (12,5 mm)	0,076 ⁷	371 ⁷	0 ⁷	0 ⁷	0 ⁷
				8	1,85E-10	1,85E-10
				371	1,59E-07	1,59E-07
Polyuretaanilevy	Alumiinilaminaatilla pinnoitettu PUR-levy	-	45 ⁷	0 ⁷	0 ⁷	0 ⁷

Kosteusdiffusiviteetit 2/2

TIILET JA PINNOITTEET

Materiaali	Tuote / tarkennus	Vedenimeytymiskerroin	Kapillaarinen kyllästys-kosteuspitoisuus	kosteuspitoisuus	veden kosteusdiffusiviteetti	uudelleen jakautumisen kosteusdiffusiviteetti
		kg/m ² (s ^{0,5})	kg/m ³	w kg/m ³	DWS m ² /s	DWW m ² /s
Punatiili	Punatiili (Hens 2011 brick1)	0,4 ⁵	249 ⁵	0	0	0
				2,474	1,05E-08	1,05E-08
				249	9,81E-06	9,81E-06
Tiilimuuraus	Punatiili (WUFI Solid Brick Masonry)	0,4 ⁵	249 ⁵	0 ⁴	0 ⁴	0 ⁴
				18	1,62E-08	1,62E-08
				249	9,81E-06	9,81E-06
Epäonnistunut impregnointi / punatiili	Punatiili (Hens 2011 brick1)	0,033 ⁵	249 ⁵	0	0	0
				2,474	7,15E-11	7,15E-11
				249	6,67E-08	6,67E-08
Impregnoitu punatiili	Punatiili (Hens 2011 brick1)	0,0018 ⁵	249 ⁵	0	0	0
				2,474	2,13E-13	2,13E-13
				249	1,99E-10	1,99E-10
Muurauslaasti KS	Lime Cement Mortar, fine			35,28	2,76E-10	2,76E-10
				46,93	3,78E-10	3,78E-10
				79,48	1,37E-09	1,37E-09
				92,74	2,38E-09	2,38E-09
				104,76	3,92E-09	3,92E-09
				116,33	6,35E-09	6,35E-09
				125,15	9,17E-09	9,17E-09
				131,49	1,19E-08	1,19E-08
				135,57	1,41E-08	1,41E-08
				137,57	1,54E-08	1,54E-08
				139,54	1,67E-08	1,67E-08
				145,28	2,12E-08	2,12E-08
				147,14	2,29E-08	2,29E-08
				154,29	3,08E-08	3,08E-08
				162,61	4,36E-08	4,36E-08
				173,20	6,77E-08	6,77E-08
188,80	1,30E-07	1,30E-07				
210	3,13E-07	3,13E-07				
Kalkkimenttirappaus	Kalkkimenttirappaus	0,034 ⁴	210 ⁴	0 ⁴	0 ⁴	0 ⁴
				20	1,00E-10	1,00E-10
				210	1,00E-07	1,00E-07
Silikonihartsipinnoite	Silikonihartsipinnoite	0,00016 ⁹	303 ⁹	0 ⁴	0 ⁴	0 ⁴
				2,9	1,13E-15	1,13E-15
				303	1,06E-12	1,06E-12

Lämmönjohtavuudet kosteuspitoisuuden funktiona

LÄMMÖNERISTEET JA SISÄVERHOUS

Materiaali	Tuote / tarkennus								
Perliittilevy ⁴	Knauf TecTem Insulation board indoor	w [kg/m ³]	0	962,2					
		λ [W/(m·K)]	0,042	0,8502					
Kiinnityslaasti ⁴	Knauf TecTem Adhesive Mortar	w [kg/m ³]	0	472,9					
		λ [W/(m·K)]	0,0517	0,7791					
Tasoite ⁴	Knauf TecTem Interior Plaster	w [kg/m ³]	0	517,3					
		λ [W/(m·K)]	0,31	0,6235					
PUR + kalsiumsilikaatti- levy ⁴	Remmers iQ-Therm	w [kg/m ³]	0	10	20	50	100	200	300
		λ [W/(m·K)]	0,031	0,032	0,034	0,04	0,052	0,084	0,12
		w [kg/m ³]	400	500	600	700	800	900	950
		λ [W/(m·K)]	0,17	0,23	0,3	0,37	0,46	0,55	0,6
Kiinnityslaasti ⁴	Remmers iQ-Fix (5 mm)	w [kg/m ³]	0	500					
		λ [W/(m·K)]	0,497	1,254					
Tasoite ⁴	Remmers iQ-Top (10 mm)	w [kg/m ³]	0	810					
		λ [W/(m·K)]	0,106	0,8438					
Kevytbetoni ⁴	Aerated Concrete (density: 500kg/m ³)	w [kg/m ³]	0	770					
		λ [W/(m·K)]	0,12	0,8038					
Sisäverhoulevy ⁴	K-levy (8 mm) Redstone	w [kg/m ³]	0						
		λ [W/(m·K)]	0,35						
Valkokalkkihydraatti- levy	Redstone PURA ⁴	w [kg/m ³]	0	800					
		λ [W/(m·K)]	0,042	0,546					
Kalsiumsilikaattilevy	Redstone E ⁴	w [kg/m ³]	0	845					
		λ [W/(m·K)]	0,0627	0,3233					
Kiinnityslaasti ⁴	Erikoislaasti / Redstone-levyihin	w [kg/m ³]	0	250					
		λ [W/(m·K)]	1	1,2083					
Kipsilevy ⁴	Kipsilevy (12,5 mm)	w [kg/m ³]	0	4,6	6,7	10,1	17,7	770	
		λ [W/(m·K)]	0,19	0,19	0,19	0,2	0,21	0,6	
Polyuretaanilevy ⁴	Alumiinilaminaatilla pinnoitettu	w [kg/m ³]	0	50					
		λ [W/(m·K)]	0,022	0,0264					

TIILET JA PINNOITTEET

Materiaali	Tuote/tarkennus			
Punatiili ⁴	Punatiili (Hens 2011 brick1)	w [kg/m ³]	0	300
		λ [W/(m·K)]	0,45	1,4
Tiilimuuraus ⁴	Punatiili (WUFI So- lid Brick Masonry)	w [kg/m ³]	0	300
		λ [W/(m·K)]	0,45	1,4
Epäonnistunut impregnointi / punatiili ⁴	Punatiili (Hens 2011 brick1)	w [kg/m ³]	0	300
		λ [W/(m·K)]	0,45	1,4
Impregnoitu punatiili ⁴	Punatiili (Hens 2011 brick1)	w [kg/m ³]	0	300
		λ [W/(m·K)]	0,45	1,4
Muurauslaasti KS ⁴	Lime Cement Mortar, fine	w [kg/m ³]	0	210
		λ [W/(m·K)]	0,6	1,2872
Kalkkisementti- rappaus ⁴		w [kg/m ³]	0	240
		λ [W/(m·K)]	0,8	1,6084
Silikonihartsipinnoite ⁴		w [kg/m ³]	0	440
		λ [W/(m·K)]	0,689	2,3333

Vesihöyryn diffuusiovastuskertoimet kosteuspitoisuuden funktiona

LÄMMÖNERISTEET JA SISÄVERHOUS

Materiaali	Tuote/tarkennus					
Perliittilevy ⁴	Knauf TecTem Insulation board indoor	RH [%]	0	22	88	
		μ [-]	8	8	6,6	
Kiinnityslaasti ⁴	Knauf TecTem Adhesive Mortar	RH [%]	0	20	89	
		μ [-]	15,4	15,4	20,8	
Tasoite ⁴	Knauf TecTem Interior Plaster	RH [%]	0	20	89	
		μ [-]	10,2	10,2	11,3	
PUR + kalsiumsilikaatti -levy ⁴	Remmers iQ-Therm	RH [%]	0	25	72	
		μ [-]	69	69	58	
Kiinnityslaasti ⁴	Remmers iQ-Fix (5 mm)	RH [%]	0	20	90	100
		μ [-]	18,7	18,7	17,4	15,1
Tasoite ⁴	Remmers iQ-Top (10 mm)	RH [%]	0	20	91	
		μ [-]	8,4	8,4	4,7	

TIILET JA PINNOITTEET

Materiaali	Tuote/tarkennus							
Muurauslaasti KS ⁴	Lime Cement Mortar, fine	RH [%]	0	50	70	80	90	95
		μ [-]	50	41,62	33,79	24,94	10,58	3,27

1) Kasil Finland Oy

2) RIL 255-1-2014

3) Huttunen 2016, Sisäpuolelta lämmöneristetyin massiivitiiliseinän lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan laskennallinen tarkastelu, tutkimusselostus NRO TRT/2294/2016

4) WUFI / Fraunhofer IBP

5) Soulios 2020, Hygric behavior of hydrophobized brick and mortar samples

6) Redstone GmbH

7) Vinha 2013, Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristykseen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa

8) Hens 2011, Applied Building Physics Boundary Conditions, Building Performance and Material Properties

9) MASEA Database

10) RIL Rappauskirja 2005

11) Vainio 2016, Kalsiumsilikaattilewjen ja ontelolaattojen rakennusfysikaaliset kosteusominaisuudet

= impregnoitu

= lisälämmöneristetty

= ilmastonmuutoksen vaikutukset

Perustapaukset														
Tapaus	Tiili	paksuus [mm]	A_w [kg/(m ² s ^{0,5})]	d_p [mm]	lämmöneriste	paksuus [mm]	U-arvo [W/(m ² K)]	Sisäilman kosteuslisä [g/m ³]	Ilmasto	Suunta	TP1	TP2	TP3	TP4
1	Punatiili	360	0,4				1,31	5 / 0	Vantaa 2050	S	0,98			
2	Punatiili	360	0,0018	2,6			1,31	5 / 0	Jokioinen 2050	N	0			
3	Punatiili	360	0,4		Kalsiumsilikaatti	100	0,43	5 / 0	Vantaa 2050	S	1,32	1,17	1,17	0,94
4	Punatiili	360	0,0018	2,6	Kalsiumsilikaatti	100	0,43	5 / 0	Jokioinen 2050	N	0,09	0,09	0	0
Ilmastot														
Tapaus	Tiili	paksuus	A_w	d_p	lämmöneriste	paksuus	U-arvo	Sisäilman kosteuslisä	Ilmasto	Suunta	TP1	TP2	TP3	TP4
5	Punatiili	360	0,4				1,31	5 / 0	Vantaa 2100	S	1,27			
6	Punatiili	360	0,0018	2,6			1,31	5 / 0	Jokioinen 2100	N	0			
7	Punatiili	360	0,4		Kalsiumsilikaatti	100	0,43	5 / 0	Vantaa 2100	S	2,27	2,16	2,00	1,77
8	Punatiili	360	0,0018	2,6	Kalsiumsilikaatti	100	0,43	5 / 0	Jokioinen 2100	N	0,20	0,19	0	0
66	Punatiili	360	0,0018	2,6	Perliitti	100	0,33	5 / 0	Jokioinen 2100	N	0,81	0,84	0	0
67	Punatiili	360	0,0018	2,6	IQ-Therm	100	0,26	5 / 0	Jokioinen 2100	N	0,75	0,76	0	0
68	Punatiili	360	0,0018	2,6	Redstone PURA	100	0,33	5 / 0	Jokioinen 2100	N	0,55	0,56	0	0
69	Punatiili	360	0,0018	2,6	Alumiinilaminaatilla pinnoitettu PUR-levy	100	0,19	5 / 0	Jokioinen 2100	N	1,17	1,18	0	0
70	Punatiili	360	0,0018	2,6	Kevytbetoni	100	0,63	5 / 0	Jokioinen 2100	N	1,66	1,65	0	0
Lämmöneristeet														
Tapaus	Tiili	paksuus	A_w	d_p	lämmöneriste	paksuus	U-arvo	Sisäilman kosteuslisä	Ilmasto	Suunta	TP1	TP2	TP3	TP4
9	Punatiili	360	0,4		Perliitti	100	0,33	5 / 0	Vantaa 2050	S	2,49	2,35	0	0
10	Punatiili	360	0,0018	2,6	Perliitti	100	0,33	5 / 0	Jokioinen 2050	N	0,61	0,68	0	0
11	Punatiili	360	0,4		IQ-Therm	100	0,26	5 / 0	Vantaa 2050	S	2,45	2,47	0	0
12	Punatiili	360	0,0018	2,6	IQ-Therm	100	0,26	5 / 0	Jokioinen 2050	N	0,47	0,47	0	0
13	Punatiili	360	0,4		Redstone PURA	100	0,33	5 / 0	Vantaa 2050	S	2,52	2,53	0,92	0,55
14	Punatiili	360	0,0018	2,6	Redstone PURA	100	0,33	5 / 0	Jokioinen 2050	N	0,38	0,38	0	0
15	Punatiili	360	0,4		Alumiinilaminaatilla pinnoitettu PUR-levy	100	0,19	5 / 0	Vantaa 2050	S	2,41	2,44	0	0
16	Punatiili	360	0,0018	2,6	Alumiinilaminaatilla pinnoitettu PUR-levy	100	0,19	5 / 0	Jokioinen 2050	N	0,72	0,72	0	0
25	Punatiili	360	0,4		Kevytbetoni	100	0,63	5 / 0	Vantaa 2050	S	3,45	3,44	3,18	2,99
26	Punatiili	360	0,0018	2,6	Kevytbetoni	100	0,63	5 / 0	Jokioinen 2050	N	1,33	1,32	0	0
Lämmöneristeiden paksuudet														
Tapaus	Tiili	paksuus	A_w	d_p	lämmöneriste	paksuus	U-arvo	Sisäilman kosteuslisä	Ilmasto	Suunta	TP1	TP2	TP3	TP4
17	Punatiili	360	0,4		Kalsiumsilikaatti	50	0,64	5 / 0	Vantaa 2050	S	1,43	1,29	1,26	1,07
18	Punatiili	360	0,0018	2,6	Kalsiumsilikaatti	50	0,64	5 / 0	Jokioinen 2050	N	0,07	0,06	0	0
19	Punatiili	360	0,4		Kalsiumsilikaatti	200	0,26	5 / 0	Vantaa 2050	S	1,45	1,36	1,09	0,77
20	Punatiili	360	0,0018	2,6	Kalsiumsilikaatti	200	0,26	5 / 0	Jokioinen 2050	N	0,15	0,14	0	0
51	Punatiili	360	0,4		Alumiinilaminaatilla pinnoitettu PUR-levy	30	0,45	5 / 0	Vantaa 2050	S	2,71	2,76	0	0
52	Punatiili	360	0,4		Kevytbetoni	200	0,43	5 / 0	Vantaa 2050	S	3,44	3,43	2,92	1,22
53	Punatiili	360	0,4		Redstone PURA	70	0,43	5 / 0	Vantaa 2050	S	2,32	2,30	0,98	0,75
Sisäilman kosteuslisä														
Tapaus	Tiili	paksuus	A_w	d_p	lämmöneriste	paksuus	U-arvo	Sisäilman kosteuslisä	Ilmasto	Suunta	TP1	TP2	TP3	TP4
27	Punatiili	360	0,4				1,31	5 / 2	Vantaa 2050	S	0,99			
28	Punatiili	360	0,0018	2,6			1,31	5 / 2	Jokioinen 2050	N	0			
29	Punatiili	360	0,4		Kalsiumsilikaatti	100	0,43	5 / 2	Vantaa 2050	S	1,37	1,23	1,19	0,94
30	Punatiili	360	0,0018	2,6	Kalsiumsilikaatti	100	0,43	5 / 2	Jokioinen 2050	N	0,10	0,09	0	0

Impregnointiaineen tunkeutumissyvyys

Tapaus	Tiili	paksuus	A _w	d _p	lämmöneriste	paksuus	U-arvo	Sisäilman kosteuslisä	Ilmasto	Suunta	TP1	TP2	TP3	TP4
31	Punatiili	360	0,0018	40	Kalsiumsilikaatti	100	0,43	5 / 0	Jokioinen 2050	N	0,03	0,02	0	0
Epäonnistunut impregnointi														
32	Punatiili	360	0,033	2,6			1,31	5 / 0	Vantaa 2050	S	1,30			
33	Punatiili	360	0,033	2,6	Kalsiumsilikaatti	100	0,43	5 / 0	Vantaa 2050	S	1,65	1,50	1,50	1,14
33b	Punatiili	360	0,033	2,6	Kalsiumsilikaatti	100	0,43	5 / 0	Vantaa 2050	S	1,63	1,49	1,48	1,13
Parempi impregnointi														
34	Punatiili	360	0,00066	27,2	Kalsiumsilikaatti	100	0,43	5 / 0	Jokioinen 2050	N	0,03	0,02	0	0
Halkeama impregnoinnissa														
35	Punatiili	360	0,0018	2,6	Kalsiumsilikaatti	100	0,43	5 / 0	Vantaa 2050	S	0,23	0,21	0	0
38	Punatiili	360	0,0018	2,6	Alumiinilaminaatilla pinnoitettu PUR-levy	100	0,19	5 / 0	Vantaa 2050	S	1,07	1,08	0	0
Rappaus														
36	Punatiili	360	0,033	20	Kalsiumsilikaatti	100	0,43	5 / 0	Vantaa 2050	S	1,40	1,27	0,90	0,36
36b	Punatiili	360	0,033	20	Kalsiumsilikaatti	100	0,43	5 / 0	Vantaa 2050	S	1,22	1,06	0,81	0,34
37	Punatiili	360	0,00016	2	Kalsiumsilikaatti	100	0,43	5 / 0	Jokioinen 2050	N	0,04	0,03	0	0
Massiiviseinän paksuus														
39	Punatiili	600	0,4		Kalsiumsilikaatti	100	0,37	5 / 0	Vantaa 2050	S	1,40	1,21	0,92	0,72
40	Punatiili	600	0,0018	2,6	Kalsiumsilikaatti	100	0,37	5 / 0	Jokioinen 2050	N	0,08	0,06	0	0
41	Punatiili	450	0,4		Kalsiumsilikaatti	100	0,41	5 / 0	Vantaa 2050	S	1,30	1,12	1,07	0,87
42	Punatiili	450	0,0018	2,6	Kalsiumsilikaatti	100	0,41	5 / 0	Jokioinen 2050	N	0,10	0,08	0	0
43	Punatiili	230	0,4		Kalsiumsilikaatti	100	0,48	5 / 0	Vantaa 2050	S	1,35	1,25	1,35	1,02
44	Punatiili	230	0,0018	2,6	Kalsiumsilikaatti	100	0,48	5 / 0	Jokioinen 2050	N	0,06	0,06	0	0
Väärä sisäverhouselevy: kalsiumsilikaatti + kipsilevy														
47	Punatiili	360	0,4		Kalsiumsilikaatti	100	0,42	5 / 0	Vantaa 2050	S	2,30	2,25	2,45	0,52
48	Punatiili	360	0,0018	2,6	Kalsiumsilikaatti	100	0,42	5 / 0	Jokioinen 2050	N	0,09	0,08	0	0
Tiilen tasapainokosteuskäyrä														
54	Tiilimuuraus	360	0,4		Kalsiumsilikaatti	100	0,44	5 / 0	Vantaa 2050	S	0,74	0,69	0,80	0,64
56	Tiilimuuraus	360	0,4		Kalsiumsilikaatti	100	0,44	5 / 0	Vantaa 2100	S	1,12	1,06	1,15	1,06
55	Tiilimuuraus	600	0,4		Kalsiumsilikaatti	100	0,38	5 / 0	Vantaa 2050	S	1,00	0,85	0,68	0,52
57	Tiilimuuraus	600	0,4		Kalsiumsilikaatti	100	0,38	5 / 0	Vantaa 2100	S	1,43	1,26	1,01	0,86
Sisäpinnan diffuusiovastus														
62	Punatiili	360	0,4		Kalsiumsilikaatti	100	0,37	0	Vantaa 2050	S	1,04	0,91	0,75	0,37
3	Punatiili	360	0,4		Kalsiumsilikaatti	100	0,37	0,01	Vantaa 2050	S	1,32	1,17	1,17	0,94
63	Punatiili	360	0,4		Kalsiumsilikaatti	100	0,37	0,07	Vantaa 2050	S	3,03	3,04	3,25	3,25
49	Punatiili	360	0,4		Kalsiumsilikaatti	100	0,37	0,18	Vantaa 2050	S	3,15	3,16	3,33	3,34
64	Punatiili	360	0,4		Kalsiumsilikaatti	100	0,37	sisärappaus + 0,01	Vantaa 2050	S	1,46	1,32	1,64	0,83
50	Punatiili	360	0,0018	2,6	Kalsiumsilikaatti	100	0,37	0,18	Jokioinen 2050	N	0,10	0,10	0	0

