

Sanntu Alastalo

**OLEMASSA OLEVAN RAKENNUSKAN-
NAN ULKOSEINÄRAKENTEIDEN VER-
TAILU MUUTTUVASSA ILMASTOSSA
RAKENTEIDEN HOMEINDEKSIN
AVULLA**

Diplomityö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Tarkastajat: tutkimuspäällikkö Jukka Lahdensivu
tutkijatohtori Toni Pakkala
Elokuu 2022

TIIVISTELMÄ

Santtu Alastalo: Olemassa olevan rakennuskannan ulkoseinärakenteiden vertailu muuttuvassa ilmastossa rakenteiden homeindeksin avulla

Diplomityö

Tampereen yliopisto

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Elokuu 2022

Ilmastonmuutos on jatkuvasti esillä niin mediassa kuin myös tutkimuksissa. Ilmastonmuutoksen vaikutukset ovat iso osa suunnittelua, kun käsitellään kustannustehokkaimpia tapoja huolehtia Suomen olemassa olevasta rakennuskannasta.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää suomalaisen olemassa olevan rakennuskannan ulkoseinärakenteiden homehtumisriskiä Suomalaisen homemallin avulla kosteus- ja lämpötekniisten simulointien tulosten pohjalta. Tarkastelu keskittyi asuinrakennuksiin, mutta tuloksia voidaan kuitenkin hyödyntää myös muissa rakennusryhmissä, sillä vastaavia rakenteita on käytetty myös opetusrakennuksissa, hoitoalan rakennuksissa sekä liike- ja toimistorakennuksissa. Työn laskentatarkastelut suoritettiin WUFI-2D 4.3 simulointiohjelmalla. Laskentatarkasteluissa hyödynnettiin RASMI-hankkeen yhteydessä muodostettuja säädatoja, joista simuloitiin nykyilmastossa ja tulevaisuuden ilmastossa 30 vuoden pituisia aikasarjoja. Laskentatuloksia käsiteltiin Suomalaisen homemallin avulla laskemalla jokaiselle vuodelle homeindeksin maksimiarvo. Homemallista saaduista 30 vuoden aikasarjojen tuloksista muodostettiin arvio homeen kasvun riskistä rakenteissa. Homeen kasvun riskiarvion perusteella rakenteita vertailtiin keskenään.

Ilmastonmuutoksen vaikutukset olivat havaittavissa kaikissa laskentatuloksissa kohonneina homeindeksin arvoina. Suurimmat homeen kasvun riskit painottuvat puurunkoisiin tiilimuurattuihin ulkoseinärakenteisiin, joissa oli käytetty homehtumisherkkyysluokalta hyvin herkkää tai herkkää tuulensuojaa ja joiden tuuletusvälin ilmanvaihtuvuus oli heikentynyt. Betonirakenteiden homeen kasvun riskinarvioinnissa nousivat esille kapillaarisilta vedenimuominaisuuksilta aktiivisimmat betonit sekä betonirakenne, jossa oli käytetty vesi- ja vesihöyrytiivistä pinnoitetta. Tämän tutkimuksen puujulkisivujen rakenteissa ei tullut esille suuria homeindeksin arvoja ja homehtumisriskin vertailussa esille nousi ainoastaan purueristetty tuulettumaton rakenne, jonka julkisivun pinnalla käytettiin huonosti vesihöyryä läpäisevää maalia.

Tutkimuksessa havaittiin huomattavaa epävarmuutta erityisesti betoniin ja pinnoitteisiin liittyvissä materiaalivalinnoissa. Tulevaisuudessa suomalaisen rakennuskannan julkisivumateriaalien tarkempien kosteudensiirto-ominaisuuksien määrittäminen on erittäin tärkeää laskentatulosten todentamiseksi.

Avainsanat: Ilmastonmuutos, Suomalainen homemalli, Homeindeksi

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Santtu Alastalo: Comparison of the external wall assemblies of an existing building stock in a changing climate using the mould index of the structures

Master of Science Thesis

Tampere University

Master's Degree Programme in Civil Engineering

August 2022

Climate change is constantly featured in the media as well as in research. The effects of climate change are a big part of planning when considering the most cost-effective ways to take care of Finland's existing building stock.

The aim of this study was to determine the risk of mould growth in the external wall assemblies of the existing Finnish building stock using the Finnish mould growth model. The study focused on residential buildings, but the results can also be used in other groups of buildings, as similar structures have also been used in educational buildings, buildings for institutional care, commercial buildings and office buildings. The humidity and thermal calculations of the work were performed with the WUFI-2D 4.3 simulation program. The calculation data utilized the weather data generated in connection with the RASMI project, from which 30-year time series were used to simulate the current climate and the future climate. The calculation results were processed using the Finnish mould growth model by calculating the maximum value of the mould index for each year. The results of the 30-year time series obtained from the mould growth model provided an estimate of the risk for mould growth in structures. Based on the risk analysis of mould growth, the structures were compared with each other.

The effects of climate change were noticeable in all calculation results as increasing mould index values. The greatest risks of mould growth were in timber-framed brickwork with mould-sensitive wind protection and reduced ventilation of the ventilation gap. Concretes with highest liquid transport coefficient and a concrete structure with a water- and water-vapor-tight coating emerged highest in the risk analysis of the mould growth of concrete structures.

No high mould index values were found in the wood façade structures of this study, and only a cutter chip- and sawdust-insulated unventilated structure with poorly water vapor permeable paint on the façade surface emerged high in the comparison of the mould risk.

The study found considerable uncertainty, especially in the choice of materials for concrete and coatings. In the future, the determination of the more accurate moisture transfer properties of the façade materials of the Finnish building stock will be very important in order to achieve the best accuracy of the calculation results.

Keywords: Climate change, Finnish mould growth model, Mould index

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

ALKUSANAT

Tämä työ on tehty osana BALANCE-tutkimushanketta, jossa mallinnetaan kustannustehokkaimmat tavat huolehtia Suomen rakennuskannasta. Työn ohjaajana ja tarkastajana toimi tutkimuspäällikkö Jukka Lahdensivu ja toisena tarkastajana tohtoritutkija Toni Pakkala.

Haluan kiittää tasapuolisesti Korjausrakentamisen ja rakenteiden elinkaaritekniikan tutkimusryhmän sekä myös rakennusfysiikan tutkimuksen jäseniä, jotka loivat tutkimuksen tekemiselle loistavan työilmapiirin. Erityiset kiitokset haluan osoittaa Jussa Pikkuvirrälle yhteistyöstä ja lukuisista palavereista.

Tampereella, 26.8.2022

Santtu Alastalo

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Tutkimuksen tausta	1
1.2 Tutkimuksen tavoitteet	1
1.3 Tutkimuksen suoritus	2
1.4 Tutkimuksen rajaus	2
2. SUOMALAINEN RAKENNUSKANTA	4
3. LÄMMÖN JA KOSTEUDEN SIIRTYMINEN RAKENTEISSA	8
3.1 Lämmön siirtyminen	8
3.1.1 Johtuminen	8
3.1.2 Säteily	9
3.1.3 Konvektio	13
3.2 Kosteuden esiintyminen rakenteissa	15
3.2.1 Ilman kosteus	15
3.2.2 Kosteus materiaaleissa	17
3.3 Kosteuden siirtyminen	19
3.3.1 Vesihöyryn diffuusio	19
3.3.2 Kapillaarinen kosteuden siirtyminen	21
3.3.3 Vesihöyryn konvektio	25
4. LASKENNASSA KÄYTETTY SÄÄDATA	27
5. SUOMALAINEN HOMEMALLI	30
6. ULKOSEINÄRAKENTEIDEN LASKENTAMALLI	34
6.1 Ulkoseinärakenteiden simulointi WUFI-2D-ohjelmassa	34
6.2 Laskennan lähtötietoja WUFI-2D-ohjelmassa	37
6.3 Tutkitut rakennekerrokset ja materiaalit	41
6.3.1 Betoni	41
6.3.2 Tiili	44
6.3.3 Puu	45
6.3.4 Rappaus	45
6.3.5 Eristeet	46
6.3.6 Sisäkuoret yleisesti	46
6.3.7 Tuulensuojalevyt	47
6.3.8 Maalit	47
6.3.9 Tuuletusvälit ja tuuletusurat	49
6.3.10 Kosteuslähde ja ilmavuodot	51
6.4 Tarkastellut rakennetyypit	52
6.4.1 Tiilijulkisivut	52
6.4.2 Betonijulkisivut	53
6.4.3 Puujulkisivut	54
7. LASKENTATULOSTEN TARKASTELU	56

7.1	Tiilijulkisivut.....	56
7.1.1	Tiili-villa-tiili.....	56
7.1.2	Tiili-villa-betoni.....	65
7.1.3	Tiili-puurunko.....	67
7.1.4	Yhteenveto tiilijulkisivuista.....	76
7.2	Betonijulkisivut.....	77
7.2.1	Betonien vertailu.....	77
7.2.2	Laskentatulokset.....	80
7.2.3	Yhteenveto betonijulkisivuista.....	84
7.3	Puujulkisivut.....	85
7.3.1	1950-mallitalo.....	85
7.3.2	1980-mallitalo.....	86
7.4	Ulkoseinärakenteiden homehtumisriskin arviointi.....	88
7.5	Virhelähteet.....	90
8.	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	92
9.	YHTEENVETO JA LISÄTUTKIMUSTARPEET.....	94
	LÄHTEET.....	96
	LIITE 1: WUFI-2D-OHJELMASSA KÄYTETYT MATERIAALIOMINAISUUDET	

LYHENTEET JA MERKINNÄT

c	valon nopeus	$2,998 \times 10^8$ m/s
d	paksuus	m
f	taajuus	Hz
g	kosteusvirta	kg/m ² ·s
g	putoamiskiihtyvyys	m/s ²
g _{atm}	ilmakehän näkyvyyskerroin	-
g _{cap}	kapillaarisen kosteusvirran tiheys	kg/m ² ·s
g _{terr}	ympäristön näkyvyyskerroin	-
h	lämmönsiirtokerroin	W/(m ² ·K)
h _c	konvektiivinen lämmönsiirtokerroin	W/(m ² ·K)
h _r	säteilyn lämmönsiirtokerroin	W/(m ² ·K)
m	massa	kg
m ₀	kuivapaino	kg
m _w	materiaalin sisältämän veden massa	kg
n	ainemäärä	mol
n _{ACH}	Ilmanvaihtuvuus	1/h
p	paine	Pa
p _v	vesihöyryn osapaine	Pa
q	lämpövirran tiheys	W/m ²
q _c	konvektiivisen lämpövirran tiheys	W/m ²
r	säde	m
r _p	pystypinnalle tulevan sateen intensiteetti	mm/h
r _v	vaakapinnalle tulevan sateen intensiteetti	mm/h
s	huokosalipaine	Pa
s _d	suhteellinen diffuusiovastus	m
t	aika	s
u	kosteuspitoisuus paino-osina	kg/kg
v	vesihöyrypitoisuus	kg/m ³
v _{tuuli}	tuulennopeus	m/s
w	materiaalin kosteuspitoisuus	kg/m ³
A	pinta-ala	m ²
A _w	veden imeytymiskerroin	kg/(m ² ·s ^{1/2})
D _w	kosteusdiffusiviteetti	m ² /s
D _{ws}	kosteusdiffusiviteetti imeytymiselle	m ² /s
D _{ww}	kosteusdiffusiviteetti uudelleenjakautumiselle	m ² /s
D _φ	vedenjohtavuuskerroin	kg/m·s
E	säteilyteho	W/m ²
E _b	mustan kappaleen säteilyteho	W/m ²
FE	sateen altistumiskerroin	-
FD	sateen kerrostumiskerroin	-
G	vesimäärä	kg/m ²
G _{max}	kondensoituvan kosteuden maksimimäärä	g/h
H	korkeus	m
I	kokonaissäteily kappaleen pinnalla	W/m ²
I _e	pinnan pitkäaaltoinen emissio	W/m ²
I _l	pitkäaaltoinen vastasäteily	W/m ²
I _s	lyhytaaltoinen auringon säteily	W/m ²
M	moolimassa	kg/mol
M _v	veden moolimassa	kg/mol
Q	tilavuusvirta	m ³ /s
R	lämmönvastus	m ² ·K/W
R	yleinen kaasuvakio	8314,3 J/kmol·K

R_a	ilman tilavuusvirta	m^3/h
T	lämpötila	K
V	tilavuus	m^3
V_0	kuivatilavuus	m^3
V_w	materiaalin sisältämän veden tilavuus	m^3
W_{cap}	materiaalin kyllästyskosteuspitoisuus	kg/m^3
Z_v	vesihöyrynvastus	s/m
Z_p	vesihöyrynvastus	$m^2 \cdot s \cdot Pa/kg$
α	absorptiokerroin	-
β	kaltevuuskulma	°
ε	emissiviteettikerroin	-
λ	lämmönjohtavuus	$W/(m \cdot K)$
ρ	heijastuskerroin	-
ρ_v	veden tiheys	kg/m^3
τ	läpäisykerroin	-
σ	Stefan-Boltzmannin vakio	$5,67 \cdot 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$
σ	pintajännistys	N/m
θ	lämpötila	°C
ψ	kosteuspitoisuus tilavuusprosentteina	%
δ_a	ilman vesihöyrynläpäisevyys	$kg/(m \cdot s \cdot Pa)$
δ_v	vesihöyrynläpäisevyys	m^2/s
δ_p	vesihöyrynläpäisevyys	$kg/(m \cdot s \cdot Pa)$
μ	diffuusiovastuskerroin	-
φ	huokosilman suhteellinen kosteus	-
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers	
BALANCE	Sustainable and healthy buildings in the changing climate: balancing costs and benefits	
FRAME	Future Envelope Assemblies and HVAC Solutions -hanke	
ESRL	The Earth System Research Laboratory	
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	
HHL	homehtumisherkkyysluokka	
HTL	homekasvun taantumislukka	
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration	
RakMK	Rakentamismääräyskokoelma	
RASMI	Rakennetun ympäristön säätiedot muuttuvassa ilmastossa	
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto	
VTT	Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy	

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

Adiabaattinen

Lämpö ja kosteus ei virtaa systeemiä rajoittavan adiabaattisen pinnan läpi. Simuloinnissa adiabaattisen pinnan yli voidaan ajatella muodostuvan peilikuva rakenteesta, jolloin 2D-rakenteet voidaan simuloida esimerkiksi runkojaon avulla mahdollisimman pienenä.

Diffuusio

Diffuusio on kaasumolekyylien liikettä, joka pyrkii tasoittamaan kaasuseoksessa olevia yksittäisten kaasujen pitoisuuseroja (tai osapaineeroja). Diffuusiossa kaasu siirtyy korkeammasta pitoisuudesta kohti pienempää pitoisuutta.

Emissiviteetti

Emissiviteetti kuvaa pinnan kykyä lähettää lämpösäteily verrattuna ns. ideaaliin mustaan kappaleeseen. Emissiviteetti voi saada arvoja väliltä 0...1, missä ideaalin mustan kappaleen arvo on 1.

Homeindeksi

Homeindeksillä kuvataan materiaalissa silmin tai mikroskopoimalla havaittua homekasvun määrää. Homeindeksi voi saada arvoja väliltä 0...6.

Homehtumisherkkyyaluokka

Suomalaisessa homemallissa materiaalit on eroteltu toisistaan eri homehtumisherkkyyaluokkiin (HHL) riippuen homeen kasvun maksimimäärästä ja homeen kasvun nopeudesta materiaalissa.

Homeen taantumaluokka

Suomalaisessa homemallissa homeen taantumaluokka (HTL) kuvaa homeen kasvuston määrän vähenemisnopeutta ja homeen kasvussa tapahtuvaa viivettä.

Homogeeninen

Koostumukseltaan yhtenäinen ja tasa-aineinen.

Höyrinsulku	Höyrinsulku on kerros, jolla rajoitetaan vesihöyryn diffuusiota rakenteessa tai rakenteeseen.
Ilmanvaihtuvuus	Tässä tutkimuksessa ilmanvaihtuvuudella kuvataan, kuinka monta kertaa ilman vaihtuu tilassa yhden tunnin aikana (1/h).
Isotrooppinen	Isotrooppinen tarkoittaa suunnasta riippumattomuutta. Isotrooppisen rakennusmateriaalin ominaisuudet ovat joka suuntaan yhteneväiset.
Kondensoituminen	Kondensoitumisessa vesihöyry tiivistyy rakenteiden pintoihin tai sisälle vedeksi tai jääksi, kun ilman vesihöyrypitoisuus kyseisessä kohdassa saavuttaa kyllästyskosteuspitoisuuden ($\varphi = 100\%$ RH).
Kosteusvaurioindikaattori	Kosteusvaurioindikaattori on mikrobi, jota ei yleensä tavata vaurioitumattomassa rakenteessa. Kosteusvaurioindikaattoreiden esiintyminen materiaalinäytteissä viittaa usein vaurioon.
Liike-energia	Liike-energia on kappaleen liikkeeseen varastoitunutta energiaa.
Lämmönjohtavuus	Lämmönjohtavuus (λ) ilmoittaa lämpömäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pinta-alayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen, jonka eri puolilla olevien tilojen lämpötilaero on yksikön suuruinen. Yksikkö ($W / (m \cdot K)$).
Lämmönvastus	Lämmönvastus (R) kuvaa ainekerroksen kykyä vastustaa lämmönvirtausta. Yksikkö ($m^2 / (K \cdot W)$).

Sisäilman kosteuslisä

Sisäilman kosteuslisällä tarkoitetaan rakennuksen sisä- ja ulkoilman vesihöyrypitoisuuksien erotusta, kun sisäilman vesihöyrypitoisuus on suurempi tai yhtä suuri kuin ulkoilmassa.

Suomalainen homemalli

VTT:n ja TTY:n yhdessä kehittämä laskentamalli, jolla voidaan arvioida homeiden ja mikrobin kasvua eri rakennusmateriaalien pinnoilla muuttuvissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa ajan funktiona.

Tuulensuoja

Tuulensuoja on materiaalikerros, jolla estetään tuulen aiheuttamaa haitallista ilmavirtausta rakenteen lämmöneristyskerrokseen.

Vesihöyryn osapaine

Vesihöyryn osapaine (p_v) ilmoittaa vesihöyryn paineen ilmassa.

Vesihöyrynläpäisevyys

Vesihöyrynläpäisevyys (δ_v tai δ_p) ilmoittaa vesihöyrymäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pinta-alayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen, jonka eri puolilla olevien tilojen vesihöyrypitoisuusero (tai vesihöyryn osapaineero) on yksikön suuruinen.

Vesihöyrynvastus

Vesihöyrynvastus (Z_v tai Z_p) kuvaa ainekerroksen kykyä vastustaa vesihöyryn liikettä ja se saadaan jakamalla ainekerroksen paksuus vesihöyrynläpäisevyydellä.

1. JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Tutkimus on osa Suomen Akatemian rahoittamaa BALANCE-hanketta, jossa Tampereen yliopisto on mukana yhdessä Helsingin yliopiston, Oulun yliopiston ja Terveystieteiden ja hyvinvoinnin laitoksen kanssa. Hankkeessa pyritään selvittämään, kuinka Suomessa olemassa olevasta rakennuskannasta voidaan huolehtia mahdollisimman kustannustehokkaasti, kun otetaan huomioon ilmastonmuutos, energiatehokkuusvaatimukset, hiilijalanjälki, sisäilman laatu, terveys ja kustannukset. Tässä tutkimuksessa tarkastellaan pääasiassa ilmastonmuutoksen vaikutuksia olemassa olevaan suomalaiseen rakennuskantaan ja kuinka ilmastonmuutos vaikuttaa homekasvun riskiin rakenteissa.

Ilmastonmuutoksen vaikutuksia vaipparakenteiden kosteustekniseen toimintaan on tarkasteltu laajasti muun muassa vuosina 2009–2012 toteutuneessa FRAME-hankkeessa (Vinha et al. 2013a). Kosteus- ja lämpöteknisissä simuloinneissa on käytetty aiemmin melko vakioituneita materiaaleja, jotka eivät välttämättä vastaa täysin vanhemman rakennuskannan materiaalien ominaisuuksia. Tämän vuoksi on tärkeää saada lisää tietoa varsinkin vanhemman rakennuskannan materiaaleista kosteus- ja lämpötekniisten simuloitien lähtötiedoiksi. Uudisrakentamisen yhteydessä homeen kasvun riskiä rakenteissa on pääosin tarkasteltu suomalaisen homemallin avulla vain yhden testivuoden tuloksiin perustuen, joten muun muassa vanhemman rakennuskannan pidemmän aikavälin homeeriskin tarkasteluista tarvitaan lisää tutkimusta.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena oli löytää kosteus- ja lämpötekniikan simuloitien lähtötiedoksi mahdollisimman hyvin vanhemman rakennuskannan rakennusmateriaalien ominaisuuksia kuvaavia arvoja ja luoda kosteus- ja lämpötekniikan simuloitien varten rakennemalleja BALANCE-hankkeeseen. Rakennemallit pyrittiin kokoamaan siten, että ne kuvaisivat mahdollisimman hyvin olemassa olevaa rakennuskantaa. Tarkastelu keskittyi asuinrakennuksiin, joiden osuus kaikista rakennuksista oli vuoden 2018 tilastojen mukaan 85 % (Suomen virallinen tilasto 2018). Tuloksia voidaan kuitenkin hyödyntää myös muissa ra-

kennusryhmissä, sillä vastaavia rakenteita on käytetty myös opetusrakennuksissa, hoitoalan rakennuksissa sekä liike- ja toimistorakennuksissa. Rakenteiksi valittiin yleisesti esiintyviä malliratkaisuja, joita tutkimuksen edetessä on myös mahdollista vähällä työllä muokata.

Tavoitteena oli myös pohtia keinoja, joilla homemallia voidaan hyödyntää pitkän aikavälin laskennan tulosten arvioinnissa. Homemallin avulla arvioitiin ilmastomuutoksen vaikutusta eri ulkoseinärakenteisiin sekä pyrittiin asettamaan rakenteita homeen kasvun riskin perusteella järjestykseen.

1.3 Tutkimuksen suoritus

Tutkimuksessa pyrittiin kartoittamaan kirjallisuuslähteistä materiaaliominaisuuksia, jotka kuvaisivat olemassa olevan vanhemman rakennuskannan materiaaleja. Suomalaisessa rakennuskannassa esiintyviä ulkoseinärakenteita simuloitiin WUFI-2D-ohjelman 4.3 versioilla. WUFI-2D on simulointiohjelma, jolla voidaan ratkaista rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan liittyviä ongelmia muuttuvissa ympäristön olosuhteissa.

WUFI-2D-ohjelmasta saatujen lämpötilan sekä suhteellisen kosteuden arvojen avulla mallinnettiin suomalaisella homemallilla ulkoseinärakenteiden homehtumisherkkyttä. Homemallista saadun homeindeksin avulla pystytään arvioimaan todennäköisyyttä, jolla rakenteessa esiintyy homeetta ja lukua voidaan vertailla nykyilmaston ja tulevaisuuden ilmaston simulointitulosten välillä. Yleisesti käytetyn testivuoden sijasta tässä tutkimuksessa mallinnettiin nykyilmaston mitattuja vuosia sekä tulevaisuuden vuosia 30 vuoden aikasarjoissa, jolloin voidaan ottaa huomioon eri vuosien vaihtelua ja keskenään erilaisten peräkkäisten vuosien vaikutusta.

1.4 Tutkimuksen rajaus

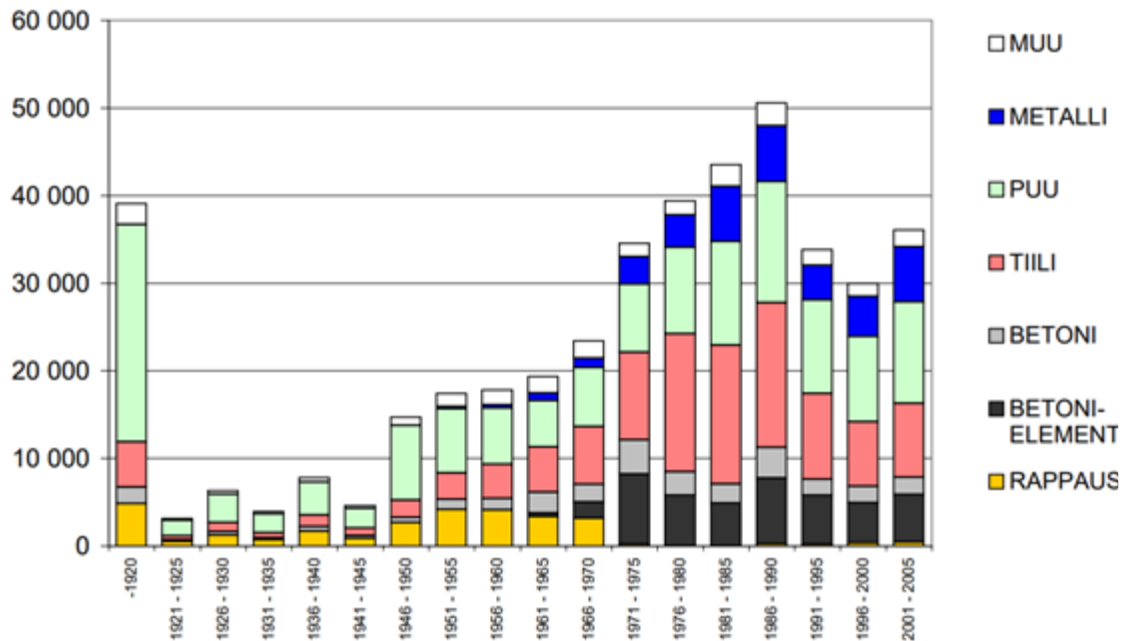
Tutkimuksessa rakenteet rajattiin koskemaan ainoastaan ulkoilmaa vasten olevia ulkoseinärakenteita. Ulkoseinärakenteiden toimintaa mallinnettiin pääosin ideaalitalanteessa, jossa rakentamisen laadusta tai rakenneliittymistä aiheutuvia muuttujia ei otettu huomioon. Rakenteissa tapahtuu käytännössä kuitenkin aina jonkin verran ilma- ja kosteusvuotoja, mutta laskennan yksinkertaistamiseksi niitä ei tämän tutkimuksen yhteydessä pystytty ottamaan huomioon. Rakenneliittymien ja halkeamien läpi kulkeutuvia kosteusvuotoja arvioitiin ainoastaan yksittäisessä ohutrappaus-eristejärjestelmän tapauksessa. Ainut rakentamisen laatuun liittyvä tekijä tutkimuksessa oli tiilimuuratuissa rakenteissa laastipurseiden esiintyminen tuuletusvälissä.

Rakenteita on toteutettu hyvin monenlaisilla rakenneratkaisuilla ja lämmöneristepaksuuksilla. Tutkimuksen rajallisen ajan puitteissa tarkasteltavien laskentamallien lukumäärää jouduttiin työn edetessä rajaamaan, sillä kaikki eri variaatiot huomioon ottaen rakennemalleja tulisi useita satoja. Kaikkea laskentatarkasteluista saatavaa dataa ei voisi suuresta määrästä johtuen esittää. Tuloksissa esitetään tutkimuksen kannalta oleellisia tuloksia ulkoseinärakenteiden homeindeksien avulla.

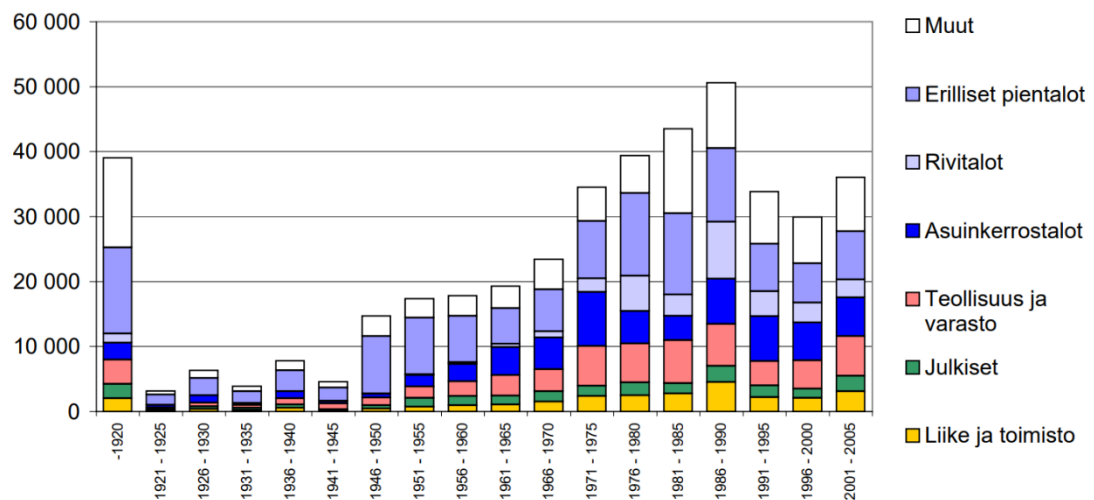
2. SUOMALAINEN RAKENNUSKANTA

Vuoden 2018 tilastojen mukaan olemassa olevasta asuinrakennuskannasta huomattava osuus on vanhempaa ennen vuotta 1970 rakennettua rakennuskantaa. Ennen vuotta 1970 rakennettujen asuinrakennuksien osuus oli 40 % ja vuonna 1970 tai sen jälkeen rakennettujen asuinrakennuksien osuus oli 60 % kaikista asuinrakennuksista. Asuinrakennuksien osuus koko rakennuskannasta oli 85 %. Asuinrakennuksien suuri osuus näkyy yksi- ja kaksikerroksisten rakennusten suurena osuutena koko rakennuskannasta. Yksikerroksisia taloja rakennuskannasta oli 66 % ja yksi- ja kaksikerroksisia yhteensä 95 %. (Suomen virallinen tilasto 2018)

Suomalaisen rakennuskannan yleisin julkisivumateriaali on puu, toiseksi yleisin tiili ja kolmanneksi yleisin betoni. Puujulkisivujen osuus uusista julkisivuista oli 1960-luvulle asti noin puolet ja 1960-luvusta eteenpäin osuus on ollut noin 20–30 %. Tiilijulkisivujen rakentaminen on ollut kiivainta 1970-luvun lopulta 1990-luvulle asti, jolloin tiilen osuus julkisivuista on ollut suurimmillaan yli 30 %. Julkisivumateriaalien jakaumassa näkyy erillisten pientalojen ja rivitalojen suuri osuus rakennuskannasta. Betoni-elementtien kehittyminen ja saapuminen markkinoille näkyy vastaavasti asuinkerrostalojen julkisivupinta-alan kasvuna 1970-luvulla. Kuvissa 1 ja 2 on esitetty julkisivujen jakauma materiaalin ja rakennuksen tyyppin suhteen. (Vainio et al. 2005)



Kuva 1. Julkisivukanta (ei sisällä ikkunoita) rakennusten valmistusajankohdan mukaan, yhteensä 425 milj. m² vuonna 2005. (Vainio et al. 2005, liite 3)



Kuva 2. Julkisivukanta (ei sisällä ikkunoita) rakennusten valmistusajankohdan mukaan, yhteensä 425 milj. m² vuonna 2005. (Vainio et al. 2005, liite 3)

Omakotitaloja rakennettiin Suomessa pääasiassa umpihirrestä pitkälle 1930-luvulle asti. Ensimmäisenä varsinaisena lämmöneristeenä Suomessa on alettu käyttämään puueristeitä (sahanpurua tai sahanpurun ja kutterinlastun sekoitusta), joiden suosio on ollut suurimmillaan 1940- ja 1950-luvuilla. Mineraalivillan käyttö lämmöneristeenä yleistyi 1950-luvulla, jonka jälkeen se on pysynyt hallitsevana eristemateriaalina rakentamisessa. (Ympäristöministeriö 2018)

Tyypilliset ulkoseinien U-arvot 1950-luvun purulla eristetyissä omakotitaloissa ovat olleet noin luokkaa 0,43...0,58 W/m²K ja vastaavat eristepaksuudet luokkaa 100...125 mm. Omakotitalojen pääasiallinen eriste on 1960-luvulta eteenpäin ollut mineraalivilla. Eristepaksuudet kasvoivat 1960-luvun omakotitalojen 100 mm mineraalivillan paksuudesta 1970-luvulla lähemmäs 150 mm:n eristepaksuutta ja edelleen 1980-luvulla lähemmäs 200 mm:n eristepaksuutta. (Ympäristöministeriö 2018)

Kerrostaloissa tyypilliset eristepaksuudet ovat olleet hieman pienempiä ja vastaavasti U-arvot pientaloja suurempia. Asuinkerrostalojen mineraalivillaa vastaavat keskimääräiset eristepaksuudet uudisrakentamisessa ovat olleet 1970-luvulla 90...100 mm ja 1980-luvulla 120...140 mm (Ympäristöministeriö 2018). Tiiliverhottujen kerrostalojen mineraalivillaeristeiden suunnittelupaksuudet ovat olleet vuosien 1960–1975 aikana 50...100 mm ja vuosien 1975–2000 aikana 120...150 mm (Neuvonen 2006). Betonisandwich-elementtien lämmöneristeen suunnittelupaksuus on ollut 90 mm vuoteen 1976 asti, jonka jälkeen 120 mm vuoteen 1986 asti ja edelleen 140 mm vuoteen 2003 asti (Lahdensivu & Hilliaho 2010).

Ulkoseinärakenteiden eristepaksuudet ovat kasvaneet U-arvovaatimusten tiukentumisten myötä. Vuoden 1976 Rakentamismääräyskokoelman osa C3 Lämmöneristys esittää ulkoseinärakenteen K-arvolle (nykyisin U-arvo) enimmäisarvoina 0,4 W/m²K kevyille (≤ 100 kg /m²) seinille ja 0,7 W/m²K raskaille (>100 kg /m²) seinille (Suomen RakMK C3 1976). Vuonna 1978 arvoja tiukennettiin enimmäisarvoihin 0,29 W/m²K kevyille (≤ 100 kg /m²) seinille ja 0,35 W/m²K raskaille (>100 kg /m²) seinille (Suomen RakMK C3 1978). Rakentamismääräyskokoelman osassa C3 vuonna 1985 esitetään ulkoseinille enimmäisarvoa 0,28 W/m²K (Suomen RakMK C3 1985). Määräystä C3 tiukennettiin edelleen vuonna 2003, jolloin U-arvon enimmäisarvoksi (pois lukien hirsiseinät) esitetään 0,25 W/m²K (Suomen RakMK C3 2003). Määräystä on edelleen tiukennettu vuonna 2007 U-arvon enimmäisarvoon 0,24 W/m²K ja vuonna 2010 U-arvoon 0,17 W/m²K (Suomen RakMK C3 2007; Suomen RakMK C3 2010). Kumottujen rakennusmääräyskokoelmien C3 määräyksissä esitetyt U-arvot on esitetty koottuna alla olevassa taulukossa 1.

Taulukko 1. Kumottujen rakentamismääräysten C3 mukaan esitetyt U-arvojen vaatimukset vuosilta 1976–2010.

Rakentamismääräyksen C3 toimeenpano vuosi	1976	1978	1985	2003	2007	2010
U-arvo (tai K-arvo) W/m ² K	0,4 (0,7)	0,29 (0,35)	0,28	0,25	0,24	0,17

Vuosina 2012–2013 siirryttiin rakenteiden energiatehokkuudessa käyttämään rakennusten kaiken energian käytön kokonaisvaikutuksia E-luvun avulla sekä rakentamismääräyksissä että energiatodistuksissa. Uusin rakennuksen energiatehokkuutta koskeva asetus on Ympäristöministeriön asetus 1010/2017 uuden rakennuksen energiatehokkuudesta vuodelta 2017 (Ympäristöministeriö 2017). Ulkoseinän lämmönläpäisykertoimen vertailuarvona on rakennuksen energiatehokkuuden laskennassa edelleen käytössä arvo $0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$. Asetuksessa annetaan vaihtoehtoinen tapa osoittaa energiatehokkuuden vertailuluku (E-luku) rakenteellisella energiatehokkuudella, jossa rakenteellisen energiatehokkuuden ulkoseinien lämmönläpäisykertoimien vertailuarvot ovat pienille asuinrakennuksille $0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$ ja vähintään kolmikerroksisille asuinkestoaloille $0,14 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Ympäristöministeriö 2017). Ulkoseinärakenteen U-arvoon $0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$ vaaditaan pääosin yli 200 mm:n mineraalivillaeristepaksuuksia.

3. LÄMMÖN JA KOSTEUDEN SIIRTYMINEN RAKENTEISSA

Tässä luvussa esitetään ulkoseinärakenteiden laskentamallien taustalla olevat oleellimmat lämmön- ja kosteudensiirtomuodot. Teorian ymmärtäminen laskentamallien taustalla on tärkeää tulosten perusteella tehtävien johtopäätösten kannalta.

3.1 Lämmön siirtyminen

Termodynamiikassa maailma voidaan jakaa systeemeihin ja ympäristöihin (Hens 2007). Rakenteiden tai rakennusosien voidaan kosteus- ja lämpöteknisissä simuloinneissa ajatella olevan termodynamiikan mukaisia systeemejä. Aineen ja energian on mahdollista kulkeutua systeemien ja ympäristön välillä riippuen systeemille määrätystä raja-arvoista. Avoimessa systeemissä aine ja energia voi kulkeutua systeemiä ympäröivien rajojen yli (Atkins & De Paula 2010). Aineena voidaan rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa ajatella olevan muun muassa vesihöyry ja nestemäinen vesi (Hens 2007). Ympäristönä systeemille toimii sisä- ja ulkoilman olosuhteet. Energia kuvaa systeemin potentiaalia tehdä työtä ja termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön mukaan energiaa ei voi luoda eikä hävittää vaan sillä on ainoastaan kyky muuttua muodosta toiseen (Atkins & De Paula 2010). Systeemin sisäenergian muutos on systeemin tehdyn työn ja systeemiin tuodun lämpöenergian summa (Atkins & De Paula 2010).

Termodynamiikan toisen pääsäännön mukaan lämpötilaerot pyrkivät spontaanisti tasoittumaan, jolloin lämpö pyrkii aina siirtymään korkeammasta lämpötilasta matalampaa lämpötilaa kohti. Lämpöä voi siirtyä systeemiin tai systeemin sisällä johtumalla, säteilemällä ja konvektiolla. (Hens 2007)

3.1.1 Johtuminen

Johtuminen tarkoittaa liike-energian siirtymistä systeemin sisällä tai systeemistä toiseen molekyylien keskinäisten törmäysten välityksellä (Fagerholm 1986). Johtumalla siirtyvän lämpövirran tiheys q (W/m^2), voidaan laskea homogeenisessä ja isotrooppisessa ainekerroksessa Fourierin lain avulla kaavan 1 mukaisesti (Hagentoft 2001).

$$q = -\lambda \nabla T = -\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \lambda \frac{\partial T}{\partial y}, \lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad (1)$$

missä

q on lämpövirran tiheys (W/m^2),

λ on lämmönjohtavuus ($W/(m \cdot K)$)

T on lämpötila (K)

x, y, z ovat lämpövirran suuntakoordinaatit (m)

Lämpövirran tiheys q voidaan laskea jatkuvuustilassa lämpötilajakauman ollessa lineaarinen materiaalikerroksen läpi seuraavasti:

$$q = \lambda \frac{T_1 - T_2}{d} \quad (2)$$

missä

q on lämpövirran tiheys (W/m^2),

d on materiaalikerroksen paksuus (m)

$T_{1,2}$ on lämpötila materiaalikerroksen eripuolilla (K)

Materiaalin lämmönvastus R ($m^2 \cdot K/W$) saadaan materiaalikerroksen paksuuden d ja lämmönjohtavuuden λ suhteesta seuraavasti:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (3)$$

missä

R on materiaalin lämmönvastus ($m^2 \cdot K/W$)

d on materiaalikerroksen paksuus (m)

λ on lämmönjohtavuus ($W/(m \cdot K)$)

3.1.2 Säteily

Kaikki kappaleet, joiden lämpötila on absoluuttista nollapistettä korkeampia, lähettävät eli emittoivat ympärilleen säteilyä. Säteilystä energiaa siirtyy kappaleiden välillä valonnopeudella sähkömagneettisen aaltoliikkeen välityksellä. Toisin kuin johtumisessa ja

konvektiossa, säteily ei tarvitse väliainetta siirtyäkseen. Säteily voidaan jakaa lyhyt- ja pitkäaaltoiseen säteilyyn. Lyhytaaltainen säteily on suoraan auringosta tulevaa säteilyä tai ilmakehän ja pilvien kautta heijastunutta diffuusisäteilyä. Pitkäaaltoinen säteily on kappaleiden ja pintojen emittoimaa lämpösäteilyä sekä maan ja rakennuksien pinnalta heijastunutta diffuusisäteilyä. Kokonaissäteily tietyssä pisteessä koostuu eri aallonpituuksista, jotka voivat tulla useista eri suunnista. (Björkholz 1997; Hagentoft 2001)

Säteilyn aallonpituus ja taajuus ovat toisistaan riippuvaisia seuraavasti:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (4)$$

missä

λ on lämmönjohtavuus (W/(m·K))

c on valon nopeus ($2,998 \times 10^8$ m/s)

f on säteilyn taajuus (Hz)

Lämpösäteily käsittää sähkömagneettisen spektrin aallonpituusalueen $0,1 \dots 100 \mu\text{m}$, joista näkyvän valon osuus on välillä $0,4 \dots 0,7 \mu\text{m}$. Säteilyn osuessa pintaan osa säteilystä heijastuu, osa absorboituu ja osa tunkeutuu materiaalin läpi. (Hagentoft 2001)

Säteilyn eri komponentteja ja niiden osuutta säteilystä voidaan kuvata seuraavan yhtälön avulla:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (5)$$

missä

ρ on heijastuskerroin (-)

α on absorptiokerroin (-)

τ on läpäisykerroin (-)

Rakennusfysiikassa tutkittavilla kiinteillä materiaaleilla ei kuitenkaan ole merkittävää säteilyn läpäisykerrointa, jolloin yhtälössä läpäisykerroimen arvoksi tulee 0. Tärkeänä poikkeuksena on lasi, joka läpäisee lyhytaaltoista säteilyä. (Hagentoft 2001)

Eniten säteilytehoa voi emittoida ideaali musta kappale. Ideaalia mustaa kappaletta lähimpänä rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa on aurinko (Hagentoft 2001). Pinnan

emittimalla säteilyllä on täysin mustalle kappaleelle yläraja E_b (W/m^2), joka voidaan laskea Stefan-Bolzmännin lain avulla seuraavasti :

$$E_b = \sigma T^4 \quad (6)$$

missä

E_b on mustan kappaleen säteilyteho (W/m^2)

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

T on säteilyä lähettävän pinnan lämpötila (K)

Todellisuudessa mikään pinta ei emittoi yhtä suurta määrää energiaa kuin ideaali musta kappale. Pinnan todellisen säteilytehon ja ideaalisen mustan kappaleen välisen säteilytehon suhde voidaan ilmoittaa pinnan emissiviteettinä ε kaavan 7 mukaisesti.

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} \quad (7)$$

missä

ε on emissiviteetti (-)

E on todellisen pinnan lähettämä säteilyteho (W/m^2)

E_b on mustan kappaleen säteilyteho (W/m^2)

Emissiviteetti voi saada arvoja väliltä $1 \dots 0$. Rakennusmateriaalien emissiviteeteistä suurin osa on huoneenlämmössä alueella $0,8 \dots 0,95$. Poikkeuksena esimerkiksi alumiini ja alumiinivärit, joiden emissiviteetit ovat huomattavasti pienemmät: $0,2 \dots 0,6$. (Björkholtz 1997). Luvussa 6.2 on esitetty simuloinnissa käytetyt emissiviteetti- ja absorptiokertoimet.

Kirkkaina pilvettöminä öinä rakenteiden pintalämpötilat voivat laskea ulkoilman lämpötilaa matalammaksi ilmakehästä saapuvan vastasäteilyn ja rakennuksen pinnasta tai vaalle lähtevän säteilyn erotuksen seurauksena (Björkholtz 1997). WUFI-2D-ohjelmassa on mahdollista huomioida yöllinen rakenteiden viilentyminen ottamalla käyttöön laskennassa pitkäaaltoisen säteilyn vaikutukset. WUFI-2D-ohjelma tasapainottaa säteilyn komponentit seuraavasti (Kehrer & Schmidt 2006):

$$I = \alpha \cdot I_s + \varepsilon \cdot I_l - I_e \quad (8)$$

missä

I	on kokonaissäteily kappaleen pinnalla (W/m ²)
α	on pinnan lyhytaaltoisen säteilyn absorptiokerroin (-)
I_s	on lyhytaaltainen auringon säteily (W/m ²)
ε	on emissiviteetti (-)
I_l	on pitkäaaltoinen vastasäteily (W/m ²)
I_e	on pinnan pitkäaaltoinen emissio (W/m ²)

Positiivinen kokonaissäteily I tarkoittaa pinnan lämpenemistä ja negatiivinen puolestaan jäähtymistä. Lyhytaaltainen auringon säteily voidaan esittää kaavalla 9 ja pitkäaaltoinen vastasäteily kaavalla 10 (Kehrer & Schmidt 2006).

$$I_s = I_{s,dir} + g_{atm} \cdot I_{s,diff} + g_{terr} \cdot I_{s.refl} \quad (9)$$

missä

$I_{s,dir}$	on kohtisuoraan pinnalle tuleva suora auringon säteily (W/m ²)
g_{atm}	on ilmakehän näkyvyyskerroin (-)
$I_{s,diff}$	on pintaan tuleva diffuusi säteily (W/m ²)
g_{terr}	on ympäristön näkyvyyskerroin (-)
$I_{s.refl}$	on maanpinnasta heijastunut auringon säteily (W/m ²)

$$I_l = g_{atm} \cdot I_{l,atm} + g_{terr} \cdot (I_{l,terr} + I_{l.refl}) \quad (10)$$

missä

$I_{l,atm}$	on ilmakehän vastasäteily (W/m ²)
$I_{l,terr}$	on ympäristön vastasäteily (W/m ²)
$I_{l.refl}$	on maanpinnasta heijastunut ilmakehän vastasäteily (W/m ²)

Näkyvyyskerroimet on WUFI-2D-ohjelmassa määritetty seuraavasti:

$$g_{atm} = \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (11)$$

$$g_{terr} = 1 - g_{atm} \quad (12)$$

missä

β on pinnan kaltevuuskulma (pystysuoralle seinälle $\beta = 90^\circ$)

Pitkäaaltoinen emissio voidaan ratkaista Stefan-Bolzmännin lain avulla seuraavasti (Kehrer & Schmidt 2006):

$$I_e = \varepsilon \sigma T_{pinta}^4 \quad (13)$$

missä

I_e on pinnan pitkäaaltoinen emissio (W/m^2)

T_{pinta} on tutkittavan pinnan lämpötila (K)

ε on emissiviteetti (-)

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

Kaavasta 13 WUFI-2D-ohjelma muodostaa lineaarisen yhtälön 14, jotta voidaan ratkaista tiedetystä lämpötilasta uusi lämpötila seuraavassa aikapisteessä (Kehrer & Schmidt 2006).

$$I_{e.lin} = \varepsilon \sigma T_0^4 + 4\varepsilon \sigma T_0^3 \cdot (T - T_0) \quad (14)$$

missä

$I_{e.lin}$ on linearisoitu emissio (W/m^2)

T_0 on pinnan lämpötila ennen iteraatiota (K)

T on iteraatiossa ratkaistava lämpötila (K)

3.1.3 Konvektio

Lämmön siirtyessä paine-erojen vaikutuksella kaasun tai nesteen virtauksen mukana puhutaan konvektiosta. Konvektio voi olla pakotettua, jolloin neste tai kaasu liikkuu jonkun ulkopuolisen voiman vaikutuksesta. Merkittäviä pakotetun konvektion aikaansaavia voimia ovat rakennuksen ulkopuolella tuuli ja sisätiloissa puhaltimet. Luonnollisessa konvektiossa puolestaan kaasu tai neste liikkuu lämpötilaerojen aiheuttamien tiheyserojen

seurauksena. Konvektio rakenteissa on yleensä yhdistelmä pakotettua ja luonnollista konvektiota. (Björkholz 1997)

Pakotettua konvektiota rakenteen läpi voi paine-eron vaikutuksesta erityisesti ilmetä, kun rakenteessa ei ole tiivistä ilmansulkua. Tuulensuojan läpi voi tuulen vaikutuksesta aiheutua konvektiota, mikäli tuulensuojana on käytetty liian huokoista materiaalia tai se on virheellisesti asennettu. Rakenteen sisäistä konvektiota eli luonnollista konvektiota voi esiintyä yhtenäisissä, erityisesti paksuissa huokosverkostoissa. (Vinha 2019a)

FRAME-tutkimuksessa suoritettujen tarkasteluiden perusteella todettiin sisäisen konvektion vaikutus merkittävämmäksi kovilla pakkasilla paksuilla huokoisilla eristekerroksilla (300... 400 mm) (Vinha et al. 2013a). Tässä tutkimuksessa tutkittavat eristepaksuudet vaihtelevat välillä 60...250 mm, joten sisäisen konvektion vaikutus tuloksiin olisi vähäinen. WUFI-2D-ohjelmassa konvektion vaikutuksia olisi mahdollista yrittää simuloida erilaisten lähdekomponenttien avulla (kts. luku 6.3.10), mutta niitä ei tuuletusväliä ja tuuletusuria lukuun ottamatta tässä tutkimuksessa hyödynnetty.

Konvektio rakenteen pinnan ja ympäröivän ilman välillä voidaan esittää materiaalin konvektiivisen lämmönsiirtokerroimen h_c avulla seuraavasti (Hens 2007):

$$q_c = h_c \Delta T \quad (15)$$

missä

q_c on konvektiivisen lämpövirran tiheys (W/m²)

h_c on pinnan konvektiivinen lämmönsiirtokerroin (W/ (m²K))

ΔT on lämpötilaero ympäröivän ilman ja pinnan välillä (K)

WUFI-2D-ohjelmalla on mahdollista käyttää myös tuulesta riippuvia lämmönsiirtokerroimia. WUFI-2D-ohjelma laskee oletuksena lämmönsiirtokerroimen h (W/ (m²K)) tuulen puolelle kaavalla 16 ja tuulta vasten kaavalla 17.

$$h = 0,33 \cdot v_{tuuli} + h_{c,0} + h_r \quad (16)$$

$$h = 1,66 \cdot v_{tuuli} + h_{c,0} + h_r \quad (17)$$

missä

v_{tuuli} on tuulennopeus (m/s)

h_r	on säteilyn osuus lämmönsiirtokertoimesta 6,5 (W/ (m ² K))
$h_{c,0}$	on konvektiivisen lämmönsiirron osuus 4,5 (W/ (m ² K)), kun $v_{tuuli}= 0$ m/s

Käytetyssä WUFI-2D-ohjelmassa ei ollut mahdollista muuttaa tuulen kertoimia tai vakiona käytettyjä arvoja tuulesta riippuvassa lämmönsiirtokertoimen laskennassa. Arvot poikkeavat hieman standardissa SFS EN ISO 6946 (2017) esitetyistä arvoista.

3.2 Kosteuden esiintyminen rakenteissa

Rakenteisiin tuleva kosteusrasitus on pääosin peräisin sateesta, sisäilman kosteuslähteistä, maaperästä nousevasta kosteudesta sekä erityisesti uusissa rakennuksissa rakennusaikaisesta kosteudesta. Kosteus voi olla myös seurausta vesivahingosta. Materiaalissa oleva kosteus pyrkii aina tasapainoon ympäristön kosteuden kanssa. Mikäli rakennusmateriaali ei ole tasapainossa ympäristön kanssa, se joko ottaa eli absorptoi vettä ympäristöstä tai vastakohtaisesti luovuttaa eli desorptoi vettä ympäristöön. Rakenteissa tapahtuvaan kosteuden siirtymiseen vaikuttaa siis ympäristö, joka voi olla vettä, kosteaa ilmaa tai toista materiaalia. Ympäristön lisäksi rakennusmateriaalissa siirtyvän kosteuden määrään ja siirtymisnopeuteen vaikuttaa rakennusaineen hygroskooppisuus sekä kapillaarisuus. (Björkholtz 1997)

3.2.1 Ilman kosteus

Kaikki rakenteet, jotka ovat vedenpinnan yläpuolella ovat kosketuksissa ilmaan. Suurin osa rakennusmateriaaleista on myös huokoisia, jolloin niiden huokosissa on ilmaa. Ilma on usean kaasun seos, mutta sen voidaan ajatella koostuvan kahdesta kaasusta, kuivasta ilmasta sekä vesihöyrystä. Vesihöyry on kuivaa ilmaa kevyempi kaasu, joten mitä enemmän vesihöyryä ilmassa on, sitä kevyempää ilma on. (Björkholz 1997)

Ilma oletetaan rakennusteknisissä tarkasteluissa ideaalikaasuksi, jolloin laskentaan pätee ideaalikaasun tilanyhtälö (Björkholz 1997):

$$pV = nRT \quad (18)$$

missä

p on kaasun paine (Pa)

V on kaasun tilavuus (m³)

n	on ainemäärä (mol)
R	on yleinen kaasuvakio (8314,3 J/kmol·K)
T	on lämpötila (°K)

Ainemäärä voidaan lausua massan ja moolimassan suhteena:

$$n = \frac{m}{M} \quad (19)$$

missä

n	on ainemäärä (mol)
m	on kaasun massa (kg)
M	on kaasun moolimassa (kg/mol)

Ideaalikaasun tilanyhtälö pätee molemmille kaasuille erikseen ja molempien kaasujen tiheys voidaan ilmoittaa muodossa:

$$\rho = \frac{p \cdot M}{R \cdot T} \quad (20)$$

missä

ρ	on kaasun tiheys (kg/m ³)
--------	---------------------------------------

Vesihöyrypitoisuus v (kg/m³) voidaan siten lausua muodossa:

$$v = \frac{p_v \cdot M_v}{R(273,15 + \theta)} \quad (21)$$

missä

p_v	on vesihöyryn osapaine (Pa)
M_v	on veden moolimassa (kg/mol)
θ	on ilman lämpötila (°C)

Ilma voi tietyssä lämpötilassa sisältää vain tietyn määrän vesihöyryä. Vesihöyryn ylärajaa tietyssä lämpötilassa kutsutaan kyllästyskosteudeksi. Suhteellisella kosteudella φ , RH voidaan ilmoittaa ilmassa olevan vesihöyryn kosteusmäärän suhde kyllästyskosteuteen:

$$\varphi = \frac{v}{v_s} \quad (22)$$

missä

v on ilman kosteuspitoisuus (g/m^3)

v_s on ilman kyllästyskosteuspitoisuus tietyssä lämpötilassa (g/m^3)

Suhteellinen kosteus voidaan esittää myös vesihöyryn osapaineen p_v suhteena kyllästyspaineeseen $p_{v,s}$ kaavan 23 mukaisesti.

$$\varphi = \frac{p_v}{p_{v,s}} \quad (23)$$

missä

p_v on ilman vesihöyryn osapaine (Pa)

$p_{v,s}$ on ilman kyllästyspaine tietyssä lämpötilassa (Pa)

WUFI-2D-ohjelmassa esitetään vesihöyryn kyllästyspaineelle kaavan 24 mukainen lauseke (Künzel 1995).

$$p_{v,s}(\theta) = C_1 \cdot \exp\left(\frac{C_2 \cdot \theta}{C_3 + \theta}\right) \quad (24)$$

missä

$p_{v,s}(\theta)$ on ilman kyllästyspaine tietyssä lämpötilassa θ (Pa)

$C_1 = 610,714$; $C_2 = 22,44294$; $C_3 = 272,440$, kun $\theta < 0 \text{ }^\circ\text{C}$

$C_1 = 610,780$; $C_2 = 17,08085$; $C_3 = 234,175$, kun $\theta \geq 0 \text{ }^\circ\text{C}$

3.2.2 Kosteus materiaaleissa

Vesi voi olla sitoutunut rakennusaineisiin kemiallisesti tai fysikaalisesti. Kemiallisesti sitoutunut vesi on kemiallisten reaktioiden tuloksena kiinteästi sitoutunutta vettä, ja vesimolekyylit ovat osa materiaalin rakennetta (Björkholz 1997). Fysikaalisesti sitoutunut vesi on puolestaan vähemmän sitoutunutta ja voi esimerkiksi olla pintavoimilla kiinnittynyttä adsorptiovettä, kapillaarivoimien vaikutuksesta huokosalipaineen suuntaa imeytyvää kapillaarivettä tai vesihöyryä aineen huokosilmassa (Vinha 2019b).

Rakennusaineen hygroskooppisuus kuvaa materiaalin kykyä sitoa ja luovuttaa kosteutta. Materiaalit pyrkivät tasoittumaan ilman kanssa ilman suhteellista kosteutta vastaavaan materiaalille ominaiseen kosteuspitoisuuteen. Materiaalille ominaista kosteuspitoisuutta kutsutaan tasapainokosteudeksi. Tasapainokosteuskäyrä on materiaalille erilainen riippuen siitä, onko mittaukset tehty kuivasta kosteaan (adsorptio) vai kosteasta kuivempaan päin (desorptio). Näiden käyrien välinen ero on hystereesi. (Vinha 2019b)

Materiaalin sisältämää kosteutta voidaan esittää usealla eri tavalla, muun muassa vesimääränä tilavuutta kohden (kg/m^3), paino-osina (kg/kg), painoprosentteina (paino-%) tai tilavuusprosentteina (tilavuus-%). Kosteuspitoisuudet voidaan laskea seuraavilla kaavoilla (Björkholtz 1997):

$$w = \frac{m_w}{V_0} \quad (25)$$

missä

w on materiaalin kosteuspitoisuus vesimääränä tilavuutta kohden (kg/m^3)

m_w on materiaalin sisältämän veden massa (kg)

V_0 on materiaalin tilavuus kuivana (m^3)

$$u = \frac{m_w}{m_0} \quad (26)$$

missä

u on materiaalin kosteuspitoisuus paino-osina (kg/kg)

m_0 on materiaalin kuivapaino

$$u = 100 \cdot \frac{m_w}{m_0} \quad (27)$$

missä

u on materiaalin kosteuspitoisuus painoprosentteina (paino-%)

$$\psi = 100 \cdot \frac{V_w}{V_0} \quad (28)$$

missä

ψ on materiaalin kosteuspitoisuus tilavuusprosentteina (tilavuus-%)

V_w on materiaalin sisältämän veden tilavuus (m^3)

3.3 Kosteuden siirtyminen

Rakenteissa kosteus siirtyy pääosin vesihöyrynä tai vetenä. Kosteutta voi rakenteissa esiintyä ja siirtyä myös lumen tai jään muodossa. Kosteuden liikkumisen rakenteissa aiheuttaa aina jokin voima. Vesihöyry liikkuu pääosin pitoisuuserojen vaikutuksesta, eli diffuusiolla sekä ilman mukana konvektiolla. Nestemäistä vettä liikuttavat tärkeimmät voimat ovat kapillaari-imu, painovoima, tuulenpaine ja vedenpaine. (Björkholtz 1997)

3.3.1 Vesihöyryn diffuusio

Vesihöyryn diffuusio tarkoittaa vesihöyryn siirtymistä korkeammasta vesihöyrypitoisuudesta kohti alhaisempaa vesihöyrypitoisuutta. Tilanne syntyy, kun esimerkiksi sisäilman vesihöyrypitoisuus on suurempaa kuin ulkoilman, jolloin vesihöyrypitoisuuserot pyrkivät tasoittumaan ja vesihöyry pyrkii sisältä ulospäin. Kun tiedetään rakenteen kaikkien ainekerrosten vesihöyrynvastukset Z_v (s/m) tai Z_p ($m^2 \cdot s \cdot Pa/kg$) ja sisä- ja ulkopuolen vesihöyrypitoisuusero Δv tai vesihöyryn osapaine-ero Δp_v , niin diffuusiolla kulkeva kosteusvirta g ($kg/m^2 \cdot s$) voidaan lausua kaavoilla 29 ja 30. (Björkholz 1997; Hagentoft 2001)

$$g = \frac{\Delta v}{\sum Z_v} \quad (29)$$

missä

g on diffuusiolla kulkeva kosteusvirta ($kg/m^2 \cdot s$)

Δv on sisä- ja ulkoilman vesihöyrymäärien erotus (kg/m^3)

$\sum Z_v$ on rakennekerrosten yhteenlasketut vesihöyrynvastukset (s/m)

$$g = \frac{\Delta p_v}{\sum Z_p} \quad (30)$$

missä

g on diffuusiolla kulkeva kosteusvirta ($kg/m^2 \cdot s$)

Δp_v on sisä- ja ulkoilman vesihöyryn osapaineiden erotus (Pa)

$\sum Z_p$ rakennekerrosten yhteenlasketut vesihöyrynvastukset ($m^2 \cdot s \cdot Pa/kg$)

Materiaalien vesihöyrynvastukset Z_v tai Z_p voidaan laskea materiaalien vesihöyrynläpäisevyyksistä seuraavasti:

$$Z_v = \frac{d}{\delta_v} \quad (31)$$

missä

Z_v on vesihöyrynvastus (s/m)

d on materiaalikerroksen paksuus (m)

δ_v on rakennekerroksen vesihöyrynläpäisevyys (m^2/s)

$$Z_p = \frac{d}{\delta_p} \quad (32)$$

missä

Z_p on vesihöyrynvastus ($\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$)

δ_p on rakennekerroksen vesihöyrynläpäisevyys ($\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$)

Vesihöyrynläpäisevyydestä voidaan laskea myös materiaalille diffuusiovastuskerroin μ , joka kuvaa paikallaan olevan ilman vesihöyrynläpäisevyyden ja materiaalin vesihöyrynläpäisevyyden suhdetta (Hagentoft 2001).

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p} \quad (33)$$

missä

μ on materiaalin diffuusiovastuskerroin (-)

δ_a on ilman vesihöyrynläpäisevyys ($2 \cdot 10^{-7} \cdot T^{0.81}/P_n$) ($\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$)

P_n on normaali ilmanpaine 101323 (Pa)

δ_p on rakennekerroksen vesihöyrynläpäisevyys ($\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$)

Suhteellinen diffuusiovastus s_d (m) ilmoittaa paikallaan olevan ilmakerroksen paksuuden, jonka vesihöyrynvastus on yhtä suuri kuin tarkasteltavan materiaalin vesihöyrynvastus. Suhteellinen diffuusiovastus s_d voidaan laskea kaavalla 34:

$$s_d = \mu \cdot d \quad (34)$$

missä

s_d on materiaalin suhteellinen diffuusiovastus (m)

μ on materiaalin diffuusiovastuskerroin (-)

d on materiaalikerroksen paksuus (m)

3.3.2 Kapillaarinen kosteuden siirtyminen

Kapillaarisuudella tarkoitetaan aineiden kykyä imeä ja siirtää vettä. Kapillaarinen imu on seurausta vesimolekyylien ja huokosrakenteen seinämän välisestä vetovoimasta ja pintajännityksestä. Huokosrakenteen voidaan ajatella koostuvat kapillaariputkista, joita pitkin neste pääsee kulkeutumaan. Kapillaarisessa imussa veden pinta kaareutuu kohti kapillaariputken reunoja, jolloin vedenpinnan ja yläpuolisen ilman välille muodostuu paineero, niin sanottu huokosalipaine. (Hagentoft 2001)

Nesteen ja putken seinämän välistä kaareutuvaa nestepintaa kutsutaan termeillä meniski tai meniskus (Tieteen termipankki 2021). Huokosalipaine voidaan määrittää seuraavasti (Hagentoft 2001):

$$s = \frac{2\sigma}{r} \cos \beta \quad (35)$$

missä

s on huokosalipaine (Pa)

σ on pintajännitys (N/m)

r on huokosputken säde (m)

β on kontaktikulma huokosputken seinämän ja meniskuksen välillä (-)

Yleisesti rakennusmateriaaleille kontaktikulman β voidaan arvioida olevan 0. Kapillaarinen imu nostaa veden pinnan putkessa tasolle, jossa muodostetaan tasapaino gravitaatiovoiman kanssa. Kontaktikulman β ollessa 0, voidaan tasapainoyhtälö esittää kaavan 36 mukaisesti. (Hagentoft 2001)

$$Hg\rho_{vesi} = s = \frac{2\sigma}{r} \quad (36)$$

missä

H	on veden nousukorkeus putkessa (m)
g	on putoamiskiihtyvyyys (m/s^2)
ρ_{vesi}	on veden tiheys (kg /m^3)
s	on huokosalipaine (Pa)
σ	on pintajännitys (N/m)
r	on huokosputken säde (m)

Nousukorkeus H voidaan kaavasta 36 esittää kaavan 37 mukaisesti.

$$H = \frac{2\sigma}{rg\rho_{\text{vesi}}} \quad (37)$$

missä

H	on veden nousukorkeus putkessa (m)
g	on putoamiskiihtyvyyys (m/s^2)
ρ_{vesi}	on veden tiheys (kg /m^3)
σ	on pintajännitys (N/m)
r	on huokosputken säde (m)

Veden imeytymiskerroin A_w on yleisesti käytetty ominaisuus kuvaamaan materiaalin kapillaarista vedenimukykyä. Materiaaliin imeytyneen veden ja ajan välillä vallitsee yhteys, joka voidaan laskea veden imeytymiskertoimen (tunnetaan myös nimellä kapillarteettikerroin) avulla kaavalla 38 (Björkholz 1997).

$$G = A_w \sqrt{t} \quad (38)$$

missä

G	on imeytynyt vesimäärä (kg/m^2)
A_w	on veden imeytymiskerroin ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$)
t	on aika (s)

Derivoimalla kaava 38 ajan suhteen saadaan materiaaliin siirtyvälle kosteusvirralle g kaavan 39 mukainen yhtälö.

$$g = \frac{\partial G}{\partial t} = \frac{A_w}{2\sqrt{t}} \quad (39)$$

missä

g	on kosteusvirran tiheys $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
G	on imeytynyt vesimäärä (kg/m^2)
A_w	on veden imeytymiskerroin $(\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}))$
t	on aika (s)

WUFI-2D-ohjelma käyttää kapillaarivirtauksen siirtopotentiaalina suhteellista kosteutta ja sen mahdollistaa Kelvinin yhtälön avulla saatu huokosalipaineen ja suhteellisen kosteuden välinen suhde (Künzel 1995):

$$\varphi = \exp\left(-\frac{sM_v}{\rho_v RT}\right) \quad (40)$$

missä

φ	on huokosilman suhteellinen kosteus (-)
s	on huokosalipaine (Pa)
M_v	on veden moolimassa (kg/mol)
R	on yleinen kaasuvakio $(8314,3 \text{ J}/\text{kmol} \cdot \text{K})$
T	on lämpötila $(^\circ\text{K})$

Kun yhteys huokosalipaineen ja suhteellisen kosteuden välille on saatu, niin kapillaarisen kosteusvirran tiheys voidaan siten esittää muodossa (Künzel 1995):

$$g_{cap} = -D_\varphi \nabla \varphi \quad (41)$$

missä

g_{cap}	on kapillaarisen kosteusvirran tiheys $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
D_φ	on materiaalin vedenjohtavuuskertoimen $(\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}))$

φ on huokosilman suhteellinen kosteus (-)

Materiaalin veden johtavuuskertoimen ja kosteusdiffusiviteetin välinen yhteys voidaan esittää tasapainokosteuskäyrän derivaatan avulla kaavalla 42. Kosteusdiffusiviteetti kuvaa kosteuspitoisuuksien tasoittumisnopeutta materiaalissa ja se riippuu voimakkaasti kosteuspitoisuudesta. (Künzel 1995)

$$D_{\varphi} = D_w \frac{\partial w}{\partial \varphi} \quad (42)$$

missä

D_{φ} on materiaalin vedenjohtavuuskerroin (kg/(m·s))

D_w on materiaalin kosteusdiffusiviteetti (m²/s)

w on materiaalin kosteuspitoisuus (kg/m³)

φ on huokosilman suhteellinen kosteus (-)

WUFI-2D-ohjelma käyttää kahta eri kosteusdiffusiviteettiä D_{ws} ja D_{ww} . Kosteusdiffusiviteetti D_{ws} on käytössä, kun rakenteen pinnalla on nestemäistä vettä tarjolla, esimerkiksi sateen aikana. Kosteusdiffusiviteetti D_{ww} on puolestaan käytössä muina aikoina ja se kuvaa kosteuden uudelleenjakautumista. Uudelleenjakautumista arvioidaan hitaammaksi prosessiksi ja siinä pienet huokokset dominoivat kosteudensiirtoa ja imevät huokosalipaineen vaikutuksesta vettä täyttyneistä suuremmista huokosista (Krus 1996). WUFI-2D-ohjelmassa veden imeytymiskertoimen avulla voidaan määrittää materiaalille karkea arvio kosteusdiffusiviteetistä D_{ws} (m²/s) kaavalla 43 (Künzel 1995). Uudelleenjakautumisen diffusiviteetti D_{ww} saa WUFI-2D-ohjelmassa arvoja, jotka ovat tyypillisesti noin kymmenesosa D_{ws} arvosta.

$$D_{ws} = 3,8 \left(\frac{A_w}{w_{cap}} \right)^2 1000 \frac{w}{w_{cap}}^{-1} \quad (43)$$

missä

D_{ws} on kosteusdiffusiviteetti (m²/s)

A_w on veden imeytymiskerroin (kg/(m²·s^{1/2}))

w_{cap} on materiaalin kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus (kg/m³)

w on materiaalin kosteuspitoisuus (kg/m³)

Kosteusdiffusiviteettien arviointi kaavalla 43 on helppo, mutta ei tarkin mahdollinen approksimaatio huokoisillekaan materiaaleille (Ren et al. 2019). Ren et al. (2019) ovat esittäneet tutkimuksessaan vertailua myös muiden kosteusdiffusiviteettien eri arviointimenetelmien välillä. Teoria kosteusdiffusiviteettien jakamisesta imeytymiseen ja uudelleenjakautumiseen aikaisemmin mainitulla WUFI-2D-ohjelmassa käytetyllä tavalla ei ole myöskään laajasti hyväksytty tapa (Vinha 2007).

3.3.3 Vesihöyryn konvektio

Kosteuden konvektio toimii vastaavalla tavalla ilmiönä kuin lämmön konvektio, sillä vesihöyry siirtyy pakotetun tai luonnollisen konvektion vaikutuksesta ilman mukana niin kuin lämpökin (Björkholz 1997). Erona kosteuden konvektiotarkasteluissa on kuitenkin se, että ilman sisältämä vesihöyry voi kondensoitua rakenteessa saavutettuaan kyllästyskosteuspitoisuuden (Hagentoft 2001).

Konvektio voidaan jakaa vaikutukseltaan karkeasti kahteen osaan. Ilman virratessa lämpimältä puolelta kohti kylmempää rakennetta voi kylmän rakenteen ulko-osissa tapahtua kosteuden kondensoitumista, mikäli rakenteeseen virtaavan lämpimän ilman vesihöyrypitoisuus ylittää huokosilman kyllästyskosteuspitoisuuden rakenteen kylmissä osissa. Kondensoituvan kosteuden määrä voidaan laskea yhtälöstä 44. Vastaavasti rakenteessa voi tapahtua kuivumista, mikäli rakenteeseen tulevan kylmän ilman vesihöyrypitoisuus on pienempi kuin rakenteen huokosilman vesihöyrypitoisuus lämpimällä pinnalla. Rakenteesta poistuva kosteus voidaan laskea kaavalla 45. (Hagentoft 2001)

$$G_{max} = R_a(v_{in} - v_{s(T-)}) \quad (44)$$

missä

G_{max} on rakenteeseen kondensoituvan kosteuden maksimimäärä (g/h)

R_a on ilman tilavuusvirta (m^3/h)

v_{in} on rakenteeseen virtaavan ilman vesihöyrypitoisuus (g/m^3)

$v_{s(T-)}$ on huokosilman kyllästyskosteuspitoisuus rakenteen kylmässä pinnassa (g/m^3)

$$G = R_a(n_{s(T+)} - n_{in}) \quad (45)$$

missä

G on rakenteesta poistuva kosteus (g/h)

R_a on ilman tilavuusvirta (m^3/h)

v_{in} on rakenteeseen virtaavan ilman vesihöyrypitoisuus (g/m^3)

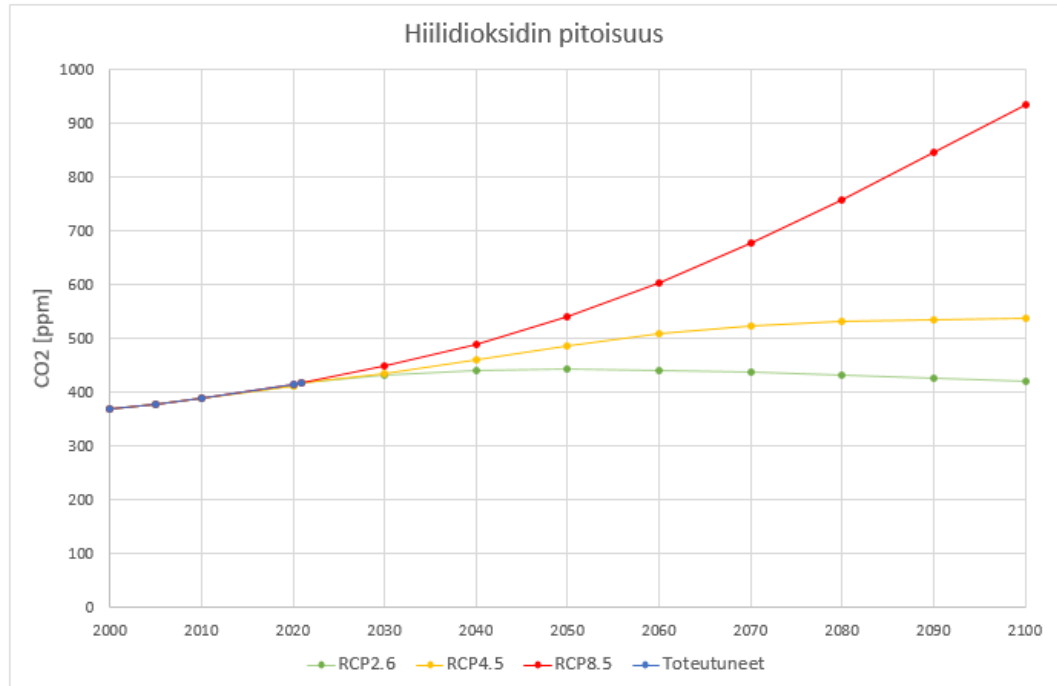
$v_{s(T+)}$ on huokosilman kyllästyskosteuspitoisuus rakenteen lämpimässä pinnassa (g/m^3)

4. LASKENNASSA KÄYTETTY SÄÄDATA

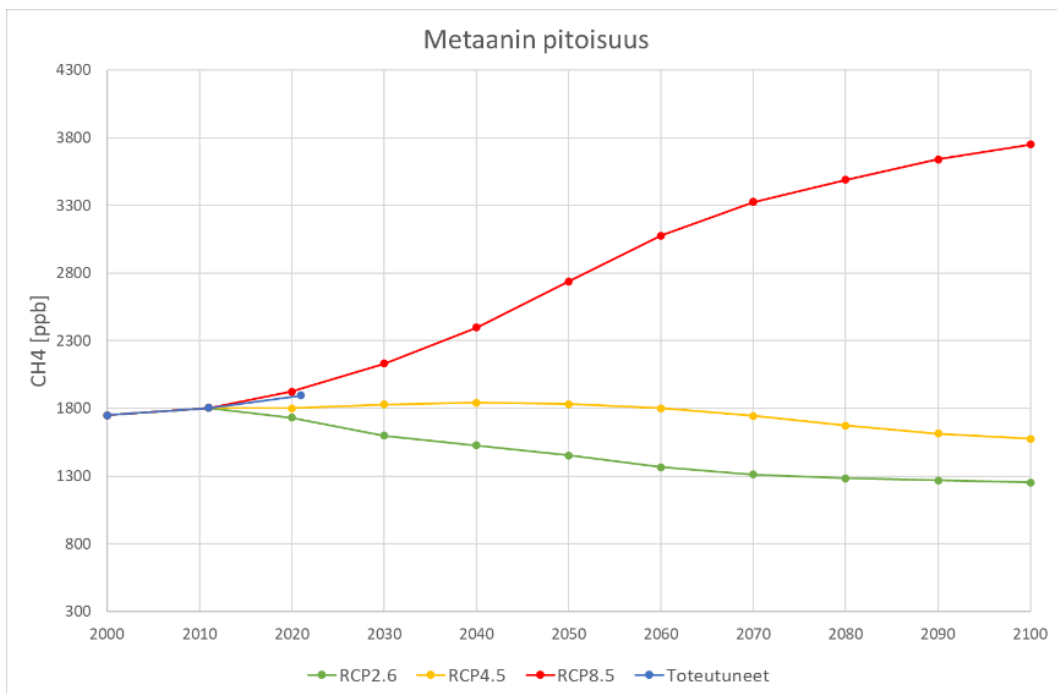
Laskennassa käytetyt säädatat koostuvat mitatusta säädatasta vuosilta 1989–2018 sekä mitattujen arvojen pohjalta tehdyistä tulevaisuuden aikasarjoista. Säädatat on muodostettu RASMI-projektissa (Jylhä et al. 2020). Mitattujen vuosien pohjalta RASMI-projektissa säädatat on muutettu kuvaamaan vuosia 2015–2044 (vuoden 2030 ilmasto), 2035–2064 (vuoden 2050 ilmasto) ja 2065–2094 (vuoden 2080 ilmasto). Jokaisesta aikasarjasta on tehty kolme erilaista vaihtoehtoa kuvaamaan kasvihuonekaasuskenaarioita: RCP2.6, RCP4.5 ja RCP8.5. Kasvihuonekaasuskenaariot on nimetty sen mukaan, kuinka suuri säteilypakote vuosisadan loppuun mennessä tapahtuu ($2,6 \text{ W/m}^2$, $4,5 \text{ W/m}^2$ tai $8,5 \text{ W/m}^2$). Säteilypakote kuvaa saapuvan ja poistuvan säteilyn eroa ja positiivinen säteilypakote johtaa ilmaston lämpenemiseen ja negatiivinen viilenemiseen (IPCC 2021). Lämpenemisen lisäksi tulevaisuuden ilmaston säädatoissa sademäärät nousevat kohti vuosisadan loppua (Jylhä et al. 2020). Päästöskenaariot tarkoittavat lyhyesti seuraavaa (Jylhä et al. 2020):

- RCP2.6: Vähäinen ilmastomuutos.
- RCP4.5: Kohtalainen ilmastomuutos.
- RCP8.5: Hyvin voimakas ilmastomuutos.

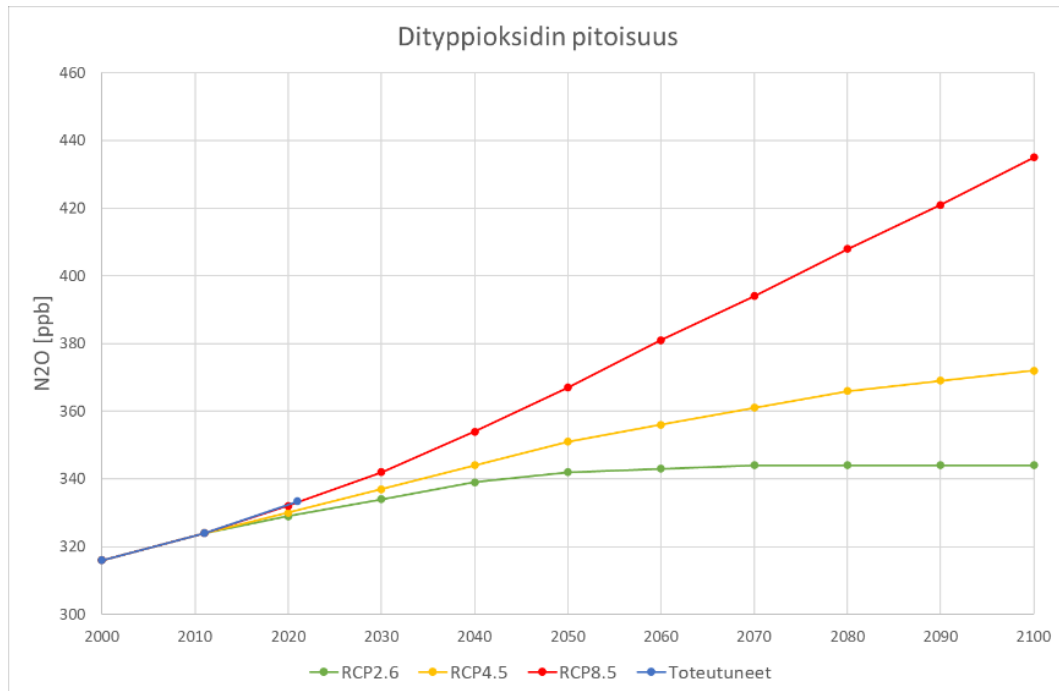
Kuvissa 3–5 on esitetty yleisimpien kasvihuonekaasujen, hiilidioksidin, metaanin ja di-typpioksidin pitoisuuksien muutoksia ilmakehässä toteutuneissa mittauksissa sekä kasvihuonekaasuskenaarioissa RCP2.6, RCP4.5 ja RCP8.5. Kuvista 3–5 havaitaan kasvihuonekaasujen olevan eri vaihtoehtoista lähimpänä RCP8.5-skenaarion käyrää vuoden 2021 mittaustuloksissa. Yleisesti on ajateltu RCP8.5 skenaarion olevan hyvin varmallalla puolen ajatellen kosteus- ja lämpötekniisiä simuloiteja. Ilmakehän kasvihuonekaasujen kuvaajien trendi kuitenkin viittaa siihen, että tämänhetkinen suunta kasvihuonekaasujen kohdalla painottuu kohti pessimistisiä skenaarioita RCP8.5.



Kuva 3. Hiilidioksidin pitoisuus ilmakehässä toteutuneilla mittauksilla sekä kolmen RCP-skenaarion mukaisesti. Toteutuneet vuodet esitetty vuoteen 2021 asti ja skenaariot vuodesta 2010 lähtien. (IPCC 2013; NOAA ESRL DATA 11.1.2022)



Kuva 4. Metaanin pitoisuus ilmakehässä toteutuneilla mittauksilla sekä kolmen RCP-skenaarion mukaisesti. Toteutuneet vuodet esitetty vuoteen 2021 asti ja skenaariot vuodesta 2010 lähtien. (IPCC 2013; NOAA ESRL DATA 11.1.2022)



Kuva 5. Dityppioksidin pitoisuus ilmakehässä toteutuneilla mittauksilla sekä kolmen RCP-skenaarion mukaisesti. Toteutuneet vuodet esitetty vuoteen 2021 asti ja skenaariot vuodesta 2010 lähtien. (IPCC 2013; NOAA ESRL DATA 11.1.2021)

5. SUOMALAINEN HOMEMALLI

VTT:n ja TTY:n yhdessä kehittämällä suomalaisella homemallilla voidaan tarkastella laskennallisesti homeiden kasvua erilaisten materiaalien pinnoilla. Homemalli on kehitetty VTT:llä alun perin kuusen ja männyn pinnalla kasvavan homeen laskentamalliksi (Hukka & Viitanen 1999). Myöhemmin homemallia laajennettiin VTT:n ja TTY:n yhteistyönä koskemaan myös muita rakennusmateriaaleja (Lähdesmäki et al. 2008; Viitanen et al. 2008). Homemallissa materiaalin homehtumista kuvaavana suurena käytetään homeindeksiä M. Homeindeksi voi saada arvoja väliltä 0–6. Homeindeksin arvojen kuvaukset on esitetty alla olevassa taulukossa 2 (RIL-255-2014).

Taulukko 2. Parannetun homemallin homeindeksin luokitusastot. (RIL-255-1-2014, s.60)

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	Yli 10 % peitto alasta (silmillä) Yli 50 % peitto alasta (mikroskoopilla)
5	Runsas silmin havaittava kasvu	Yli 50 % peitto alasta (silmillä)
6	Erittäin runsas kasvu	Lähes 100 % peitto, tiivis kasvusto

Suomalaisessa homemallissa tarkasteltavalle materiaalille määritetään homeen kasvunopeuden herkkyysluokka, homeen maksimimäärän herkkyysluokka ja homeen taantumaluokka (Suomalainen homemalli 2018). Materiaalit voivat kuulua kahteen eri homehtumisherkkyysluokkaan, jolloin homeen kasvunopeuden ja maksimimäärän luokkina käytetään eri kertoimia (Suomalainen homemalli 2018). Homeen kasvunopeudelle ja maksimimäärälle käytetään myös homemallissa eri kertoimia silloin, kun tarkasteltava piste on kahden materiaalin rajapinnalla ja tarkasteltavan materiaalin viereinen materiaali on homeen kasvun kannalta kriittisempi (esimerkiksi homehtumisherkkyysluokan HHL3 mineraalivillaeriste ja homehtumisherkkyysluokan HHL2 tai HHL1 tuulensuoja). Homemallin laskennan taustalla olevia kaavoja löytyy esimerkiksi alkuperäisestä homemallista koskevasta Hukan ja Viitanen (1999) tutkimuksesta.

Homehtumisherkkyyssluokat on tehty materiaaliryhmittäin ja täysin yksilöllisiä kertoimia ei ole millekään materiaalille saatavilla. Alla olevassa taulukossa 3 on esitetty rakennusmateriaalien jakautuminen eri homehtumisherkkyyssluokkiin. Kipsilevy on aikaisemmin määritetty homehtumisherkkyyssluokkaan HHL2, mutta Tuominen et al. (2019) ovat tutkimuksessaan todenneet kartonkipintaisen kipsilevyn kuuluvan homehtumisherkkyyssluokkaan HHL1 ja lasikuitupintaisen kipsilevyn homeen kasvunopeuden homehtumisherkkyyssluokkaan HHL2. Lasikuitupintaiselle kipsilevyille esitetään myös homehtumisherkkyyssluokkaa HHL3 (Suomalainen homemalli 2018).

Taulukko 3. Rakennusmateriaalien jakautuminen homehtumisherkkyyssluokkiin. (perustuu lähteisiin: Tuominen et al. 2019; RIL-255-2014; Suomalainen homemalli 2018)

Homehtumisherkkyyssluokka		Esimerkkejä rakennusmateriaaleista
HHL1	Hyvin herkkä	Karkeasahattu ja mitallistettu puutavara, höylätty mänty, koivuvaneri, käsittelemätön huokoinen puukuitulevy, kartonkipintainen kipsilevy
HHL2	Herkkä	Höylätty kuusi, paperipohjaiset bitumoidut/käsitellyt tuotteet ja kalvot, puupohjaiset liimatut levyt, havuvaneri, bitumoitu/käsitelty huokoinen kuitulevy, lasikuitupintainen kipsilevy
HHL3	Kohtalaisen herkkä	Mineraalivillat, muovipohjaiset materiaalit, kevytbetoni, kevytsorabetoni, karbonatisoitunut vanha betoni, sementtipohjaiset tuotteet, tiilet, kuitusementtilevy, lasikuitupintainen kipsilevy
HHL4	Kestävä	Lasi ja metallit, alkalinen uusi betoni, tehokkaita homesuojaaineita sisältävät materiaalit

Homeen taantumaluokka määritetään TTY-VTT:n Suomalaisessa homemallissa homehtumisherkkyyssluokan mukaan (RIL-255-2014). Alla olevassa taulukossa 4 on esitetty käytetyt homeen taantumaluokat.

Taulukko 4. Homeen taantumaluokat ja taantumakertoimet homehtumisherkkyyssluokissa (perustuu lähteisiin: RIL-255-2014; Suomalainen homemalli 2018)

Homehtumis-herkkyyssluokka	Homeen taantumaluokka	Kerroin laskennassa
HHL1	HTL2 Merkittävä taantuma	0,5
HHL2	HTL3 Kohtalainen taantuma	0,25
HHL3	HTL4 Vähäinen taantuma	0,1
HHL4	HTL4 Vähäinen taantuma	0,1

Taantumaluokkien käytössä on kuitenkin eroja, esimerkiksi Ojasen et al. (2011) tutkimuksessa esitetään hieman taulukoiden 3 ja 4 perusteella määritetyistä kertoimista poikkeavia arvoja. Ojasen et al. (2011) tutkimuksen perusteella lasivillalle sopivin taantumaluokka olisi HTL3 (kerroin 0,25). Vastaavaa taantumaluokkaa on käytetty VTT:llä kumulatiivisessa usean vuoden laskennassa esimerkiksi Niemisen et al. (2013) tutkimuksessa.

Homeindeksin maksimiarvoa yhdeltä vuodelta laskettuna on käytetty vertailusuurena rakenteiden homehtumisherkkyyden arvioinnissa. Homemallia ei ole testattu laajasti usean vuoden mittaisia aikasarjoja varten ja homeindeksin kumuloitumiseen liittyy useita epävarmuustekijöitä. Useamman vuoden kumulatiivisessa homeindeksin laskennassa epätarkkuus kasvaa johtuen toistuvista kasvun ja taantumien ajanjaksoista sekä niihin liittyvistä kertoimista ja epävarmuustekijöistä (Vinha 2013b). Homeindeksin sallittuna maksimiarvona uusille rakenteille on yleisesti käytetty arvoa 1 eli mitään kasvua ei sallita (RIL-255-2014). Tarkastelupisteet ovat yleisesti sijainneet kantavissa rakenteissa, lämmöneristyskerroksissa tai sen sisäpuolella sijaitsevissa materiaalikerroksissa.

Homeindeksin arvon käsittelyssä on kuitenkin eroavuuksia esimerkiksi Viitasen et al. (2015) tutkimuksessa esitettyihin näkemyksiin, joissa homeindeksin arvoja kuvataan liikennevalomallilla, jossa alle yhden arvot tarkoittavat vihreää, yli yhden ja alle kahden arvot keltaista, ja kahden tai sen yli olevat arvot punaista. Lisäksi tutkimuksessa esitetään raja-arvojen nostamista yhdellä rakennuksen ulko-osien materiaalien osalta. Viitasen et al. (2015) näkemysten perusteella sallittu raja-arvo esimerkiksi eristekerroksen homeindeksille olisi 2 ja tuulensuojalle 3. Viitasen et al. (2015) tutkimuksessa esittämä tapa homeindeksin liikennevalomallista voisi olla toimiva tapa esittää homeen kasvun riskiä varsinkin olemassa olevien vanhempien rakennusten osalta.

Homemalli ei ota kantaa eri homelajien esiintyvyyteen materiaalissa, joten sitä ei voi suoraan verrata materiaalinäytteiden mikrobianalyysin tuloksiin (RIL-255-1-2014). Rakennusmateriaalinäytteen yleisesti käytetyssä tulosten tulkinnassa suoraviljelyllä niukkaa tai kohtalaista mikrobikasvustoa ei pidetä viitteenä vaurioista, mikäli lajistossa ei ole kosteusvaurioindikaattoreita (Valvira 2016). Homeindeksin 1 mukainen kuvaus yksittäisistä mikroskoopilla havaituista pesäkkeistä voisi esimerkiksi vastata viitettä vauriosta, mikäli lajistossa olisi kosteusvaurioindikaattoreita.

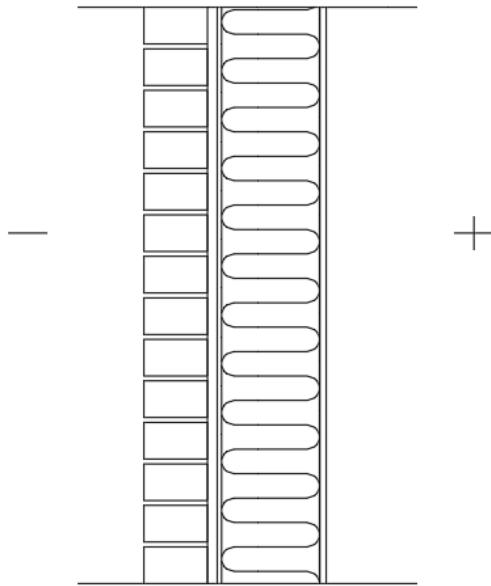
Tässä tutkimuksessa homeindeksin arvot on laskettu tasaantuneista olosuhteista jokaiselle vuodelle erikseen ja tarkastelupisteinä on käytetty pääosin lämmöneristyskerroksen ulkopintaa ja sen sisäpuolella olevia rakennekerroksia sekä puurunkoisissa rakenteissa puurungon ulko- ja sisäpintaa. Homeindeksin avulla on tässä tutkimuksessa arvioitu homeen kasvun riskiä, tulevaisuuden ilmaston vaikutusta sekä vertailtu eri rakenteita keskenään.

6. ULKOSEINÄRAKENTEIDEN LASKENTAMALLI

6.1 Ulkoseinärakenteiden simulointi WUFI-2D-ohjelmassa

Ulkoseinärakenteiden kosteus- ja lämpötekniinen tarkastelu suoritettiin käyttäen WUFI-2D-ohjelmaa. Yksinkertaisten 1D-rakenteiden simuloinnissa olisi voitu hyödyntää myös 1D-ohjelmaa (WUFI-pro), mutta tuloksista haluttiin keskenään mahdollisimman vertailukelpoiset, joten kaikki laskenta suoritettiin WUFI-2D-ohjelmalla. Käytetyt materiaalit valittiin WUFI-2D-ohjelman tietokannasta tai kirjallisuudesta löydetystä lähteistä. Materiaalien valinnasta ja niiden tehdyistä muokkauksista on kerrottu tarkemmin seuraavissa luvuissa. Tarkastellut materiaalit on esitetty taulukoituna liitteessä 1.

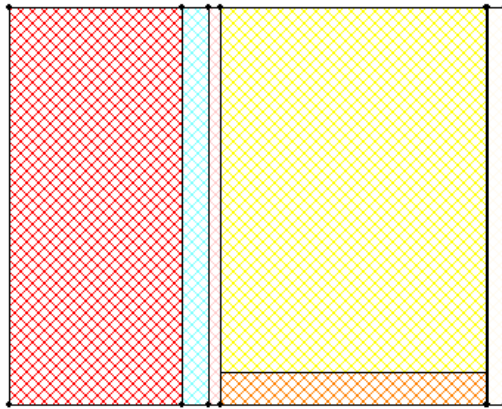
Ulkoseinärakenteiden laskentamalli pyrittiin muodostamaan mahdollisimman yksinkertaiseksi, jolloin laskenta-aika on myös mahdollisimman lyhyt. Laskentaverkko pidettiin pääosin 300 mm leveänä, jolloin 600 mm:n runkojaolla toteutettu seinärakenne saatiin muodostettua mahdollisimman yksinkertaisesti. Poikkeuksena 200 mm:n tuuletusurajalla tehdyt betonisandwich-rakenteet simuloitiin 100 mm leveän laskentaverkon avulla. Laskentaverkon pienimmät solut olivat materiaalikerrosten rajapinnassa aina noin 1 mm leveitä ja solujen kokoa kasvatettiin kohti materiaalien keskustaa sekä adiabaattisia pintoja. Ohuiden kalvojen, esimerkiksi maalien ja muiden pinnoitteiden sekä viereisten materiaalien solut tehtiin kuitenkin huomattavasti pienemmiksi, jotta ohuille 1 mm:n paksuisille kerroksille saatiin riittävästi soluja ja laskentatarkkuutta. Pienimmät laskentasolut ohuilla rakenteilla olivat luokkaa 0,06...0,1 mm. Materiaalien ominaisuuksina pysty- ja vaakasuunnassa käytettiin samoja arvoja. Erityisesti puulle olisi mahdollista käyttää pysty- ja vaakasuunnassa puulle ominaisia kosteudensiirtoarvoja syiden suuntaan sekä syitä vasten kohtisuoraan suuntaan, mutta kosteuden liike on pääosin syitä vasten, joten syysuunnan kosteudenliikkumisella ei ole laskennan kannalta suurta merkitystä. Kuvissa 6–11 on esitetty esimerkit 600 mm:n runkojaosta sekä 200 mm:n tuuletusurajaosta leikkauskuvana sekä WUFI-2D-ohjelman mallina.



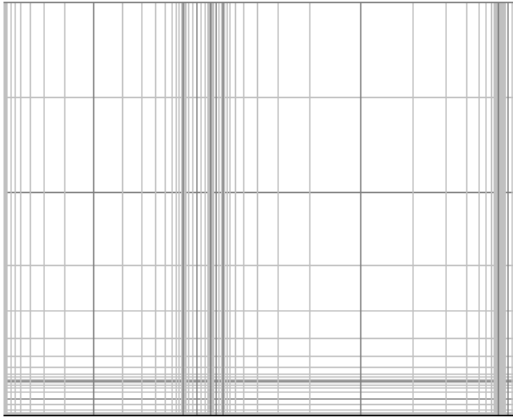
Puurunkoinen seinä tiilijulkisivulla

- Ulkokuori tiili 130 mm
- Tuuletusväli 20 mm
- Tuulensuojalevy 9 mm
- Mineraalivilla + puurunko 200 mm
- Höyrynsulkumuovi
- Sisäverhous kipsilevy 13 mm

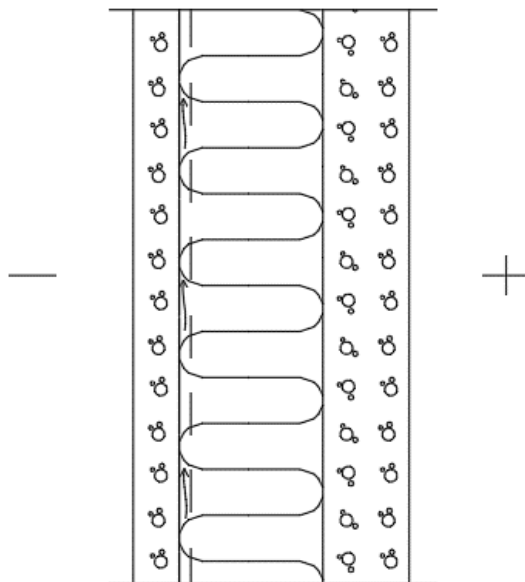
Kuva 6. Puurunkoisen tiilijulkisivuisen seinärakenteen leikkauspiirustus sivultapäin kuvattuna.



Kuva 7. Puurunkoisen (k600) tiilijulkisivuisen seinärakenteen leikkaus ylhäältäpäin mallinnettuna 300 mm leveänä rakenteena WUFI-2D-ohjelmassa. Mallin ala- ja yläpinta ovat adiabaattisia pintoja, mikä tarkoittaa, että malli peilautuu pinnan yli. Kuvan mallissa runkopuusta näkyy puolet, jolloin adiabaattisten pintojen avulla esitettynä runkopuut ovat 600 mm välein.



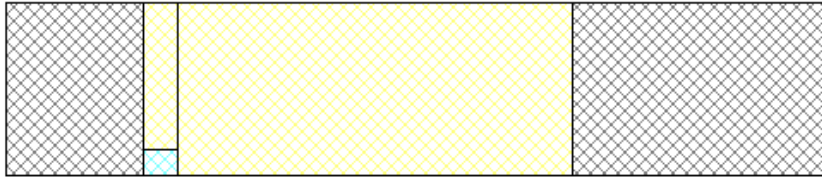
Kuva 8. Puurunkoisen (k600) tiilijulkisivuisen seinärakenteen laskentaverkon asettelu WUFI-2D-ohjelmassa.



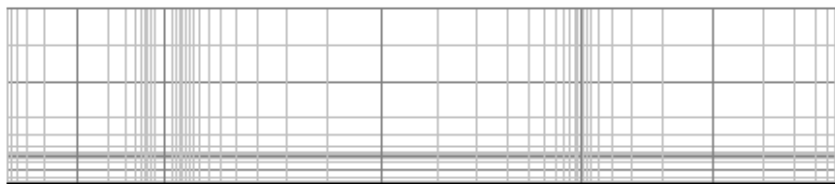
Betonisandwich-elementti
(kantava)

- Ulkokuori betoni 80 mm
- Mineraalivilla tuuletusurilla (20x30 k200) 250 mm
- Sisäkuori betoni 150 mm

Kuva 9. Tuuletusurallisen (k200) betonisandwich-elementin leikkauspiirustus sivul-
tapäin kuvattuna.



Kuva 10. Tuuletturallisen (k200) betonisandwich-elementin leikkaus ylhäältäpäin mallinnettuna 100 mm leveänä WUFI-2D-ohjelmassa. Mallin ala- ja yläpinta ovat adiabaattisia pintoja, mikä tarkoittaa, että mallissa 15 mm leveä tuuletusura peilautuu pinnan toiselle puolelle, jolloin tuloksena on 30 mm leveä ja 20 mm syvä ura 200 mm välein.



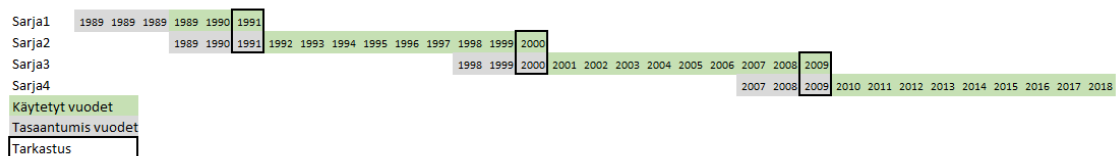
Kuva 11. Tuuletturallisen (k200) betonisandwich-elementin laskentaverkon asettelu WUFI-2D-ohjelmassa

6.2 Laskennan lähtötietoja WUFI-2D-ohjelmassa

Simuloitavien tarkasteluvuosien paikkakunnaksi valittiin aiemmin yleisesti käytettyihin rakennusfysikaalisiin testivuosiin pohjautuen Vantaa ja Jokioinen. Vantaan 2007 ilmasto on ollut testivuotena käytössä rakenteille, joiden sisäosan kosteustekniseen toimintaan sade vaikuttaa merkittävästi. Sateelta suojatuilla rakenteilla käytetty testivuosi on ollut nykyilmastossa Jokioisen 2004 ilmasto. Vantaan ilmastoa käytettiin etelään päin ja Jokioisen ilmasto pohjoiseen päin suuntautuvilla julkisivuilla. Kaikki tutkitut rakennemallit simuloitiin etelään päin Vantaan 30 vuoden aikasarjoilla. Jokioisen 30 vuoden aikasarjoja käytettiin ainoastaan tuulettuvalla puujulkisivulla pohjoiseen päin. On mahdollista, että 30 vuoden tarkastelujaksoissa kyseiset yhdistelmät eivät ole kaikista kriittisimpiä, mutta tämän tutkimuksen aikana kaikkien eri ilmasto- ja ilmansuuntien yhdistelmiä ei ole ajallisesti mahdollista käydä läpi. Nykyilmaston lisäksi tutkimuksessa simuloitiin pessimistisintä päästöskenaariota (RPC8.5 2080). Tuloksissa 2080 vuoden RCP8.5-skenaarion mukaan simuloituista vuosista puhutaan *Tulevaisuuden ilmastona* ja vuoden 1989–2018 säädatasta *Nykyilmastona*.

Tutkimuksessa hyödynnettiin kaikkia vuosia yhdistelemällä yksittäisten vuosien säädatiedostot ja simuloimalla pitkiä aikasarjoja. Lopputuloksena saatiin jokaiselle vuodelle tasaantuneet olosuhteet ja jokaisen vuoden lähtöarvojen suuruus riippui edellisistä toteutuneista vuosista. Poikkeuksena ensimmäinen tarkasteluvuosi 1989, jolle tasaantuneet olosuhteet on simuloitu käyttämällä vuotta 1989 kolme kertaa ennen käytettyä simulointivuotta. Kolmella tasaantumivuodella pyrittiin poistamaan materiaalikerroksille annettujen kosteuden ja lämpötilan lähtöarvojen vaikutus tuloksiin. Lähtöarvaus pyrittiin asettamaan mahdollisimman lähelle materiaalien tasaantuneita olosuhteita ja suuressa osassa tapauksia kahdella tai yhdellä tasaantumivuodella olisi päästy vastaaviin lukemiin.

WUFI-2D-ohjelmassa havaittujen rajoitusten vuoksi 30 vuoden aikasarja jaettiin neljään eri osaan. Tarkasteluvuosien yhdistelyllä pyrittiin saamaan realistisempi käsitys todellisesta tilanteesta verrattuna siihen, että yhtä rakenteille kriittistä vuotta käytetään usean kerran peräkkäin. Alla olevassa kuvassa 12 on havainnollistettu tarkasteluvuosien yhdistelyt neljäksi eri säätiedostoksi.



Kuva 12. Periaatekuva tarkasteluvuosien yhdistelystä. Vuoden 2080 30 vuoden aikasarja jaettiin vastaavasti neljään osaan, siten että aikasarjan ensimmäinen vuosi vastaa kuvassa vuotta 1989.

Viistosadekertoimet määritettiin WUFI-2D-ohjelmassa sisäänrakennetun työkalun kautta, jonka käyttämät kaavat ja kertoimet perustuvat ASHRAE 160 standardiin (ASHRAE 2009). WUFI-2D-ohjelmassa kaava on esitetty seuraavasti:

$$r_p = r_v \cdot FE \cdot FD \cdot 0,2s/m \cdot v_{tuuli} \quad (46)$$

missä

r_p on pystypinnalle tulevan sateen intensiteetti (mm/h)

r_v on vaakapinnalle tulevan sateen intensiteetti (mm/h)

FE on sateen altistumiskerroin (-)

FD on sateen kerrostumiskerroin (-)

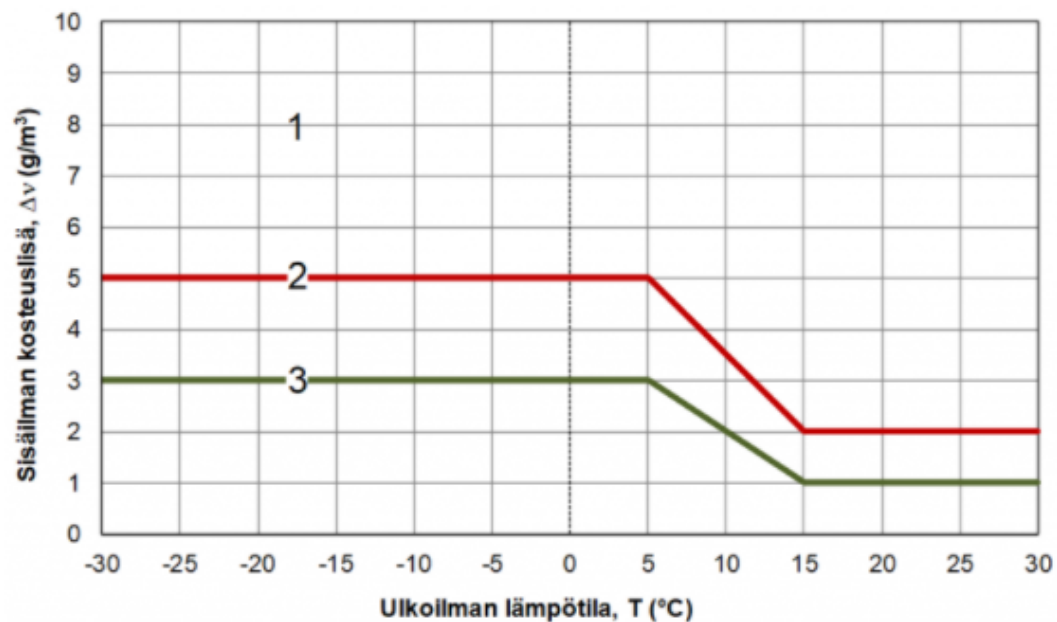
v_{tuuli} on tuulenoisuus (m/s)

Kokonaiskertoimiksi laskentaan valittiin kolme eri kerrointa, jotka kuvaavat eri kokoisia rakennuksia. Kaikki betonirunkoiset rakenteet simuloitiin korkeina kerrostaloina, puurunkoiset rakenteet pientaloina ja tiilirunkoiset rakenteet matalina kerrostaloina tai pientaloina. Kertoimet ja niitä vastaavat rakennuksien kuvaukset on esitetty alla olevassa taulukossa.

Taulukko 5. Käytetyt viistosadekertoimet ja rakennuksien kuvaukset

Rakennuksen kuvaus	Viistosadekerroin (FE·FD·0,2 s/m)
Pientalo	0,07
Matala kerrostalo	0,14
Korkea kerrostalo	0,3

Sisäilman lämpötilana käytettiin vakiona 21 °C. Sisäilman kosteuslisänä käytettiin RIL 107-2012 luokan 2 mukaista kosteuslisää. Luokkaan 2 kuuluvat asuinrakennukset (RIL 107-2012). Alla olevassa kuvassa 13 on esitetty RIL 107-2012 teoksessa esitetyt kosteuslisät.



Kuva 13. Sisäilman kosteuslisän mitoitusarvot eri sisäilman kosteusluokissa ulkolämpötilan funktiona (RIL 107-2012, s. 24).

Ulkopinnan kokonaislämmönsiirtokertoimena käytettiin WUFI-2D-ohjelman ulkopinnan oletusarvoa 17 W/ (m²·K). Laskentaan on otettu mukaan pitkäaaltoisen säteilyn vaikutus.

WUFI-2D-ohjelma vähentää käytetystä kokonaislämmönsiirtokertoimesta $6,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ja laskee pitkäaaltoisen säteilyn vaikutuksen annetusta tuntidatasta (kts. luku 3.1.2). Sisäpinnan lämmönsiirtokertoimena käytettiin myös WUFI-2D-ohjelman sisäpinnan oletusarvoa $8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Kokonaislämmönsiirtokertoimina käytetyt arvot ovat hieman varmallalla puolella verrattuna Suomessa yleisesti käytettyihin (SFS EN ISO 6946, 2017) arvoihin. Laskennassa ulkopinnalle tuleva arvo on pienempi ja sisäpinnalle suurempi, jolloin kosteusteknisesti kriittiset kohdat ovat hieman viileämmässä ja täten homeindeksi laskennankannalta varmallalla puolella. Simuloinnissa on mahdollista ottaa huomioon tuulen suunta ja nopeus pinnan lämmönsiirtokertoimien laskennassa (kts. luku 3.1.3). Tarkempi laskenta kuitenkin vie noin kolme kertaa enemmän aikaa kuin yksinkertaistettu, joten tässä työssä päädyttiin jättämään tuulen vaikutus lämmönsiirtokertoimiin huomioimatta. Testilaskennan perusteella vaikutus oli melko vähäinen ja yksinkertaistettu laskenta oli etelän puoleiselle julkisivuille varmallalla puolella.

Rakennusmateriaalien emissiviteetit ovat keskimäärin noin 0,9 suuruusluokkaa ja samaa arvoa WUFI-2D-ohjelma esittää oletuksena suurimmalle osalle materiaaleista. Tässä työssä päädyttiin käyttämään emissiviteetin arvoa 0,9 kaikilla tutkituilla ulkopinnan materiaaleilla. Ulkopintojen absorptiokertoimina käytettiin laskennassa taulukon 4 mukaisia arvoja. Absorptiokertoimet valittiin WUFI-2D-ohjelmassa esitettyjen arvojen lisäksi kirjallisuuden lähteistä (Björkholtz, 1997; Hagentoft, 2001; Hens, 2010; Viljanen, 1984).

Taulukko 6. Tutkimukseen valitut ulkopintojen absorptiokertoimet.

Materiaali ja väri	Absorptiokerroin (-)
Maali valkoinen	0,25 ⁽¹⁾
Maali vaaleat värit (esim. keltainen)	0,5 ^(2,4,5)
Maali punainen	0,7 ⁽¹⁾
Rappaus (vaalea ikääntynyt)	0,4 ⁽³⁾
Betoni värjäämätön	0,65 ⁽³⁾
Tiili punainen	0,67 ⁽³⁾

Lähteet: 1) Hagentoft 2001; 2) Björkholtz 1997; 3) WUFI; 4) Hens 2010; 5) Viljanen 1984

6.3 Tutkitut rakennekerrokset ja materiaalit

6.3.1 Betoni

Betoni on materiaalina haastava kosteus- ja lämpötekniisiä simuloiteja ajatellen. Betoneille löytyy hyvin vähän täysin valmiita materiaalipaketteja, joista löytyy kaikki WUFI-2D-ohjelmaan tarvittavat lähtötiedot. Eri betonilaatujen välillä suoritettiin herkkyystarkastelua, joiden perusteella työssä käytetyt betonit valittiin. Herkkyystarkastelussa oli mukana WUFI-2D-ohjelman Fraunhofer-IBP-tietokannan betonit sekä myös Delphin-laskentaohjelman tietokannasta tuotuja betonilaatuja. Alussa tutkittiin myös WUFI-2D-ohjelman LTH Lund University -tietokannan betonilaatuja, mutta niissä betonien lähtötiedot olivat kosteudensiirto-ominaisuuksien osalta puutteellisia. Delphin ohjelmasta tuodut betonit rajattiin pois hyvin nopeasti, sillä laskentaohjelmien keskinäiset erot ja materiaali-tiedostojen kääntäminen ohjelmasta toiseen aiheutti lisää epävarmuutta laskentaan. Betonit esitetään lähteissä esitettyjen tunnusten mukaan. Betonit on lähteissä nimetty joko lujuusluokan (esimerkiksi C35/45) tai vesi-sementtisuhteen (esimerkiksi $w/c=0,5$) mukaan. Betoneiden WUFI-tietokannalla viitataan tästä eteenpäin nimenomaan WUFI-2D-ohjelman Fraunhofer-IBP-tietokantaan.

Herkkyystarkasteluissa havaittiin betonin kapillaaristen ominaisuuksien olevan merkittävin yksittäinen tekijä laskentatulosten kannalta (kts. luku 7.2.1). WUFI-2D-ohjelmassa betonin huokosrakenteen toiminta ja kapillaarinen kosteudensiirtyminen riippuu ohjelmaan määritetyistä kosteusdiffusiviteeteistä. Useassa WUFI-ohjelmaa hyödyntäneessä tutkimuksessa (esimerkiksi Ormiskangas 2009; Vinha 2013a) on käytetty pohjana WUFI-tietokannan betonia nimeltä $w/c=0,5$. Tutkimuksissa on voitu muuttaa muun muassa betonin vesihöyrynvastusta (Vinha 2013a) tai kosteusdiffusiviteettien kuvaajia (Ormiskangas 2009).

WUFI-tietokannan betonin $w/c=0,5$ veden imeytymiskerroin ja kosteusdiffusiviteetit olivat pieniä ja kyseinen materiaali voisi hyvin vastata uutta halkeilematonta betonia. WUFI-tietokannassa on maininta, että betoni $w/c=0,5$ vastaisi karkeasti vesitiivistä betonia. Kirjallisuuden lähteissä (Hagentoft 2001; Nevander & Elmarsson 1994; RIL255-1-2014; Tuominen 2016) on havaittavissa, että betonin lujuuden heikentyessä ja vesi-sementtisuhteen kasvaessa kasvavat myös veden imeytymiskerroin ja kosteusdiffusiviteetit. Betonin $w/c=0,5$ kosteusdiffusiviteettien kuvaajien muoto ja suuruusluokka oli poikkeava muihin WUFI-tietokannasta löytyviin betoneihin (C12/15 ja C35/45) verrattuna. Betonin $w/c=0,5$ kosteusdiffusiviteettien kuvaajien maksimi-arvot saavutettiin matalissa kosteuspitoisuuksissa verrattuna muihin betoneihin, joissa kosteusdiffusiviteettien käyrien muoto

yrkentyi lähestyttäessä kapillaarista kyllästyskosteuspitoisuutta w_{cap} (kts. luku 7.2.1). WUFI-tietokannan betonien C12/15 ja C35/45 kanssa yhtäläisyyksiä löytyy Kunzel et al. (2008) tutkimuksessa käsitellyn betonin C20/25 kosteusdiffusiviteeteistä.

Julkaisussa *Rakennusfysiikka 1. Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset* on annettu betonille 2 eri kosteusdiffusiviteetin D_{ws} kuvaajaa (RIL 255-1-2014). Julkaisussa esitetty kosteusdiffusiviteetti D_{ws} betonille $w/c \leq 0,6$ on täysin vastaava kuin WUFI-tietokannan betonilla $w/c=0,5$ ja vastaavasti julkaisussa esitetty kosteusdiffusiviteetti betonille $w/c > 0,6$ on sama kuin WUFI-tietokannan betonilla C35/45.

WUFI-tietokannan betoneihin tehtiin muutoksia kirjallisuudesta löytyvien arvojen perusteella. Betonien kosteusdiffusiviteettien kuvaajia skaalattiin alas- tai ylöspäin riippuen materiaalin materiaalikirjaston lähtöarvoista. Taulukossa 7 on esitetty tutkittujen betonien kaavalla 43 lasketut veden imeytymiskertoimet A_w kapillaarisessa kyllästyskosteuspitoisuudessa w_{cap} . Taulukossa on myös esitetty betonien WUFI-tietokannassa annetut veden imeytymiskertoimet alkuperäisille betonimateriaaleille.

Taulukko 7. Tutkittujen betonilaatujen tunnuksia ja veden imeytymiskertoimia A_w ($kg/(m^2 \sqrt{s})$).

Tutkimuksessa käytetty betonin tunnus	B1	B2	B1a	B1b	B1c	B1d	B2a
Betonin tunnus WUFI-ohjelman Fraunhofer-IBP tietokannassa	C35/45	w/c= 0,5					
Betonin tunnus WUFI-ohjelman Fraunhofer-IBP tietokannassa, diffusiviteettien D_{ws} ja D_{wv} kuvaajia skaalattu			C35/45	C35/45	C35/45	C35/45	w/c= 0,5
WUFI-tietokannassa annettu A_w ($kg/m^2 \sqrt{s}$) arvo	0,009	0,003					
Kaavalla 43 käänteisesti laskettu A_w arvo diffusiviteetistä D_{ws} pisteessä w_{cap}	0,0413	0,00267	0,028	0,014	0,009	0,006	0,0053
Laskettu A_w arvo vastaisi Tuomisen (2016) opinäytetyössä määritettyä materiaalia	Kevytsojaraharkko (0,0481 ±0,0158)	Betoni C32/40 (0,0062 ±0,0045)	Pesubetoni (0,0080 ±0,0241)	Betoni C20/25 (0,0138 ±0,0016)	Betoni C32/40 (0,0062 ±0,0045)	Betoni C32/40 (0,0062 ±0,0045)	Betoni C32/40 (0,0062 ±0,0045)

Taulukosta 7 nähdään, että WUFI-tietokannan C35/45 betonille annettu veden imeytymiskerroin poikkeaa huomattavasti approksimaatiokaavalla 43 saadusta arvosta. WUFI-tietokannan betonille $w/c=0,5$ annettu ja laskettu arvo ovat puolestaan hyvin lähellä toisiaan. Taulukkoon 8 on koottu kirjallisuudesta betonin vesi-sementtisuhteeseen perustuvia veden imeytymiskertoimien arvoja.

Taulukko 8. *Betonin vesi-sementtisuhteen ja veden imeytymiskertoimien arvoja. (Hagentoft 2001; Nevander & Elmarsson 1994)*

Betonin vesi-sementtisuhte	0,3	0,5	0,7
Veden imeytymiskerroin A_w (kg/m ² √s) arvo	0,01	0,02	0,03

Taulukoista 7 ja 8 nähdään, että WUFI-tietokannan betonin $w/c=0,5$ veden imeytymiskerroin on huomattavasti kirjallisuudessa (Hagentoft 2001; Nevander & Elmarsson 1994) esitettyä vastaavan betonin arvoa pienempi. Betonin veden imeytymiskertoimista ja kosteusdiffusiviteeteistä on yleisesti havaittavissa, että tarkkojen lähtötietojen määrittäminen on haastavaa, mikä aiheuttaa laskennassa materiaaliominaisuuksista riippuvaa epävarmuutta. Erityisen tärkeää simulointien kannalta olisi tehdä pitkiä suhteellisen kosteuden ja lämpötilan olosuhdeseurantoja ulkoseinärakenteiden tarkastelupisteistä, jotta simulointimalli voitaisiin validoida mahdollisimman tarkasti. Avointa mittausdataa ulkoseinärakenteista on hyvin vähän saatavilla. Mittausdataa tutkimusrakenteista on esittänyt Pälve (2013) opinnäytetyössään, jossa mittausdataa on vertailtu myös Ormiskankaan (2009) tekemiin simulointeihin.

Betoniksi haluttiin materiaali, joka vastaisi ominaisuuksiltaan vanhempaa betonia. Vanhan betonin lujuusluokaksi voidaan arvioida $C20/25$ tai $C25/30$ (Lahdensivu 2012). Betonin valinnassa määräävät tekijät ovat kuitenkin sen kosteudensiirto-ominaisuudet ja vanhan betonin pohjaksi valittiinkin WUFI-2D-ohjelman tietokannan betoni $C35/45$, jonka kosteusdiffusiviteettejä skaalattiin asteittain pienemmäksi. Betoneja verrattiin keskenään herkkyytstarkastelujen tulosten, veden imeytymiskertoimien sekä diffusiviteettien kuvaajien perusteella. Tuloksia herkkyytstarkastelusta on esitetty luvussa 7.2.1.

Betonijulkisivujen variaatiot nimettiin WUFI-tietokannan ja Tuomisen (2016) opinnäytetyön perusteella kuvaamaan käytettyä betonia ja sen vedenimuominaisuuksia (kts. taulukko 7). Taulukossa 9 on esitetty tuloksissa käytetty nimi eri betonitunnuksille.

Taulukko 9. Betonien tunnuksat ja kuvaajissa käytetyt nimet.

Nimi kuvaajissa	Tunnus	Huomiot
C35 /45 (alkuperäinen)	B1	WUFI-ohjelman Fraunhofer materiaalikirjastosta
Pesubetoni $A_w = 0,028$	B1a	Muokattu alkuperäisen C35/45 pohjalle. Vastaa Tuomisen (2016) pesubetonin ylärajaa. Voisi esittää vanhaa halkeillutta betonia / pesubetonipintaista elementtiä.
C20/25 $A_w = 0,014$	B1b	Muokattu alkuperäisen C35/45 pohjalle. Vastaa Tuomisen (2016) C20/25 betonia. Voisi vastata vanhaa betonia.
C32/40 $A_w = 0,009$	B1c	Muokattu alkuperäisen C35/45 pohjalle. Vastaa Tuomisen (2016) C32/40 betonia.
C32/40 $A_w = 0,006$	B1d	Muokattu alkuperäisen C35/45 pohjalle. Vastaa Tuomisen (2016) C32/40 betonia.
$w/c = 0,5$ vesitiivis (alkuperäinen)	B2	WUFI-ohjelman Fraunhofer materiaalikirjastosta. Materiaalikirjastossa merkintä, että vastaa lähelle vesitiivistä betonia.
$w/c = 0,5$ vähemmän vesitiivis	B2a	Muokattu alkuperäisen $w/c=0,5$ pohjalle vähemmän vesitiiviiksi skaalaamalla kosteus diffusiviteettejä ylöspäin.

6.3.2 Tiili

Tiilen $T1$ materiaalina käytettiin WUFI-2D-ohjelman tietokannasta löytyvää materiaalitiedostoa, jossa on otettu huomioon myös laastisaumojen merkitys materiaaliominaisuuksiin. Sisäkuoren tiilille on käytetty pohjana samaa materiaalitiedostoa kuin ulkokuorelle, mutta tiedostosta on muokattu materiaalin kosteusdiffusiviteetin arvo D_{ws} samaksi kuin D_{ww} . Tiilen paksuutena käytettiin ulkokuorelle vakiona arvoa 130 mm ja sisäkuorilla paksuus vaihteli kantavan ja ei kantavan sisäkuoren välillä. Käytetty materiaali vastaa ominaisuuksiltaan poltettua täystiiltä (RIL-255 2014) ja on yleisesti käytetty materiaali tiilille WUFI-2D-ohjelman tehdyissä simuloinneissa. Tiilien perusominaisuuksissa ei ole suuria eroja uuden ja vanhan kirjallisuuden välillä (RIL-255-2014; Rakentajain kalenteri 1984; Rakentajain kalenteri 1970). Rakentajain kalenterin 1970 mukaan tiilille laskettu diffusiovastus on uudemmassa kirjallisuudessa annetun vaihteluvälin alapäässä (RIL-255-2014). Tiilien ominaisuuksien vaihteluväli on kirjallisuudessa kuitenkin suurta ja vaihteluvälin suuruus voi johtua vanhempien tiilien epätasalaatuisuudesta sekä täys- ja reikätiilien välisistä eroista. Poltettujen tiilien ominaisuuksien kehitys- ja yhtenäistämistyö alkoi massiivitiilirakentamisen aikakaudella, jonka aikana ja jälkeen annettujen määräysten myötä tiilien ominaisuuksien hajonta on pienentynyt (Räsänen 2022). Taulukkoon 10 on koottu tiilen ominaisuuksien vaihtelua eri aikakausien välillä.

Taulukko 10. Tiilen tiheyden, lämmönjohtavuuden, diffuusiovastuskertoimen ja veden imeytymiskertoimen arvoja. (RIL-255-2014; Rakentajain kalenteri 1984; Rakentajain kalenteri 1970)

	RIL-255-2014	Rakentajain kalenteri 1984	Rakentajain kalenteri 1970
Nimi	Poltettu tiili	Tiili	Tiili
Tiheys ρ [kg/m ³]	1000...2000	1200...1800	1300...1700
Lämmönjohtavuus λ [W/mK]	0,55...0,75	0,7 (täystiili) / 0,5...0,7 (reikätiili)	0,52...0,70
Diffuusiovastuskerroin μ [-]	4...13	(4,69...19,7)*	4,73*
Vedenimukerroin A_w [kg/(m ² ·s ^{1/2})]	0,1...0,4		

*laskettu käyttäen ilman vesihöyrynläpäisevyytenä arvoa $197 \cdot 10^{-12}$ kg/(m·s·Pa)

Tutkimuksessa käytetty tiili *T1* vastaa hyvin vielä 1980-luvun tiilen ominaisuuksia. Tiilen materiaaliominaisuuksille ei tehty tämän tutkimuksen yhteydessä tarkempaa herkkyystarkastelua. Tiilityyppien välinen tarkastelu vaatisi myös laastisaumojen mallinuksen, mikäli muille tiilityypeille ei lasketa vastaavaa yhdistettyä materiaalia tai niille ei löydy vastaavia materiaalipaketteja. Vanhemman poltetun tiilen ominaisuuksien vaihteluväliä voisi tutkia muuttamalla muun muassa tiilen *T1* tiheyttä, diffuusiovastuskerrointa ja diffusiviteettejä.

6.3.3 Puu

Puun materiaaleina käytettiin aikaisemmissa tutkimuksissa (Vinha et al. 2013a) käytettyä materiaalia männylle sekä WUFI-2D-ohjelman tietokannasta löytyvää kuusta. Puu on materiaalina haastava ja sen ominaisuuksiin liittyy myös epävarmuutta (Vinha 2007). Vinha (2007) esitti tutkimuksessaan, että laskentaohjelman käyttämä approksimaatiokaava 43 (kts. luku 3.3.2) ei ole täysin toimiva hygroskooppisten puumateriaalien kosteusdiffusiviteetin arvioinnissa.

WUFI-2D-ohjelman tietokannan kuusen materiaalissa *P2* on oletuksena otettu puun turpoaminen huomioon käyttämällä samoja arvoja molemmille WUFI-2D-ohjelman käyttämille kosteusdiffusiviteeteille. Männyn *P1* materiaaliomaisuudet ovat kokeellisesti määritettyjä Vinhan et al. (2005) tutkimuksessa ja sitä on käytetty muun muassa FRAME-hankkeen (Vinha et al. 2013a) puumateriaalina.

6.3.4 Rappaus

Rapattuja julkisivuja tutkittiin tässä tutkimuksessa ainoastaan yhdessä rakenteessa. Käytetty rappausjärjestelmä oli silikonihartsipinnoitteinen ohutrappaus ja rappausjärjestelmän eristeenä käytettiin kivivillaa.

Silikonihartsipinnoitteen ohutrappaus-eristejärjestelmän materiaaliominaisuuksina käytettiin FRAME-hankkeessa (Vinha et al. 2013) käytettyjä materiaalitietoja. Ohutrappauslaastin *O1* paksuus mallissa oli 6 mm, silikonihartsipohjamaalin *BM4* paksuus 0,2 mm ja silikonihartsipinnoitteen *BM3* paksuus 2 mm. Tarkemmat materiaalitiedot on esitetty liitteessä 1.

6.3.5 Eristeet

Vanhoissa omakotitaloissa eriste on voinut olla esimerkiksi 1950-luvulla suosiossa ollut sahanpurua tai sahanpurun ja kutterinlastun sekoitusta. Mineraalivillan lämmönjohtavuus on pienentynyt vuosikymmenien saatossa ja esimerkiksi 1970–1980 luvun kirjallisuudessa villalle on annettu lämmönjohtavuuden λ arvoja väliltä 0,04...0,06 W/(m·K) (Rakentajain kalenteri 1970; Suomen RakMK C4 1978)

Tässä tutkimuksessa eristeiksi valittiin kaksi eri mineraalivillaa sekä purun ja kutterinlastun yhdistelmä. Villana on käytetty WUFI-2D-ohjelman tietokannasta löytyvää mineraalivillaa *M1* sekä yleisesti tutkimuksissa käytössä ollutta Vinhan et al. (2005) tutkimuksessa määritettyä kivivillaa *M2*. Purueristeenä käytettiin aikaisemmissa tutkimuksissa TTY:llä määritettyä sahanpuru-kutterinlastu yhdistelmää *SPK1* (Vinha et al. 2005; Mäkitalo 2012).

WUFI-2D-ohjelman tietokannan mineraalivilla *M1* ($\lambda = 0,04$ W/(m·K)) vastasi lähimpänä vanhempaa korkeamman lämmönjohtavuuden mineraalivillaa, joten tätä käytettiin pääasiassa kuvaamaan vanhojen ulkoseinärakenteiden eristystä. Kivivillaa *M2* ($\lambda = 0,034$ W/(m·K)) käytettiin paksummilla eristepaksuuksilla kuvaamaan uudempaa eristettä.

6.3.6 Sisäkuoret yleisesti

Puurunkoisissa ulkoseinärakenteissa sisäverhouslevynä on voitu käyttää aikakaudesta riippuen esimerkiksi huokoista puukuitulevyä, lastulevyä tai kipsilevyä. Huokoisen puukuitulevyn käyttö yleistyi 1930-luvulla ja lastulevyjen käyttö 1950-luvulla, jolloin myös kipsilevy saapui Suomeen. (Rinne 2018)

Puurunkoisissa rakenteissa sisäpinnalla käytettiin yleisesti kipsilevyä *K1*, mutta vanhassa purueristetyssä rungossa myös puukuitulevyä *PK2*. Kipsilevynä käytettiin WUFI-2D-ohjelman tietokannasta löytyvää materiaalia ja puukuitulevyn materiaaliominaisuuksina käytettiin Vinhan et al. (2005) ja Mäkitalon (2012) tutkimuksissa esitettyjä arvoja. Höyrynsulkumuovina puurunkoisissa käytettiin WUFI-2D-ohjelman tietokannan höyrynsulkua *HS1* ($s_d = 50,0$ m).

Tiili- ja betonisisäkuorille käytettiin pohjana samoja materiaaleja kuin ulkokuorille. Sisäkuorien kosteusdiffusiviteetit muokattiin siten, että WUFI-2D-ohjelman käyttämät kosteusdiffusiviteetit D_{ws} ja D_{ww} olivat samat. Sisäkuorien molempina kosteusdiffusiviteetinä käytettiin D_{ww} arvoja. Tällöin sisäkuorien vedenimuominaisuudet eivät muuttuneet silloin, kuin rakenteen ulkopinnalle satoi vettä (kts. luku 3.3.2). 1960–1980-lukuja vastaavissa tiili-villa-tiili-rakenteissa sisäkuorien sisäpinnassa käytettiin ohutta tasoitekerrosta *TS1*.

6.3.7 Tuulensuojalevyt

Tuulensuojana käytettyjen materiaalin vaihtelu on ollut suurta ja toisiaan vastaavista rakenteista voi löytyä eroja esimerkiksi tuulensuojien kosteus- ja homesuojauksessa. Tuulensuojana on voitu käyttää esimerkiksi kovalevyä, huokoista puukuitulevyä tai kipsilevyä (Ympäristöministeriö 2018). Puukuitulevy on voinut olla esimerkiksi bitumilla kyllästettyä bituliittilevyä (Rinne 2018). Tuulensuojana käytetty kipsilevy on voinut olla esimerkiksi lasikuitupintaista ja kartonkipintaiseen kipsilevyyn verrattuna vähemmän homehtumisherkkää.

Tuulensuojalevyinä tässä tutkimuksessa käytettiin huokoista puukuitulevyä *PK1* (tunnetaan tuotenimellä Tuulileijona), tuulensuojakipsiä *K2* sekä tuulensuojamineraalivillalevyä *MV3* sekä tuulensuojakipsin ja mineraalivillan yhdistelmää. Tuulensuojalevyjen materiaaliominaisuudet on kerätty WUFI-2D-ohjelman tietokannasta sekä Vinhan et al. (2005) ja Mäkitalon (2012) tutkimuksista.

Tuulensuojalevyjen osalta tarkastelu painottui tuulensuojan homehtumisherkkyysluokan arviointiin ja sen merkitykseen tulosten kannalta. Tuloksissa on esitetty samalle materiaalille useita eri homehtumisherkkyysluokkia ja niiden vaikutusta tuloksiin. Esimerkiksi kipsilevyllä käytetty homehtumisherkkyysluokka voi vaihdella käytetystä kipsilevystä riippuen (kts. luku 5.) Tuulensuojana käytetyn materiaalin homehtumisherkkyysluokka vaikuttaa myös tuulensuojan viereisen materiaalin homeen kasvunopeuteen homemallissa (Suomalainen homemalli 2018).

6.3.8 Maalit

Aiemmissä tutkimuksissa WUFI-2D-ohjelmalla tehdyissä simuloinneissa maalien ja pinnoitteiden vaikutuksia on otettu vain harvoin huomioon. WUFI-2D-ohjelmassa ei ole maaleille valmiita materiaaliominaisuuksia ja ohjelma tarjoaa ainoastaan mahdollisuutta

muuttaa pinnan suhteellista diffuusiovastusta käytetylle maalille sopivaksi. WUFI-2D-ohjelma tarjoaa pinnan ominaisuuksien valikossa muutamia eri vaihtoehtoja maalien ja pinnoitteiden suhteelliselle diffuusiovastukselle. Pelkän suhteellisen diffuusiovastuksen muuttaminen ei kuitenkaan vaikuta kuin pelkästään diffuusiolla siirtyvään kosteuteen, jolloin esimerkiksi sadeveden imeytymistä rakenteeseen ei estetä. Tässä tutkimuksessa päädyttiin käyttämään maalille erillistä materiaalikerrosta, joka voidaan rakentaa aikaisemmin käytetyn materiaalin tai esimerkiksi materiaalikirjaston tasoitteen pohjalta. Materiaalille määritetään pinnoitteen suhteellista diffuusiovastusta vastaava diffuusiovastuskerroin ja kosteusdiffusiviteetit arvioidaan materiaalin veden imeytymisominaisuuksiin perustuen.

Betonipinnoilla tutkittiin kahden eri pinnoitevariaation vaikutusta lämmöneristeen ulkopinnan homeindeksin arvoon. Maalivariaatioiden pohjana käytettiin Mäkitalon (2012) työssään käyttämää silikonihartsimaalia. Maalien vesihöyrynvastusta ja diffusiviteettejä muutettiin kirjallisuudesta (Sandberg 2001; Pentti & Tuuliniemi 1989) löytyvien suhteellisen diffuusiovastuksen arvojen ja veden imeytymiskertoimien perusteella vastaamaan variaatioita, joista molemmat olivat vettä läpäisemättömiä, mutta toinen hyvin vesihöyryä läpäisevä ($s_d=0,06$) ja toinen puolestaan hyvin huonosti vesihöyryä läpäisevä ($s_d=1,0/2,0$). Hyvin vesihöyryä läpäisevälle maalille *BM2* käytettiin hieman suurempia veden imeytymiskertoimia kosteusdiffusiviteetin arvon arvioinnissa, kuin erittäin tiiville maalille *BM1*. Materiaalit tehtiin laskentamalliin 1 mm paksuisena kerroksena, jolloin suhteellinen diffuusiovastus s_d on helppo muuttaa materiaalin diffuusiovastuskertoimeksi μ luvun 3.3.1 mukaisesti.

Puumaaleille käytettiin myös samaa edellä mainittua materiaalipohjaa. Maalien diffuusiovastuskerrointa ja kosteusdiffusiviteettejä puolestaan muutettiin Kuusiston (2010) opinäytetyössä mitattuja arvoja vastaaviksi. Ensimmäinen puumaali vastasi lähelle työssä mitattuja keittomaalin arvoja, ja toinen puolestaan yleistä tasoa muista Kuusiston tutkimista pinnoitevaihtoehdoista. Taulukossa 11 on esitetty betoni- ja puumaalien materiaaliominaisuuksien pohjana käytettyjä suhteellisia diffuusiovastuksia ja veden imeytymiskertoimia. Maalien tarkemmat materiaaliominaisuudet on esitetty liitteessä 1.

Taulukko 11. Käytetyt arvot betonimaaleille BM1/BM2 ja puumaaleille PM1/PM2.

Maali	s_d -arvo	A_w (kg/m ² √s)	A_w (kg/m ² √h)
BM1 _{a/b}	1,0/2,0 ^(1;2)	0,00083	0,05 ^(1,2)
BM2	0,06 ^(1;2)	0,00167	0,1 ^(1,2)
PM1	0,01 ⁽³⁾	0,00283	0,17 ⁽³⁾
PM2	0,5 ⁽³⁾	0,001167	0,07 ⁽³⁾

Lähteet: 1) Sandberg 2001; 2) Pentti & Tuuliniemi 1989; 3) Kuusisto 2010.

Maaleja tutkittiin herkkyytarkastelussa myös vaihtoehtoisella tavalla asettamalla pinnan ominaisuuksista maaleille s_d -arvo ja arvioimalla WUFI-2D-ohjelmassa *Adhering-rain factor* arvoa pinnoitteella sopivaksi. *Adhering-rain factor* kuvaa WUFI-2D-ohjelmassa sitä sademäärää, joka sateesta jää rakenteen pinnalle ja näin ollen pystyy myös rakenteeseen imeytymään. Laskennassa havaittiin kuitenkin menetelmän sisältävän huomattavaa epävarmuutta johtuen muun muassa siitä, että saatavilla ei ollut vertailudataa oikeista rakenteista. Hyvä approksimaatio *Adhering-rain factor* arvoksi herkkyytarkastelun perusteella voisi olla noin 0,015...0,025 riippuen käytetystä pinnoitteesta. Edellä mainittua menetelmää on käyttänyt Finken et al. (2016) tutkiessaan tiilijulkisivujen impregnointia. Tutkimuksessa arvioitu pinnalle pääsevän sadeveden kerroin oli 0,01. Menetelmän kanssa havaittiin approksimaatioon perustuvan kertoimen arvioinnin lisäksi ongelmia myös rakenteen kuivumisprosessin simuloinnissa. Vastaavia havaintoja menetelmästä esitti myös Soulios et al. (2021).

6.3.9 Tuuletusvälit ja tuuletusurat

Tuuletusvälit ja tuuletusurat määritettiin WUFI-2D-ohjelmassa muodostamalla rakennemalliin erillinen ilmakerros, jolle määritettiin ilmanvaihtuvuus ilmanvaihtuvuutena tuntia kohden. Tiilipintaisia julkisivuja tutkittiin täysin tuulettumattomina tai tuulettuvina, joissa ilmaraon paksuutena käytettiin 20 mm. Ilmaraon paksuus 20 mm edustaa vanhoja rakenteita, joissa ohjeistuksena on ollut jättää ulkokuoren ja eristeen väliin 10...20 mm rako muuraustyön helpottamiseksi (Tiilirakenteet 1982). Ilmarako on kuitenkin usein vähintäänkin laastipurseiden osittain täyttämä ja ilmaraon ilmanvaihto on usein pieni (Muraatut rakenteet 1983).

Sandin (1991) tekemissä laajoissa mittauksissa tiilijulkisivujen ilmanvaihtuvuuksille tyypilliset arvot vaihtelivat 0,3...8 1/h välillä (katso Burnett & Straube 1995). Parkkinen (2020) on diplomityössään määrittänyt tiilijulkisivuille laskennallisesti arvoja, jotka ovat

etelän puoleisen seinän laastipurseiden täyttämän tuuletusvälin osalta samaa suuruusluokkaa edellä mainittujen mitattujen arvojen kanssa. Avoimelle 20 mm tuuletusvälillä Parkkinen (2020) sai laskennallisesti arvoja väliltä 21,3...52,4 1/h. Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuudeksi valittiin kaksi tapausta. Avoimen tuuletusvälin ilmanvaihtuvuutena käytettiin arvoa 20 1/h ja laastipurseiden täyttämän tuuletusvälin ilmanvaihtuvuutena arvoa 2 1/h. Valitut arvot vastaavat lähelle Parkkinen (2020) työssä laskettuja kaksikerroksisen tiilirakennuksen etelä julkisivun arvoja. Tässä työssä ei muutettu tuuletusvälin ilmanvaihtuvuutta eri kokoisten rakennusten välillä.

Betonisandwich-rakenteita tutkittiin ilman tuuletusuria sekä tuuletusurien kanssa. Tuuletusurien virtausnopeuksia arvioitiin Salonvaaran ja Niemisen (2003) tutkimuksista saattujen tulosten avulla. Tutkimuksessa betonisandwich-rakenteiden tuuletusurien virtausnopeudet olivat luokkaa 0,050–0,1 m/s. Tässä työssä suurimpana virtausnopeutena käytettiin arvoa 0,05 m/s ja vertailuna pienempää kosteusteknisesti mitoittavampaa arvoa 0,01 m/s. Tuuletusurat on ajateltu yhden elementin korkuisiksi ja tuuletusurien ilmanvaihtuvuuksina WUFI-2D-ohjelmassa käytettiin arvoja 60 1/h ja 12 1/h. Tuuletusurien ilmanvaihtuvuudet saadaan laskettua virtausnopeuksista seuraavalla kaavalla:

$$\frac{Q}{V} = \frac{u \times A}{H \times A} = \frac{u}{H} = n_{ACH} \quad (47)$$

missä

Q	on tilavuusvirta (m^3/s)
V	on tilavuus (m^3)
u	on virtausnopeus (m/s)
H	on korkeus (m)
A	on tuuletusuran poikkipinta-ala (m^2)
n_{ACH}	on ilmanvaihtuvuus (1/h)

Tuulettuvien puujulkisivujen tuuletusvälin paksuutena käytettiin 20 mm. Tuuletusvälin ilmanvaihtuvuutta arvioitiin Mäkitalon (2012) työssä esitettyjen, muun muassa Vinhan et al. (2007) tutkimuksen yhteydessä mitattujen tulosten pohjalta. Eteläseinän ilmanvaihtuvuudeksi valittiin 250 1/h ja pohjoisseinälle 100 1/h.

6.3.10 Kosteuslähde ja ilmavuodot

Todellisessa rakenteessa julkisivussa voi esiintyä kohtia, joista kosteus voi muun muassa viistosateen ja veden valumisen seurauksena päästä eristekerrokseen. Näitä kohtia voivat olla esimerkiksi halkeamat ja epätiivit rakenneliittymät. Ylimääräisen kosteuslähteen vaikutusta testattiin tässä työssä ainoastaan ohutrappaus-eristejärjestelmällä, jossa rappauksen sisäpintaan muodostettiin kosteuslähde, johon prosentti pinnalle tulleesta sadevedestä pääsi suoraan kulkeutumaan. Uusimmassa ASHRAE 160 standardissa suositellaan yhden prosentin kosteuslähdettä käytettäväksi kaikille julkisivuille oletusarvona, mikäli tarkempaa tietoa ei ole saatavilla (ASHRAE 160 2021). Kosteuslähde voidaan ajatella olevan varmalla puolella, sillä jos kyseessä olisi halkeama, voisi kosteus liikkua kyseisestä paikasta myös otollisissa olosuhteissa pois rakenteesta. Tässä tapauksessa rakenteen pinta oli ehjä, joten kuivuminen ulospäin kosteuslähteestä oli hitaampaa. Toisaalta kosteuslähde voisi olla seurausta rakenneliittymän kautta kulkeutuvasta alaspäin valuvasta vedestä, jolloin tilanne voisi olla realistisempi.

Ilmavuodot erityisesti kevyissä puurakenteissa voivat kuljettaa rakenteisiin huomattavasti kosteutta. Erityisesti höyrynsulun puutteellinen asennus tai muu vaurioituminen voi aiheuttaa rakenteeseen pistemäisiä kanavia, joista sisäilman kosteus voi konvektiolla siirtyä rakenteeseen, varsinkin sisäpuoleltaan ylipaineisissa rakennuksissa. Ilman siirtyminen ei ole automaattisesti mukana WUFI-2D-ohjelmassa ja tarkka laskenta vaatisi virtauslaskentaohjelman käyttöä. WUFI-2D-ohjelmaan soveltuvia keinoja ilman siirtymisen huomioon ottamiseksi on esitetty lähteissä Karagiozis ja Kuenzel (2009) sekä Künzel et al. (2012). Ilmavuodon sisäilmasta eristetilaan päin voi ottaa huomioon tekemällä eristetilaan erillisen kerroksen ilmanvaihtuvuudelle samaan tapaan kuin tuuletusvälille ja määrittämällä kerroksen olevan yhteydessä sisäilmaan. Menetelmässä täytyisi kuitenkin tietää rakennuksen lämpötilaeroista ja ilmanvaihdosta aiheutuva paine-ero ulkovaipan yli, jotta ilmanvaihtuvuutta sisäilman ja eristekerroksen välillä olisi mahdollista määrittää. Toinen tapa on mallintaa ilmavuoto kosteuslähteenä, mutta sitäkin varten on tiedettävä arvioitu paine-ero ulkovaipan yli sekä rakennuksen ilmavuoto-luku. Kosteuslähdettä käytettäessä sisältä tulevan ilmavuodon arvioimiseksi WUFI-2D-ohjelmaan on myös muodostettava erillinen tiedosto kosteuslähdettä varten, josta ohjelma lukee kosteuslähteen intensiteetin. (Karagiozis & Kuenzel 2009; Künzel 2012)

6.4 Tarkastellut rakennetyypit

Seuraavissa luvuissa on esitetty lyhyesti edellisissä luvuissa esitettyjen rakennekerrosten ja materiaalien yhdistelyt rakennetyypeiksi. Rakennetyypit on jaettu lukuihin julkisiumateriaalien perusteella.

6.4.1 Tiilijulkisivut

Tili-villa-tiili ulkoseinien variaatioissa on tutkittu eri eristepaksuuksia kuvaamaan tyypillisiä eristepaksuuksia 1960–1980-lukujen tiili-villa-tiili-rakenteissa. Tutkitut eristepaksuudet olivat 60, 80 ja 100 mm. Sisäkuoret variaatioissa olivat kantavia ja ei-kantavia. Vertailuna tiili-villa-tiili-rakenteeseen tehtiin myös laskelmat 250 mm:n eristepaksuudella, sillä pienten eristepaksuuksien muutoksilla ei laskennan edetessä havaittu olevan suurta eroa tulosten kannalta. Tiili-villa-betonirakenteissa tutkitut eristepaksuudet olivat 60 ja 100 mm. Tiilimuuratulle puurunkoiselle seinälle eristepaksuudet olivat 100 ja 200 mm, minkä lisäksi variaationa oli tuulensuojakipsin ulkopuolinen tuulensuojavilla. Tuuletusvälejä tarkasteltiin luvun 6.3.9 mukaan tuulettumattomina tai tuulettuvina. Kerrostalojen variaatiot perustuivat Neuvosen (2006) esittämiin rakenteisiin 1960–1980 lukujen kerrostaloista ja puurunkoisien pientalon ulkoseinän perustapaus perustui Hyttisen (1976) julkaisussa esittämiin omakotitalon rakenteisiin.

Viistosadekertoimina tiilirunkoisille ulkoseinärakenteille käytettiin matalien kerrostalojen sekä pientalojen kertoimia (kts. luku 6.2). Betonirunkoisia tutkittiin matalina kerrostaloina ja puurunkoisia puolestaan pientaloina. Tuloksissa on yhdistetty rakenteet, joissa pienet muutokset sisäkuorissa ja eristepaksuuksissa eivät muuttaneet tuloksia huomattavasti. Yhdistelyt ja kuvaajissa käytetyt nimet tiilijulkisivujen rakenteista on esitetty taulukossa 12.

Taulukko 12. Tiilijulkisivujen yhdistelyt ja nimet tulosten kuvaajissa.

Nimi kuvaajissa	Tunnus	Rakenteet ulkoa sisälle päin (kerrospaksuudet millimetreinä)						
		Tiili T1_ulko	Villa MV 1	Tiili T1_sisä	Sisäpinta TS1			
Tiili-villa-tiili 1960-1980, matalakerrostalo tai pientalo tuulettumaton	TVT1	130	60	270	10			
	TVT2	130	60	130	10			
	TVT3	130	80	270	10			
	TVT5	130	100	270	10			
Tiili-villa-tiili 1960-1980, matalakerrostalo tai pientalo tuuletusvälissä laastipurseita	TVT7	130	Ilmaväli 2 1/h 20	Villa MV 1 60	Tiili T1_sisä 270	Sisäpinta TS1 10		
	TVT8	130	Ilmaväli 2 1/h 20	Villa MV 1 100	Tiili T1_sisä 270	Sisäpinta TS1 10		
Tiili-villa-tiili 1960-1980, matalakerrostalo tai pientalo, tuuletusväli avoin	TVT9	130	Ilmaväli 20 1/h 20	Villa MV 1 100	Tiili T1_sisä 270	Sisäpinta TS1 10		
Tiili-villa-betoni 1960-1980, matalakerrostalo tuulettumaton	TVB1	130	Villa MV 1 60	Betoni B1a_sisä 150				
	TVB2	130	Villa MV 1 100	Betoni B1a_sisä 150				
	TVB3	130	Villa MV 1 60	Betoni B1a_sisä 80				
Tiili-villa-betoni 1960-1980, matalakerrostalo tuuletusvälissä laastipurseita	TVB5	130	Ilmaväli 2 1/h 20	Villa MV 1 60	Betoni B1a_sisä 150			
Tiili-villa-betoni 1960-1980, matalakerrostalo tuuletusväli avoin	TVB6	130	Ilmaväli 20 1/h 20	Villa MV 1 60	Betoni B1a_sisä 150			
Tiilimuurattu puurunkoinen pientalo, tuuletusvälissä laastipurseita eriste paksuus 100 mm + tuulensuojakipsi	TVR1	130	Ilmaväli 2 1/h 20	Tuulensuojakipsi K2 9	Villa MV 1 + Puurunko P1 100	Hörynsulku H1 1	Kipsilevy K1 12	
Tiilimuurattu puurunkoinen pientalo, tuuletusväli avoin, eriste paksuus 100 mm + tuulensuojakipsi	TVR2	130	Ilmaväli 20 1/h 20	Tuulensuojakipsi K2 9	Villa MV 1 + Puurunko P1 100	Hörynsulku H1 1	Kipsilevy K1 12	
Tiilimuurattu puurunkoinen pientalo, tuuletusväli avoin, eriste paksuus 200 mm + tuulensuojakipsi	TVR3	130	Ilmaväli 20 1/h 20	Tuulensuojakipsi K2 9	Villa MV 1 + Puurunko P1 200	Hörynsulku H1 1	Kipsilevy K1 12	
Tiilimuurattu puurunkoinen pientalo, tuuletusväli avoin, eriste paksuus 200 mm + tuulensuojakipsi + tuulensuojavilla 30mm	TVR4	130	Ilmaväli 20 1/h 20	Tuulensuojavilla MV 3 30	Tuulensuojakipsi K2 9	Villa MV 1 + Puurunko P1 200	Hörynsulku H1 1	Kipsilevy K1 12
Tiilimuurattu puurunkoinen pientalo, tuuletusvälissä laastipurseita, eriste paksuus 200 mm + tuulensuojakipsi + tuulensuojavilla 30mm	TVR5	130	Ilmaväli 2 1/h 20	Tuulensuojavilla MV 3 30	Tuulensuojakipsi K2 9	Villa MV 1 + Puurunko P1 200	Hörynsulku H1 1	Kipsilevy K1 12
Tiili-villa-tiili, eriste paksuus 250 mm, matala kerrostalo, ei tuuletusväliä	TVT250a	130	Villa MV 2 250	Tiili T1_sisä 270				
Tiili-villa-tiili, eriste paksuus 250 mm, matala kerrostalo, tuuletusvälissä laastipurseita	TVT250b	130	Ilmaväli 2 1/h 20	Villa MV 2 250	Tiili T1_sisä 270			
Tiili-villa-tiili, eriste paksuus 250 mm, matala kerrostalo, tuuletusväli avoin	TVT250c	130	Ilmaväli 20 1/h 20	Villa MV 2 250	Tiili T1_sisä 270			

6.4.2 Betonijulkisivut

Betonisandwich-rakenteiden eriste paksuutena perustapauksessa käytettiin 1970-luvulle tyypillistä 90 mm:n eriste paksuutta. Vertailuna laskelmia tehtiin myös 250 mm:n eriste paksuudella, koska jokaisen vuosikymmenen eriste paksuuden vaihtelua ei tämän tutkimuksen puitteissa ollut mahdollista ottaa huomioon. Paksummalla eriste paksuudella käytettiin myös pienemmän lämmönjohtavuuden mineraalivillaa *M2* kuvaamaan uudemmaa lämmöneristettä. Ohutrappaus-eristejärjestelmä betonisisäkuorella tutkittiin 200 mm:n eriste paksuudella. Betonijulkisivurakenteet simuloitiin suurimmalla, korkeata kerrostaloa vastaavalla viistosaderasituksella. Tuuletusuria ja maalipintojen vaikutuksia tutkittiin yhdellä betonivariaatiolla eriste paksuudella 250 mm. Betonisandwich-rakenteiden tuuletusurien ja maalipintojen tarkasteluun valittiin betoni *B1a*, joka oli varmallalla puolella betonien keskinäisessä vertailussa (kts. luku 7.2.1).

Betonijulkisivujen tarkastelut painottuivat betonin materiaaliominaisuuksien valintaan. Betonit nimettiin betonityypeittäin vedenimuominaisuuksiin perustuen (kts. luku 6.3.1).

Betonijulkisivuille tehdyt tarkastelut ja tuloksissa käytetyt nimet on esitetty alla olevassa taulukossa 13.

Taulukko 13. Betonirakenteisten julkisivujen ja ohutrappaus-eristejärjestelmien yhdistelmät.

	Nimi kuvaajissa	Tunnus	Rakenteet ulkoa sisälle päin (kerros paksuudet millimetreinä)				
Betonit, 90 mm eristepaksuus	C35 (alkuperäinen)	BVB1	Betoni B1_ulko	Villa MV1	Betoni B1_sisä		
	Pesubetoni Aw = 0,028	BVB1a	Betoni B1a_ulko	Villa MV1	Betoni B1a_sisä		
		BVB1b	Betoni B1b_ulko	Villa MV1	Betoni B1b_sisä		
	C20/25 Aw = 0,014	BVB1c	Betoni B1c_ulko	Villa MV1	Betoni B1c_sisä		
	C32/40 Aw = 0,009	BVB1d	Betoni B1d_ulko	Villa MV1	Betoni B1d_sisä		
	C32/40 Aw = 0,006	BVB2	Betoni B2_ulko	Villa MV1	Betoni B2_sisä		
	w/c = 0,5 vesitiivis (alkuperäinen) w/c = 0,5 vesitiivis, muokattu vähemmän vesitiiviiksi	BVB2a	Betoni B2a_ulko	Villa MV1	Betoni B2a_sisä		
Betonit 250 mm eristepaksuus	Pesubetoni Aw = 0,028	BVB250a	Betoni B1a_ulko	Villa MV2	Betoni B1a_sisä		
	C20/25 Aw = 0,014	BVB250b	Betoni B1b_ulko	Villa MV2	Betoni B1b_sisä		
	C32/40 Aw = 0,009	BVB250c	Betoni B1c_ulko	Villa MV2	Betoni B1c_sisä		
	C32/40 Aw = 0,006	BVB250d	Betoni B1d_ulko	Villa MV2	Betoni B1d_sisä		
	w/c = 0,5 vesitiivis (alkuperäinen)	BVB250_2	Betoni B2a_ulko	Villa MV2	Betoni B2a_sisä		
	Betonimaalit 250mm eristepaksuus	Erittäin vesitiivis pinnoite (sd = 2)	mBVB250_1a	BM1a (valkoinen 0.25)	Betoni B1a_ulko	Villa MV2	Betoni B1a_sisä
Erittäin vesitiivis pinnoite (sd = 1)		mBVB250_1b	BM1b (valkoinen 0.25)	Betoni B1a_ulko	Villa MV2	Betoni B1a_sisä	
		mBVB250_2	BM2 (valkoinen 0.25)	Betoni B1a_ulko	Villa MV2	Betoni B1a_sisä	
Tiivis vesihöyryä läpäisevä pinnoite (sd = 0,06)							
Tuuletusurat	Pesubetoni Aw = 0,028, Tuuletusura 60 1/h	BVB250tuuletus1	Betoni B1a_ulko	Tuuletusura 60 1/h	Villa MV2	Betoni B1a_sisä	
	Pesubetoni Aw = 0,028, Tuuletusura 12 1/h	BVB250tuuletus2	Betoni B1a_ulko	Tuuletusura 12 1/h	Villa MV2	Betoni B1a_sisä	
Ohutrappaus	Ohutrappaus silikonihartsipinnoite	RVB1	Silikonihartsipinnoite BM3 (vaalea 0.4)	Silikonihartsimaali BM4	Ohutrappaus O1	Kivivilla MV2	Betoni B1a_sisä
	Ohutrappaus silikonihartsipinnoite, 1% kosteusisä ohutrappauksen sisäpinnassa	RVB2	Silikonihartsipinnoite BM3 (vaalea 0.4)	Silikonihartsimaali BM4	Ohutrappaus O1 + 1%	Kivivilla MV2	Betoni B1a_sisä

6.4.3 Puujulkisivut

Mallitalo 1950-luvulta perustui Jokamiehen rakentaja oppaaseen vuodelta 1957 (Mandelin et al. 1957). Eristekerroksen ulkopinnassa on usein käytetty vettä hylkivää materiaalia. Materiaalina on voinut olla paperia, kreppiä, pahvia tai vuota ja niiden kyllästeenä on voitu käyttää puutervaa, kivihiilitervaa, bitumia tai asfalttia ja tuloksena on voinut olla mikä vain edellä mainittujen yhdistelmistä (Rinne 2018). Tarkempien lähtötietojen puuttuessa materiaalina käytettiin bitumivuoraushuopaa. Vanhojen omakotitalojen rakenteissa on huomattavaa vaihtelua ja pelkästään yhdellä mallitapauksella ei voida tutkia kaikkia rakenteisiin vaikuttavia variaatioita. Eristekerroksen ulkopinnan materiaalien vaihteluiden lisäksi myös lämmöneristeen sisäpuolella on käytetty erilaisia rakenneratkaisuja ja myös eristetilan sisäpuoli on voinut olla myös vuorattu esimerkiksi pahvilla tai paperilla (Ympäristöministeriö 2018). Tarkastellussa tapauksessa rakenteen eristekerroksen sisäpintaan sijoitettiin myös bitumivuoraushuopa estämään sisäpuolelta tulevan

kosteuden vaikutusta. Rakennetta kutsutaan tuloksissa nimellä puutalo-1950 ja variaatioina käsitellään ilmastonmuutoksen lisäksi maalipintojen vaikutuksia homeindeksin arvoon.

Mallitalo 1980-luvulta perustui Ympäristöministeriön (2018) energiatodistusoppaan tyyppitaloon. Tuulettuvalle lautaverhoillulle puurunkoiselle rakenteelle on aikaisemmissa tutkimuksissa todettu mitoittavaksi tapaukseksi pohjoisen julkisivu (Vinha 2013a). Tässä tutkimuksessa 1980-luvun puurakenne simuloitiin myös käyttäen pohjoispuolen seinää ja Jokioisen ilmastodatoja. Taulukossa 14 on esitetty tutkitut tapaukset puujulkisivuista.

Taulukko 14. Tutkitut tapaukset puujulkisivuista.

		Nimi kuvaajissa	Rakenteet ulkoa sisälle päin (kerros paksuudet millimetreinä)							
Puu	1950	Punainen hyvin vesihöyryä ja osittain vettä läpäisevä maali	Maali PM1 (punainen 0,7)	Julkisivu P2	Vuoraushuopa BVH1	Puukuitulevy PK2	Eriste SPK1 + runko P1	Bitumi/terva-paperi/huopa BVH1	Vinolaudoitus P1	Sisälevy PK2
			1	16	1	12	100	1	22	12
	1980	Punainen tiivis vesihöyryä heikosti läpäisevä maali (sd = 0,5)	Maali PM2 (punainen 0,7)	Julkisivu P2	Vuoraushuopa BVH1	Puukuitulevy PK2	Eriste SPK1 + runko P1	Bitumi/terva -paperi/huopa BVH1	Vinolaudoitus P1	Sisälevy PK2
			1	16	1	12	100	1	22	12
	Mallitalo 1980	Maali PM2 (valkoinen 0,25)	Julkisivu P2	Tuuletusväli 100 1/h (pohjoinen) ja 250 1/h (etelä)	Tuulileijona PK1	Eriste M1 + runko P1	Höyrynsulku (sd = 50) HS1	Kipsilevy K1		
			1	19	20	12	200	1	12	

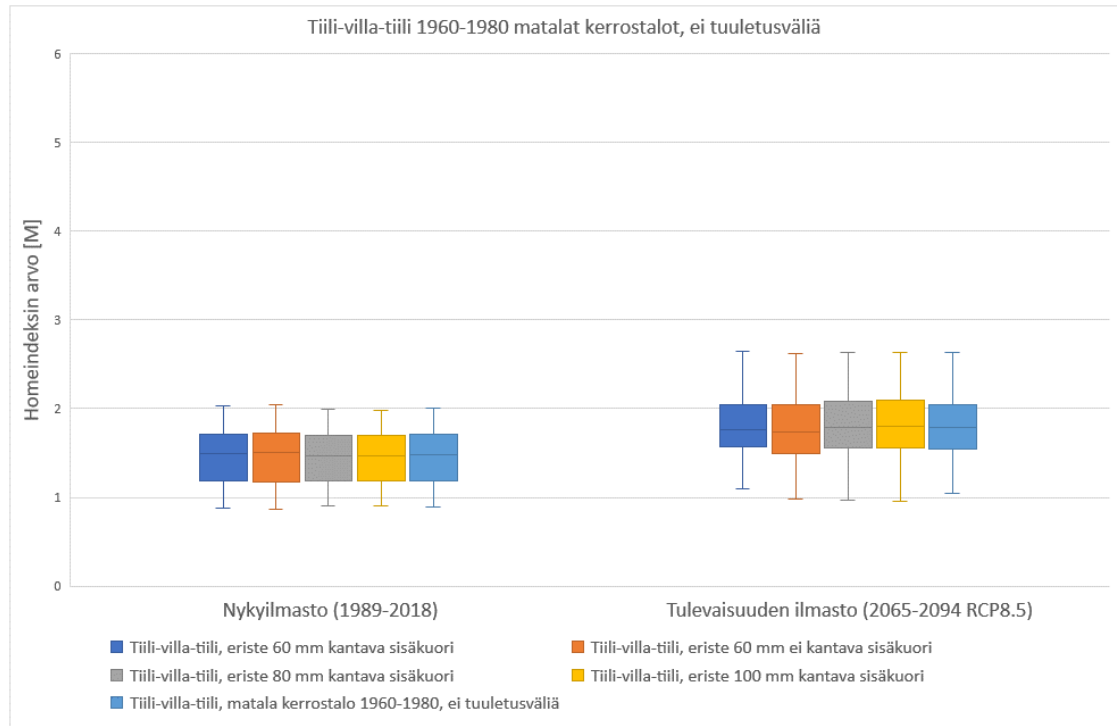
7. LASKENTATULOSTEN TARKASTELU

Tulokset on esitetty laatikko-janakuvaajina, joissa laatikot sisältävät puolet tapauksista ja arvojen mediaani on merkitty janan poikki kulkevalla viivalla. Janan päätepisteet esittävän ääriarvoja, joiden ulkopuolella pisteillä on esitetty mahdolliset poikkeavat havainnot. Tulokset sisältävät jokaiselta nykyilmaston ja tulevaisuuden ilmaston vuodelta taasaantuneista olosuhteista lasketut vuosittaiset homeindeksin maksimiarvot. Tiili-villa-tiilirakenteista on myös esitetty 30 vuoden aikasarjojen kumulatiivisen homeindeksin vuosittaiset maksimiarvot matalille kerrostaloille. Kaikki tiili-, betoni- ja puujulkisivut simuloitiin etelän julkisivulla Vantaan ilmastossa. Puujulkisivuissa simulointeja tehtiin 1980-mallitalolle myös pohjoisen julkisivulla Jokioisen ilmastossa

7.1 Tiilijulkisivut

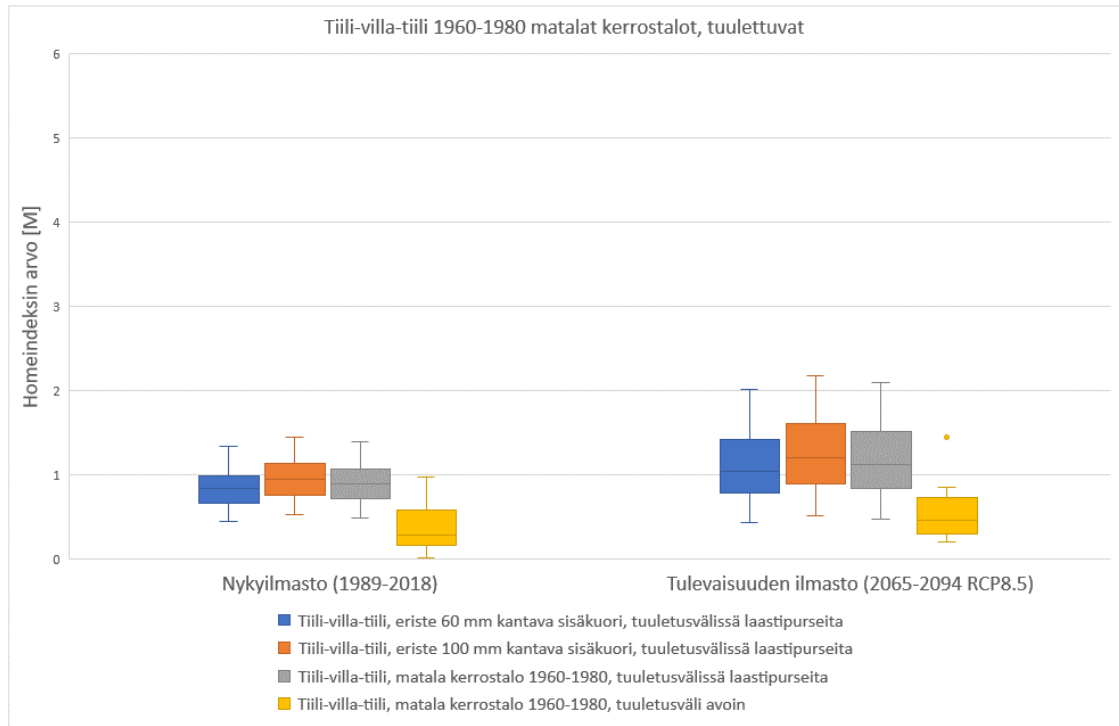
7.1.1 Tiili-villa-tiili

Tiili-villa-tiilirakenteiden kriittiset kohdat homeen kasvulle olivat lämmöneristekerroksen ulkopinnassa, johon kaikki homeindeksin arvot tässä luvussa viittaavat. Kuvassa 14 on esitetty perustapaukset matalista 1960–1980-lukujen kerrostaloista, joissa ei ollut tuuletusväliä. Kuvassa on myös yhdistetty kaikki neljä perustapausta mukaan yhdeksi tapaukseksi, joka on nimetty *Tiili-villa-tiili, matala kerrostalo 1960–1980, ei tuuletusväliä*. Yhdistetty tapaus on laskettu neljän perustapauksen vuosikeskiarvojen perusteella. Kuvan 14 tuloksista havaitaan, että pienet eristepaksuuden lisäykset sekä ero kantavan ja ei-kantavan sisäkuoren välillä ovat hyvin pieniä. Tulevaisuuden ilmastossa tuulettumattomissa tiili-villa-tiili kerrostaloissa noin 25 % vuosista nousee homeindeksin 2 yläpuolelle.



Kuva 14. *Tiili-villa-tiili-rakenteisten tuulettumattomien matalien kerrostalojen tarkastelu etelän julkisivulle Vantaan ilmastossa. Tarkastelupiste lämmöneristeen ulkopinta homeutumisherkkyyssluokassa HHL3.*

Tiili-villa-tiili-rakenteita tutkittiin myös tuuletusvälillisinä, joiden määriteltiin ilmanvaihtuvuutta muuttamalla olevan täysin auki tai laastipurseiden täyttämiä. Kuvassa 15 on esitetty tuuletusvälilliset tapaukset 1960–1980-lukujen matalista kerrostaloista. Kuvassa on myös yhdistetty kaksi perustapausta yhdeksi tapaukseksi, joka on nimetty seuraavasti: *Tiili-villa-tiili, matala kerrostalo 1960–1980, tuuletusvälissä laastipurseita*. Perustapauksissa muuttujana oli eristepaksuus. Kuvassa on esitetty myös tapaus 100 mm:n eristepaksuudella, jossa tuuletusväli on täysin avoin (*Tiili-villa-tiili, matala kerrostalo 1960–1980, tuuletusväli avoin*). Tuloksista havaitaan, että laastipurseiden täyttämän tuuletusvälin homeindeksin arvot nousevat nykyilmaston pääosin alle 1 arvoista tulevaisuuden ilmastossa yli 1 arvoihin. Huomattavaa on myös, että avoimen tuuletusvälin arvot pysyvät alle homeindeksin arvon 1 myös tulevaisuuden ilmastossa yksittäistä poikkeavaa vuotta lukuun ottamatta.



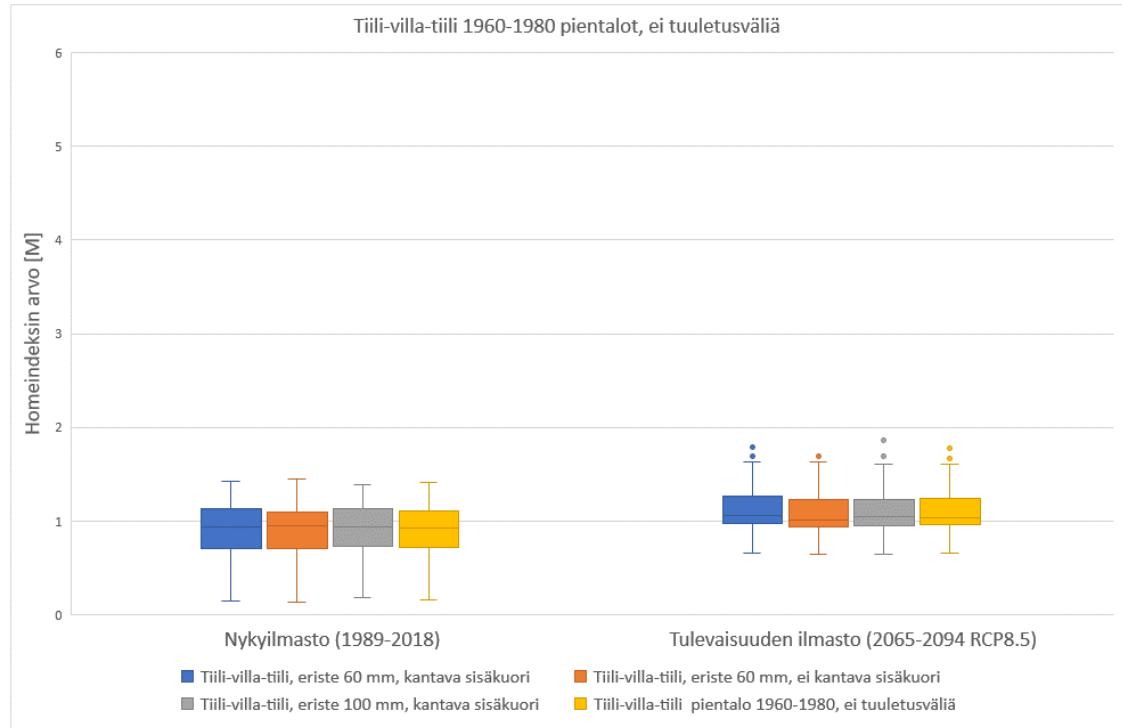
Kuva 15. *Tiili-villa-tiili-rakenteisten tuulettuvien matalien kerrostalojen tarkastelu etelän julkisivulle Vantaan ilmastossa. Tarkastelupiste lämmöneristeen ulkopinta homeutumisherkkyysluokassa HHL3.*

Tuloksista on selvästi nähtävissä tuuletusvälin merkitys tiilipintaisille julkisivuille. Pienikin ilmanvaihtuvuus tapauksissa, joissa tuuletusväli on arvioitu laastipurseiden täyttämäksi laskee homeindeksin arvoa pääosin alle yhden nykyilmastossa. Tulevaisuuden ilmastossa pienikin ilmanvaihtuvuus pitää homeindeksin arvon tutkituissa tapauksissa pääosin alle kahden. Kuvassa 16 on esitetty tuulettumattomien tiili-villa-tiili-rakenteisten matalien kerrostalojen yhdistetty perustapaus verrattuna tuulettuviin variaatioihin.



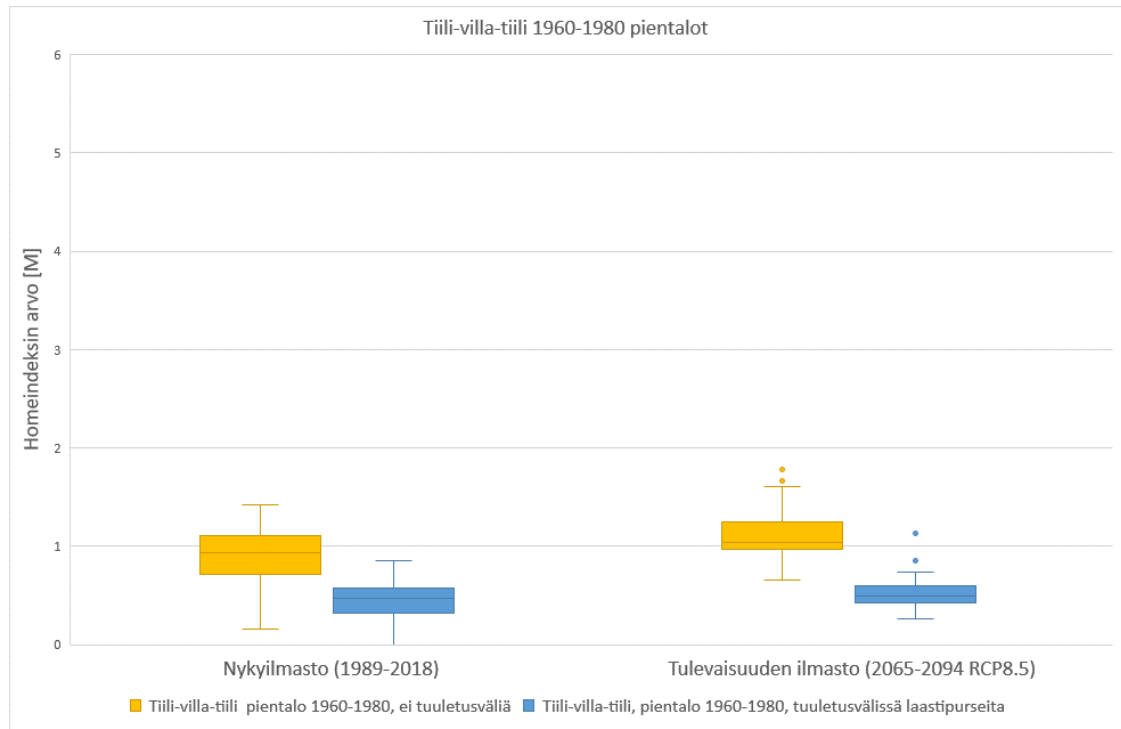
Kuva 16. *Tiili-villa-tiili-rakenteisten matalien kerrostalojen vertailu etelän julkisivulle Vantaan ilmastossa. Tarkastelupiste lämmöneristeen ulkopinta homehtumisherkkyyssluokassa HHL3.*

Tiili-villa-tiili-rakenteita tutkittiin myös pientaloina eli pienemmällä saderasituksella. Kuvasta 17 voidaan nähdä, että tuulettumattomissa tapauksissa pienet eristepaksuuden lisäykset sekä ero kantavan ja ei-kantavan sisäkuoren välillä ovat jälleen pieniä. Homeindeksit jäävät myös loogisesti matalia kerrostaloja pienemmälle tasolle.



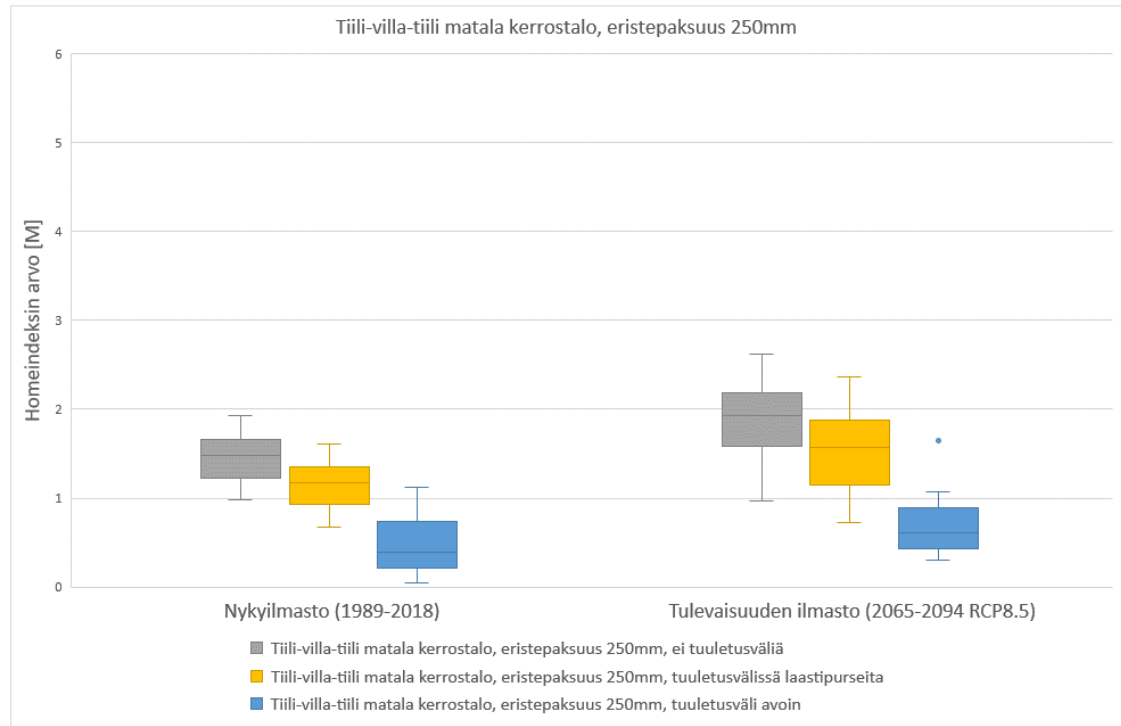
Kuva 17. *Tiili-villa-tiili-rakenteisten tuulettumattomien pientalojen tarkastelu etelän julkisivulle Vantaan ilmastossa. Tarkastelupiste lämmöneristeen ulkopinta homehtumis-herkkyyssuokassa HHL3.*

Tiili-villa-tiili-rakenteisia pientaloja tutkittiin myös yhdellä tuuletusvälillillä tapauksella, jossa tuuletusväliä oletettiin olevan laastipurseita. Kuvasta 18 havaitaan, että tuuletusvälin pienikin ilmanvaihtuvuus laskee homeindeksin myös tulevaisuuden ilmastossa yhtä poikkeavaa vuotta lukuun ottamatta alle yhden.



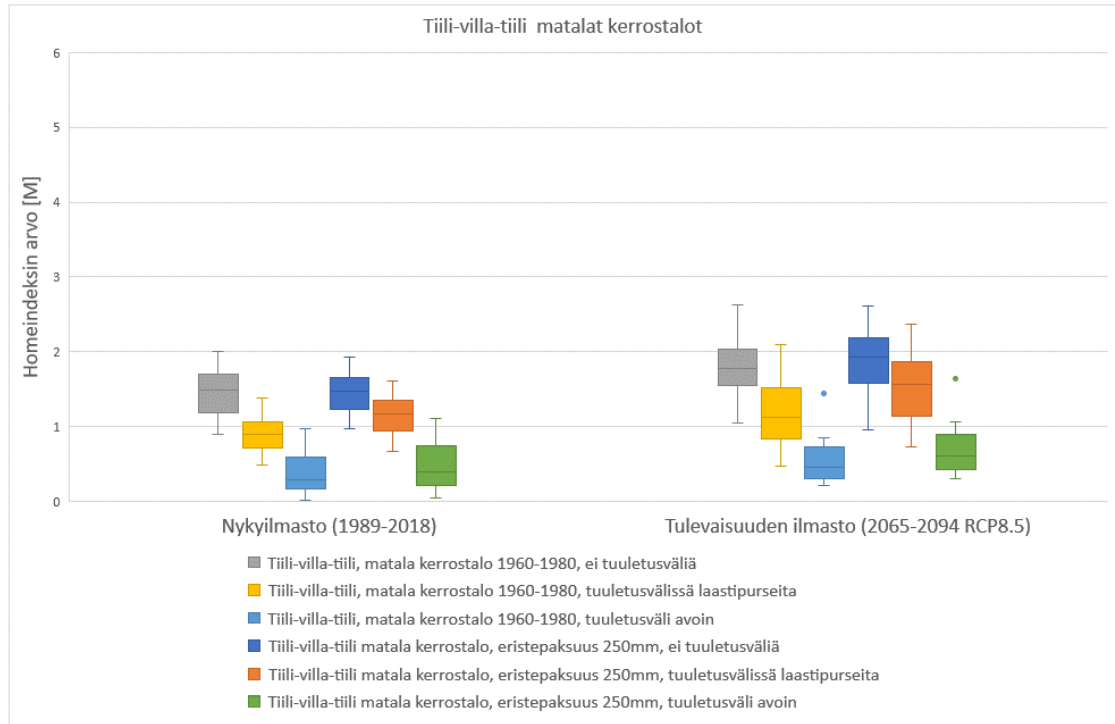
Kuva 18. *Tiili-villa-tiili-rakenteisten pientalojen vertailu etelän julkisivulle Vantaan ilmastossa. Tarkastelupiste lämmöneristeen ulkopinta homehtumisherkkyyssluokassa HHL3.*

Tiili-villa-tiili-rakenteita tutkittiin vertailuna myös paksummalla 250 mm:n eristepaksuudella ja käyttämällä lämmönjohtavuudeltaan uudempaa villaa vastaavaa materiaalia. Kuvasta 19 on havaittavissa vastaava tuuletusvälin vaikutus homeindeksiin kuin ohuimmilla eristepaksuuksillakin.



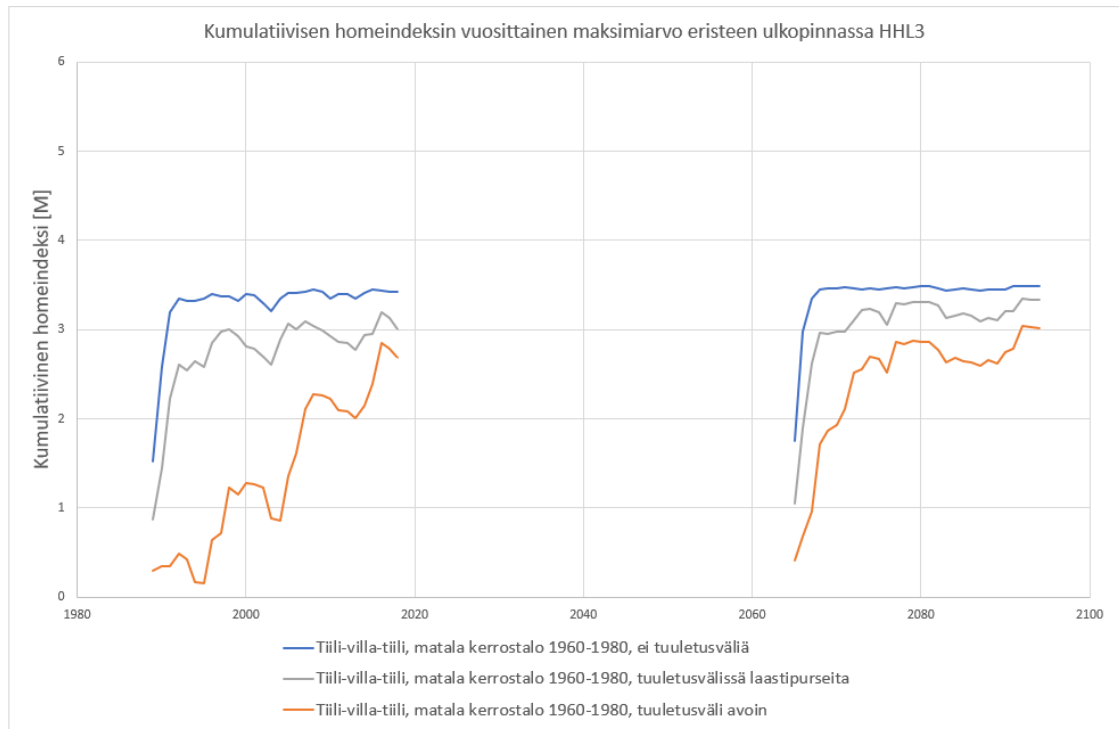
Kuva 19. *Tiili-villa-tiili-rakenteisten matalien kerrostalojen tarkastelu etelän julkisille Vantaan ilmastossa. Tarkastelupiste lämmöneristeen ulkopinta homehtumisherkkyysluokassa HHL3.*

Tulosten perusteella eristepaksuuden kasvattaminen ei nosta merkittävästi homeindeksin arvoja tiili-villa-tiili-rakenteissa. Suurin muutos eristepaksuuden kasvattamisella on rakenteissa, joiden tuuletusvälissä on laastipurseita. Kuvassa 20 on esitetty eristepaksuuden kasvattamisen vaikutus homeindeksiin nykyilmastossa ja tulevaisuuden ilmastossa.



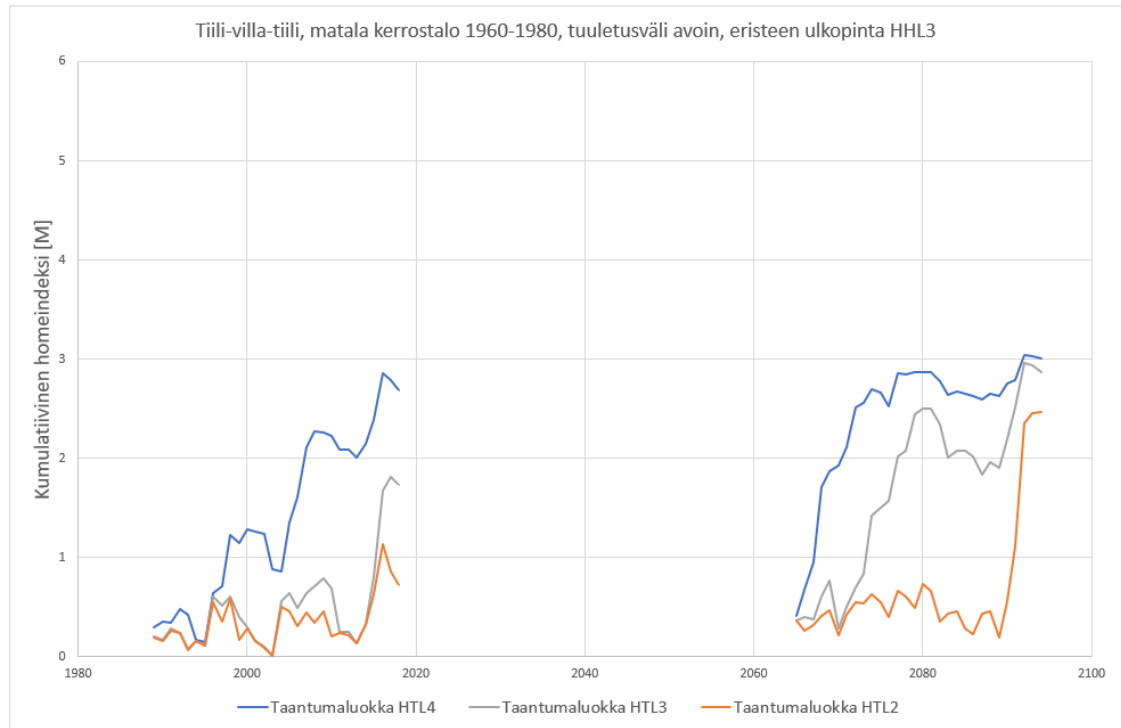
Kuva 20. *Tiili-villa-tiili-rakenteisten matalien kerrostalojen eristepaksuuden kasvattamisen vaikutus homeindeksin arvoon. Tarkastelupiste lämmöneristeen ulkopinta homeh- tumisherkkyyssluokassa HHL3.*

Kumulatiivisen homeindeksin muuttumista tarkasteltiin tiili-villa-tiili-rakenteisissa matalissa kerrostaloissa. Kuvasta 21 havaitaan, että homeindeksi kumuloituu myös rakenteessa, jossa tuuletusväli on avoin ja yksittäisten vuosien homeindeksin maksimiarvot eivät ylittäneet homeindeksin arvoa 1 lukuun ottamatta yhtä tulevaisuuden vuotta (kts. kuva 16). Nykyilmastossa avoimen tuuletusvälin rakenteessa kumulatiivisen homeindeksin kasvu on huomattavasti hitaampaa muihin tapauksiin verrattuna ja kumulatiivinen arvo 30 vuoden kohdalla jää hieman alemmalle tasolle.



Kuva 21. Kumulatiivisen homeindeksin vuosittainen maksimiarvo Vantaan nykyilmastossa (1989–2018) ja tulevaisuuden ilmastossa (2065–2094 RCP8.5) tiili-villa-tiilirakenteisilla matalilla kerrostaloilla. Tarkastelupiste lämmöneristeen ulkopinta homeutumisherkkyysluokassa HHL3.

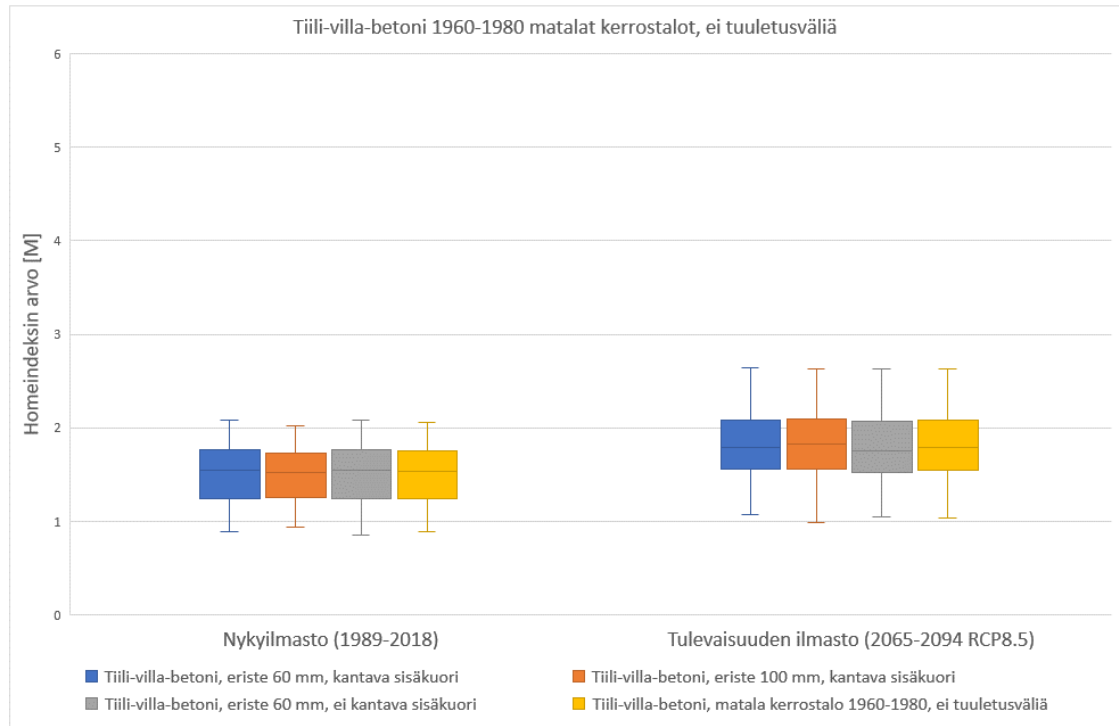
Avoimen tuuletusvälin tapauksella tulokset laskettiin myös homeen taantumaluokissa HTL3 ja HTL2. Kuvasta 22 havaitaan, että taantumaluokkaa muuttamalla voidaan vaikuttaa homeindeksin kumuloitumiseen pitkällä aikavälillä.



Kuva 22. Kumulatiivisen homeindeksin vuosittainen maksimiarvo eri taantumaluokissa vantaan nykyilmastossa (1989–2018) ja tulevaisuuden ilmastossa (2065–2094 RCP8.5) tiili-villa-tiili-rakenteisella matalalla kerrostalolla. Tarkastelupiste lämmöneristeen ulkopinta homeutumisherkkyyssluokassa HHL3.

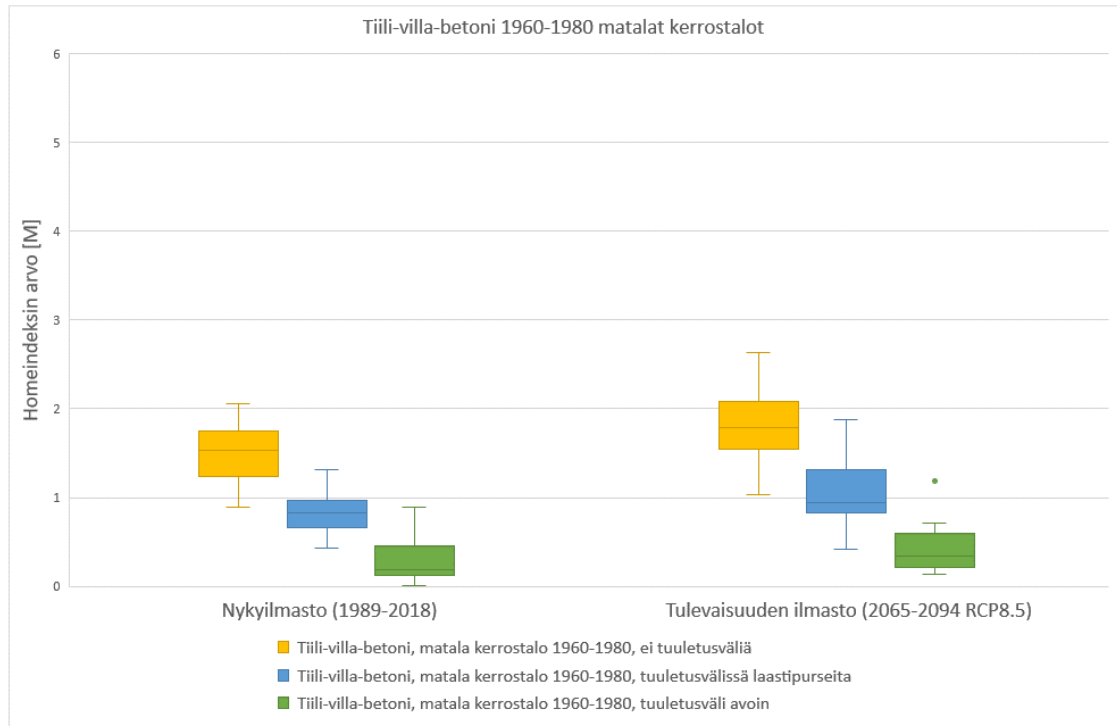
7.1.2 Tiili-villa-betoni

Tiilijulkisivuisia matalia kerrostaloja tutkittiin myös betonisella sisäkuorella. Kuvassa 23 on esitetty tuulettumattomat perustapaukset ja perustapauksien perusteella tehty yhdistetty tapaus *Tiili-villa-betoni, matala kerrostalo 1960–1980, ei tuuletusväliä*. Tuloksista havaitaan, että ne ovat hyvin vastaavat tiili-villa-tiili-rakenteiden perustapausten kanssa ja homeindeksit ovat niiden kanssa hyvin samalla tasolla (vrt. kuva 14).



Kuva 23. *Tiili-villa-betoni-rakenteisten tuulettumattomien matalien kerrostalojen tarkastelu etelän julkisivulle Vantaan ilmastossa. Tarkastelupiste lämmöneristeen ulkopinta homeutumisherkkyyssluokassa HHL3.*

Kuvassa 24 havaitaan tuuletusvälien vastaava huomattava vaikutus tuloksiin kuin tiilirakenteisilla sisäkuorilla (vrt. kuva 16.). Tuulettumattomissa rakenteissa ylitetään tulevaisuuden ilmastossa homeindeksin arvo 2 yli neljäsosassa vuosia. Laastipurseita sisältävien rakenteiden homeindeksi ei nouse tulevaisuuden ilmastossa yli kahden ja avoimen tuuletusvälin rakenteessa homeindeksi pysyy tulevaisuudessa yhtä poikkeavaa vuotta lukuun ottamatta alle yhden.



Kuva 24. *Tiili-villa-betoni-rakenteisten matalien kerrostalojen tuuletusvälin vaikutuksen vertailu etelän julkisivulle Vantaan ilmastossa. Tarkastelupiste lämmöneristeen ulkopinta homehtumisherkkyyssuokassa HHL3.*

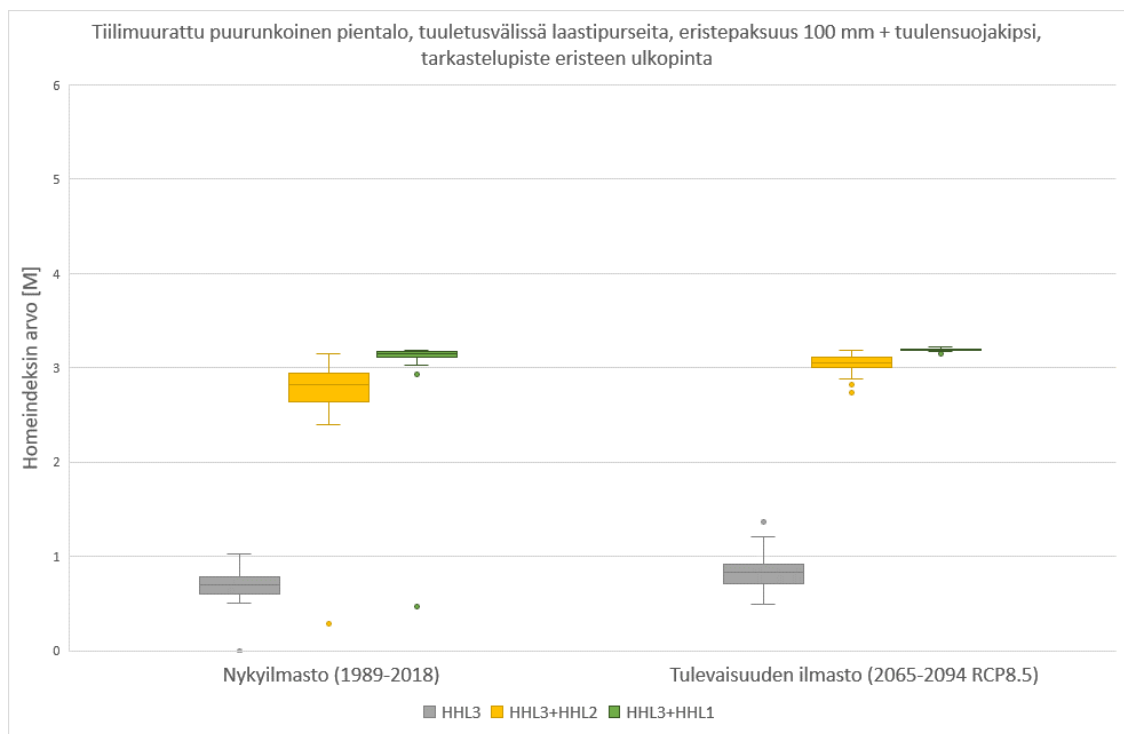
7.1.3 Tiili-puurunko

Tarkasteltavat pisteet puurunkoisissa tiilijulkisivuisissa rakennuksissa olivat puurungon ulkopinta, lämmöneristeen ulkopinta runkojaon keskeltä, tuulensuojakipsin sisäpinta runkojaon keskeltä, puurungon sisäpinta ja sisäverhouskipsilevyn ulkopinta puurungon kohdalta. Kriittisin piste homeen kasvun tarkasteluiden kannalta oli tuulensuojakipsin sisäpinta runkojaon keskeltä eli mallissa mahdollisimman kaukana runkotolpista, jos tuulensuojakipsin homehtumisherkkyyssuokka olisi HHL1. Muuten suurimmat homeindeksin luekemat saadaan puurungon ulkopinnasta homehtumisherkkyyssuokassa HHL1.

Seuraavissa kuvissa 25–29 on esitetty tarkastelupisteinä lämmöneristeen (mineraalivilla) ulkopinta, josta yleisimmin esimerkiksi sisäilmatutkimuksissakin mikrobinäytteet otettaisiin. Kuvissa on esitetty tarkastelupisteiden homehtumisherkkyyssuokka kolmella eri tavalla, joka riippuu siitä, miten viereisen tuulensuojakipsin homehtumisherkkyyssuokkaa (HHL1 vs. HHL2 vs. HHL3). Tutkitun materiaalin homeen maksimimäärä määräytyy tutkitun materiaalin homehtumisherkkyyssuokan mukaan ja homeen kasvunopeus määräytyy rajapinnan homeen kasvulle herkemman materiaalin mukaan. Tarkastelupisteiden kaksi eri homehtumisherkkyyssuokkaa on esitetty tuloksissa seuraavasti: homeen maksimimäärän herkkyyssuokka (HHL3) + kasvunopeuden herkkyyssuokka (HHL1 tai HHL2).

Tuloksista havaitaan, että jos tuulensuojakipsin homehtumisherkkyyssluokka on hyvin herkkä (HHL1) tai herkkä (HHL2), nousee homeindeksin arvo villassa huomattavasti.

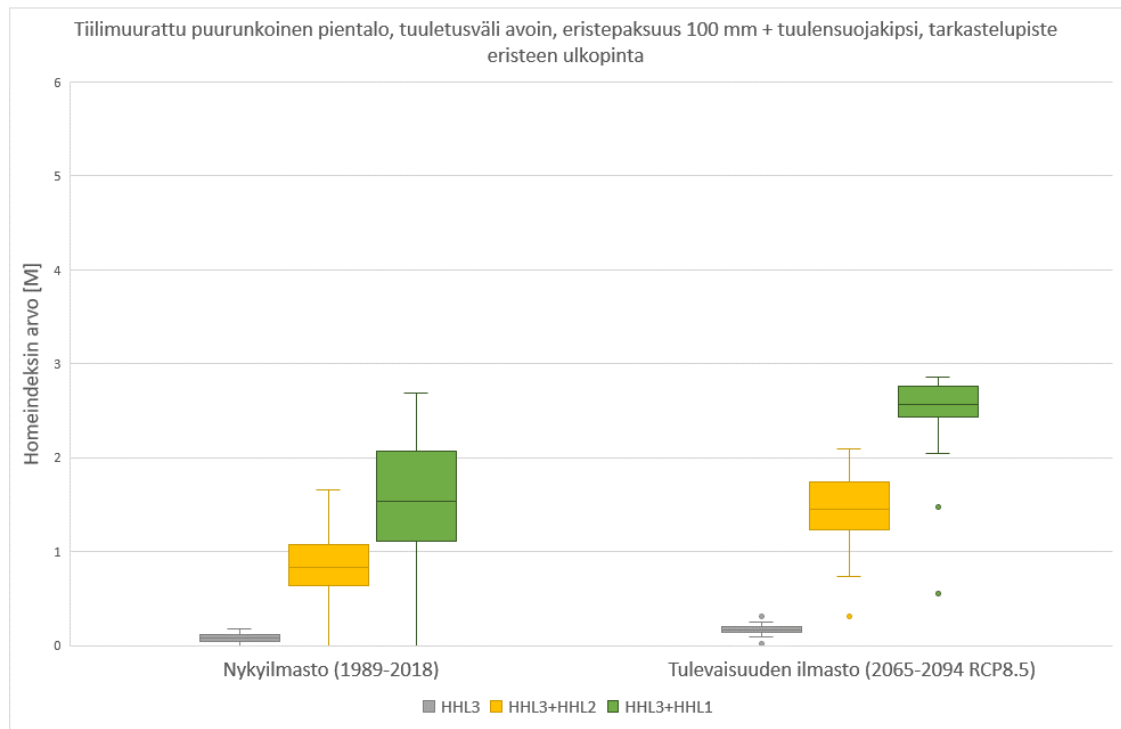
Kuvassa 25 esitetyn laastipurseita sisältävän rakenteen tapauksessa molempien materiaalien kuuluessa luokkaan HHL3 tulokset pysyvät tulevaisuuden ilmastossakin pääosin alle homeindeksin arvon 1. Tuulensuojan homehtumisherkkyyttä muuttamalla luokkaan HHL2 voidaan kuvan 25 tuloksista nähdä homeindeksin nousevan nykyilmastossa lähelle arvoa 3 ja tulevaisuuden ilmastossa pääosin päälle 3. Homehtumisherkkyyssluokan HHL3+HHL1 mukaan tehdyssä tarkastelussa homeindeksi pysyy yhtä nykyilmaston vuotta lukuun ottamatta arvon 3 yläpuolella.



Kuva 25. *Tiilimuuratun puurunkoisen pientalon mineraalivilla lämmöneristeen ulkopinnan homeen kasvun tarkastelu etelän julkisivulle Vantaan ilmastossa. Tutkitun rakenteen eristepaksuus 100 mm ja tuuletusvälissä laastipurseita.*

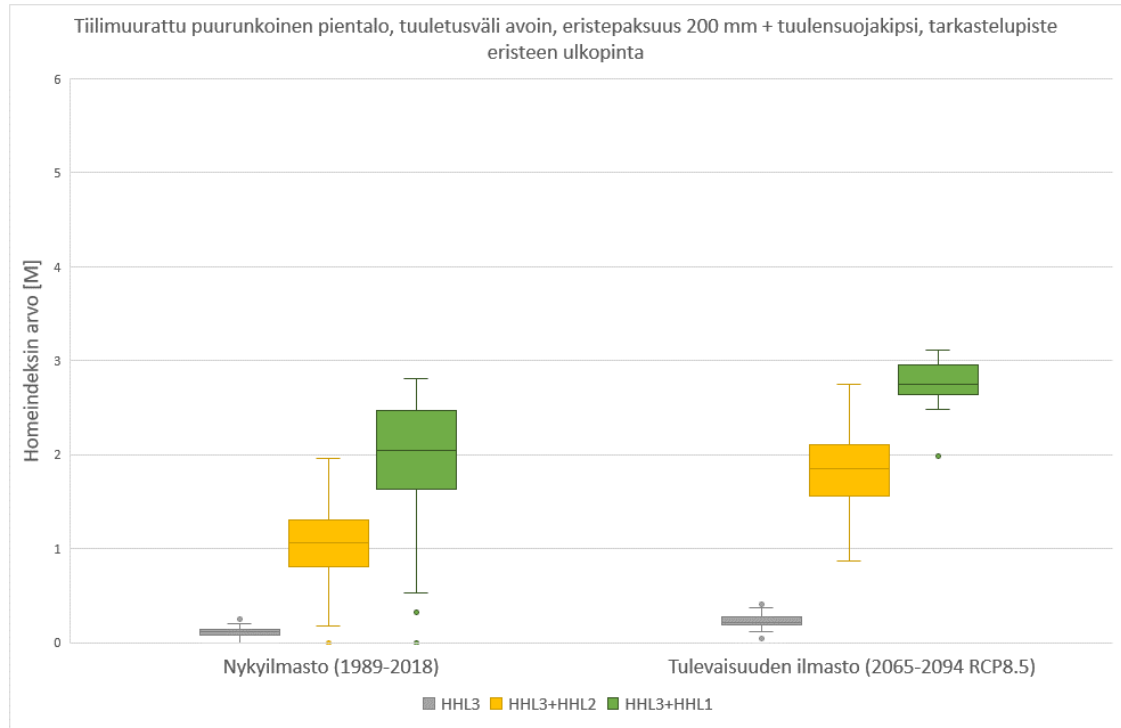
Kuvassa 26 on esitetty vastaava rakenne kuin kuvassa 25, mutta avoimella tuuletusväliällä. Tuloksissa havaitaan vastaava trendi tuulensuojan homehtumisherkkyyssluokkaan liittyen kuin kuvassa 25, mutta homeindeksin arvot jäävät laastipurseista tapausta alemmalle tasolle. Homehtumisherkkyyssluokan HHL3+HHL2 mukaan tehty tarkastelu pysyy tulevaisuuden ilmastossakin pääosin alle homeindeksin arvon 2. Homehtumisherkkyyssluokan HHL3+HHL1 mukaan tehdyssä tarkastelussa nähdään huomattava muutos homeindeksin arvoissa. Nykyilmastossa suurin osa vuosista pysyy alle homeindeksin 2 ja

alin 25. persenttiili on lähes kokonaan alle yhden. Tulevaisuuden ilmastossa homeindeksi ylittää arvon 2 lähes kaikkien vuosien osalta.



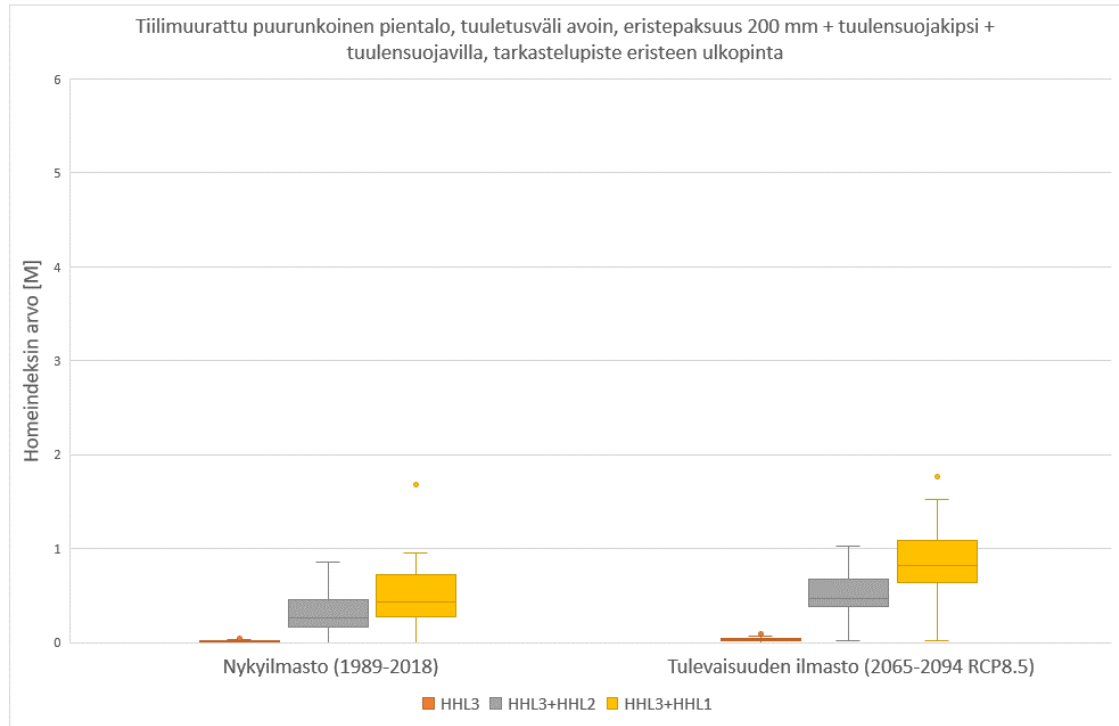
Kuva 26. Tiilimuuratun puurunkoisen pientalon mineraalivilla lämmöneristeen ulkopinnan homeen kasvun tarkastelu etelän julkisivulle Vantaan ilmastossa. Tutkitun rakenteen eristepaksuus 100 mm ja tuuletusväli avoimena.

Kuvassa 27 on esitetty vastaava rakenne kuin kuvassa 26, mutta lämmöneristepaksuus on kaksinkertaistettu. Tuloksissa havaitaan vastaavaa trendiä kuin kuvissa 25 ja 26. Homeindeksin arvot nousevat hieman korkeammalla tasolle kuin ohuemalla eristepaksuudella tehdyt tarkastelut kuvassa 26.



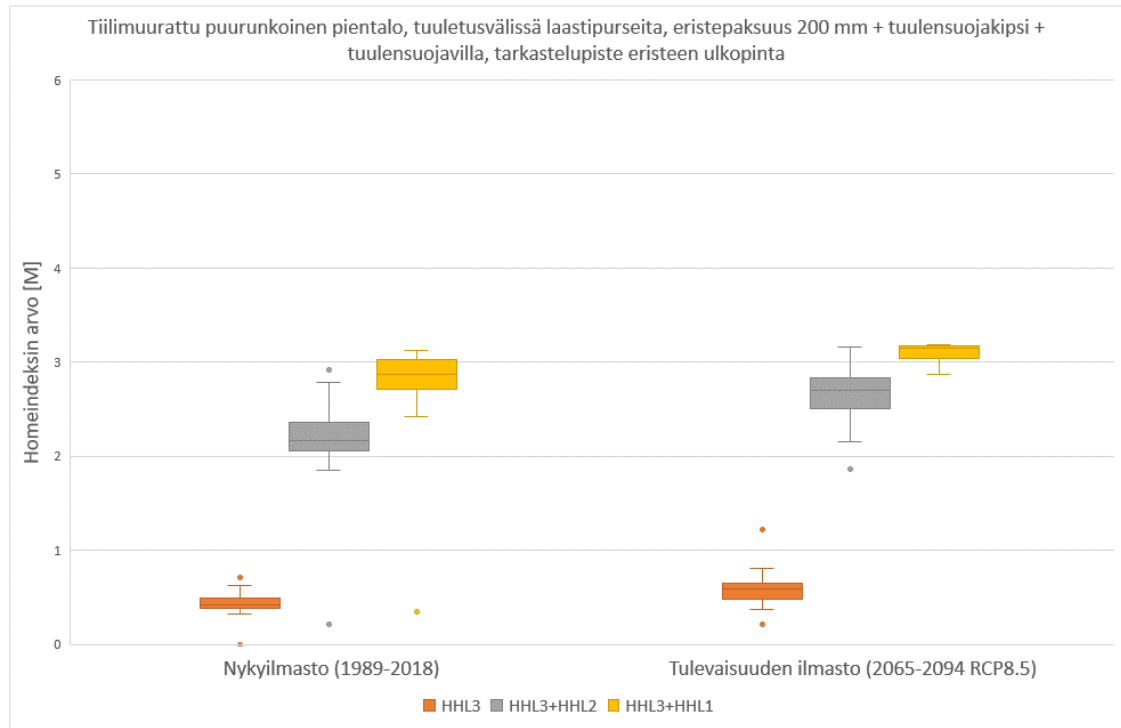
Kuva 27. Tiilimuuratun puurunkoisen pientalon mineraalivilla lämmöneristeen ulkopinnan homeen kasvun tarkastelu etelän julkisivulle Vantaan ilmastossa. Tutkitun rakenteen eristepaksuus 200 mm ja tuuletusväli avoimena.

Tiilimuurattujen puurunkoisten pientalojen tuulensuojan ulkopuolelle lisättiin kahdessa tapauksessa myös 30 mm tuulensuojavilla parantamaan lämmöneristeen ja puurungon ulkopinnan olosuhteita. Kuvasta 28 on havaittavissa, että tuulensuojavillan lisäys vähentää lämmöneristeen ulkopinnan tarkastelupisteen homeindeksiä huomattavasti avoimen tuuletusvälin rakenteessa eikä edes homeutumisherkkyyssluokan HHL3+HHL1 (tuulensuojakipsilevy oletettu luokkaan HHL1) tarkastelussa homeindeksi nouse tulevaisuuden ilmastossa yli kahden pysyen pääosin yhden alapuolella.



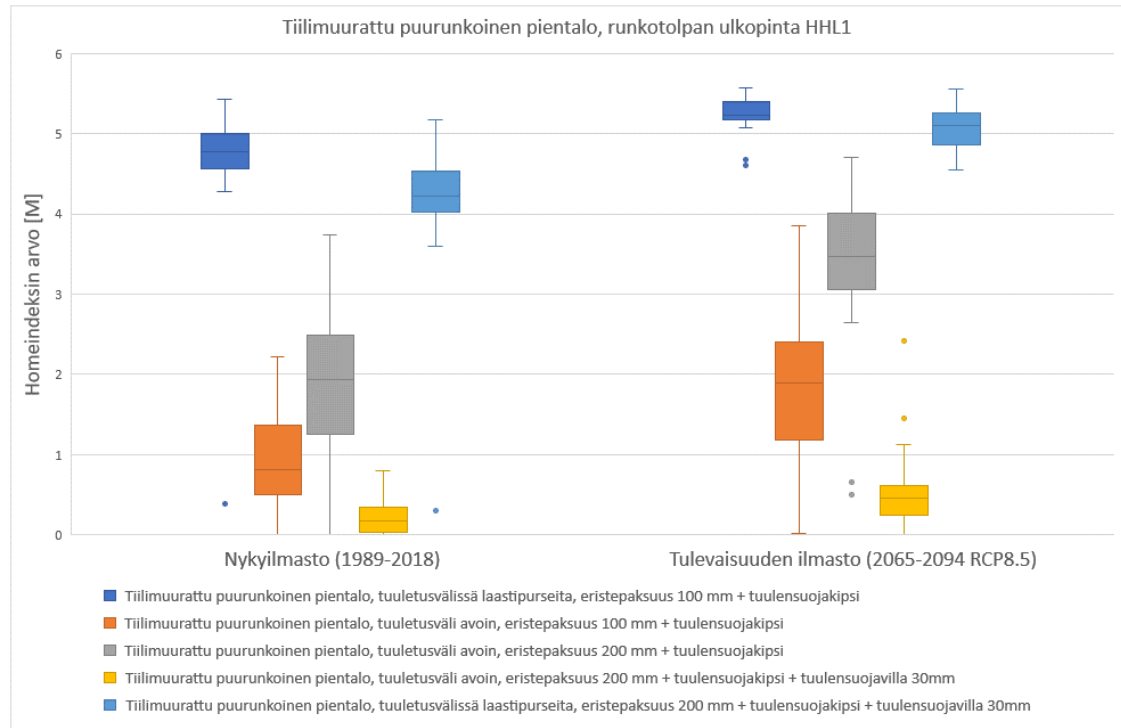
Kuva 28. Tiilimuuratun puurunkoisen pientalon mineraalivilla lämmöneristeen ulkopinnan homeen kasvun tarkastelu etelän julkisivulle Vantaan ilmastossa. Tutkitun rakenteen eristepaksuus 200 mm, tuulensuojakipsin ulkopuolelle lisätty 30 mm tuulensuojavilla ja tuuletusväli avoimena.

Laastipurseita täynnä olevan tuuletusvälin tapauksessa tuulensuojavillan lisäys laskee lämmöneristeen ulkopinnan homeindeksiä hieman verrattuna rakenteeseen ilman tuulensuojavillaa (vrt. kuva 25). Kuvan 29 tuloksista on kuitenkin nähtävissä, että lämmöneristeen ulkopinnan homeindeksi nousee jo homehtumisherkkyyden luokan HHL3+HHL2 tapauksessa pääosin yli kahden nykyilmastossa.



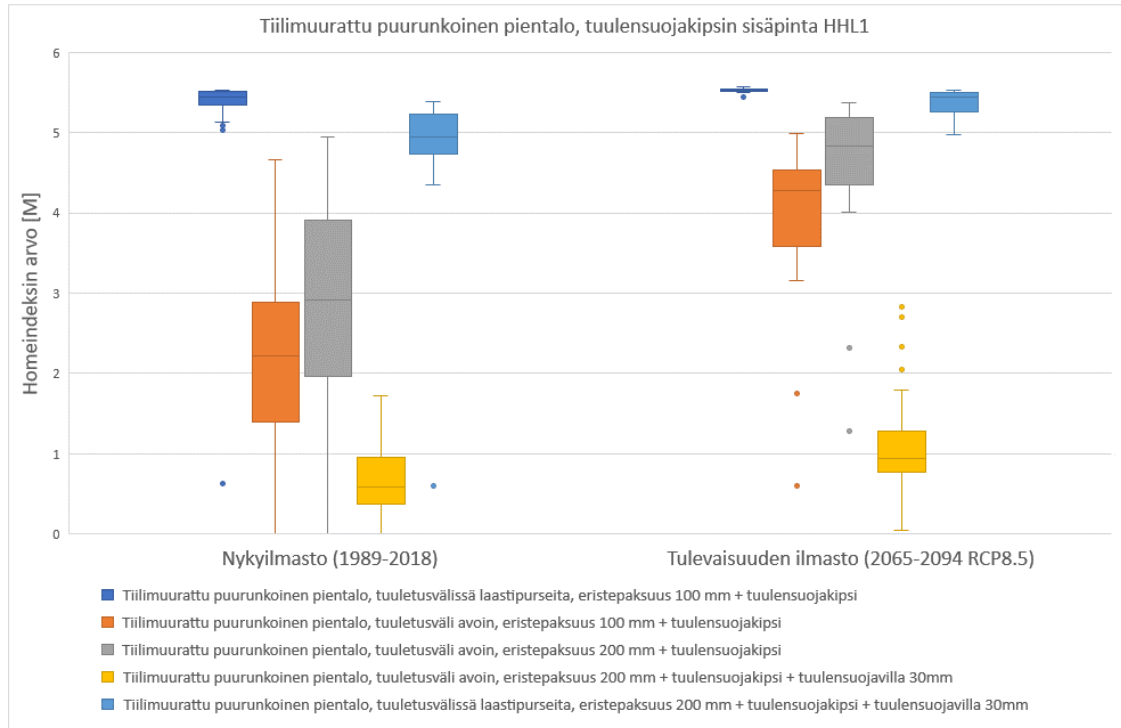
Kuva 29. Tiilimuuratun puurunkoisen pientalon mineraalivilla lämmöneristeen ulkopinnan homeen kasvun tarkastelu etelän julkisivulle Vantaan ilmastossa. Tutkitun rakenteen eristepaksuus 200 mm, tuulensuojakipsin ulkopuolelle lisätty 30 mm tuulensuojavilla ja tuuletusvälissä laastipurseita.

Kuvassa 30 on esitetty kuvissa 25–29 esitettyjen ulkoseinärakenteiden homeindeksin tarkastelut puurungon ulkopinnassa. Tuloksista havaitaan, että puurungon ulkopinnan homeindeksin arvot nousevat huomattavan korkealla erityisesti laastipurseita sisältävissä rakenteissa. Avoimen tuuletusvälin ulkoseinärakenteista vain yhdessä tapauksessa (eristepaksuus 200 mm ilman tuulensuojavillaa) puurungon ulkopinnan homeindeksin mediaanin arvo nousee tulevaisuuden ilmastossa lämmöneristeen ulkopinnan tapauksista HHL3+HHL1 (vrt. kuva 27) korkeammalle tasolle. Muissa avoimen tuuletusvälin tapauksissa tarkastelujaksojen homeindeksin mediaani jää puurungon ulkopinnassa lämmöneristeen ulkopinnan HHL3+HHL1 (vrt. kuvat 26 ja 28) tarkastelua matalammalle tasolle. Homeindeksin maksimi-arvot tulevaisuuden ilmastossa tarkastelujaksolla nousevat kuitenkin puurungon ulkopinnassa kaikissa tapauksissa lämmöneristeen ulkopintaa korkeammalla (vrt. kuvat 25–29).



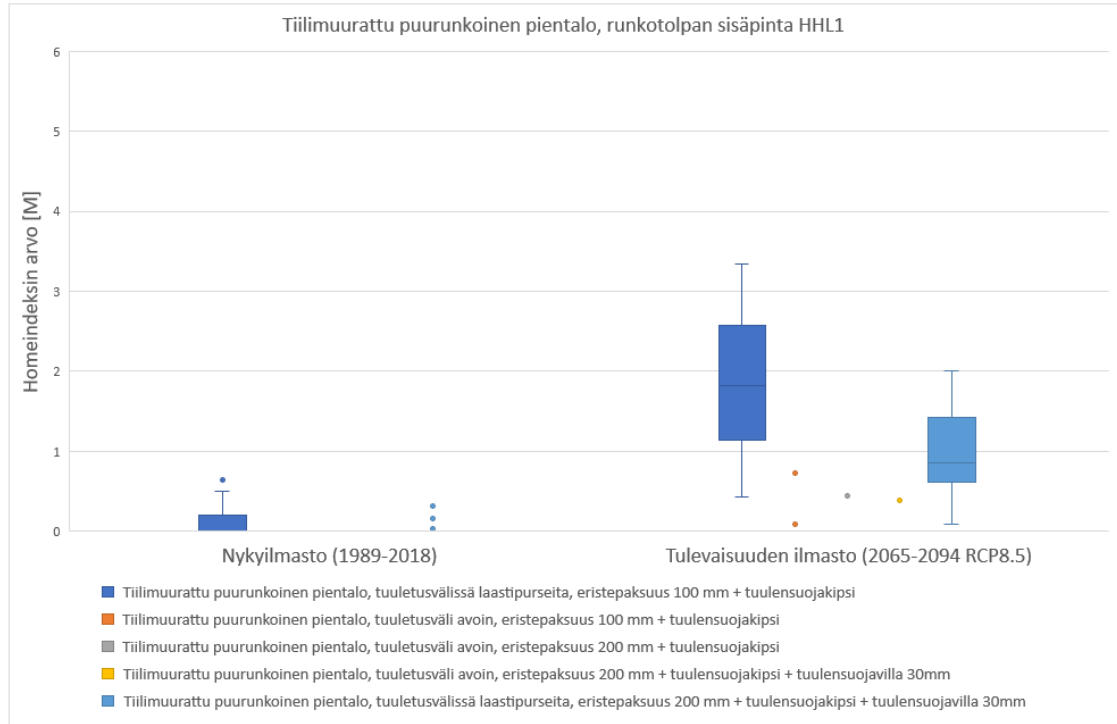
Kuva 30. *Tiilimuurattujen puurunkoisten pientalojen puurungon ulkopinnan homeen kasvun tarkastelut homeutumisherkkyyssluokassa HHL1 etelän julkisivulle Vantaan ilmastossa.*

Puurungon ulkopintaa kriittisempi piste oli tuulensuojalevyn sisäpinta mahdollisimman kaukana puurungosta, jos tutkittava materiaali oli tuulensuoja ja tuulensuojakipsin homeutumisherkkyyssluokka oletettiin hyvin herkäksi (HHL1). Tuulensuoja kuitenkin kuuluu kantavan rakenteen ja lämmöneristekerroksen ulkopuolelle, joten sitä ei tulisi suoraan verrata edellä esitettyihin tarkastelupisteisiin. Puurunkoisten tiilijulkisivuisten ulkoseinärakenteiden tuulensuojakipsin sisäpinnan homeen kasvun tulokset homeutumisherkkyyssluokassa HHL1 on esitetty seuraavassa kuvassa 31.



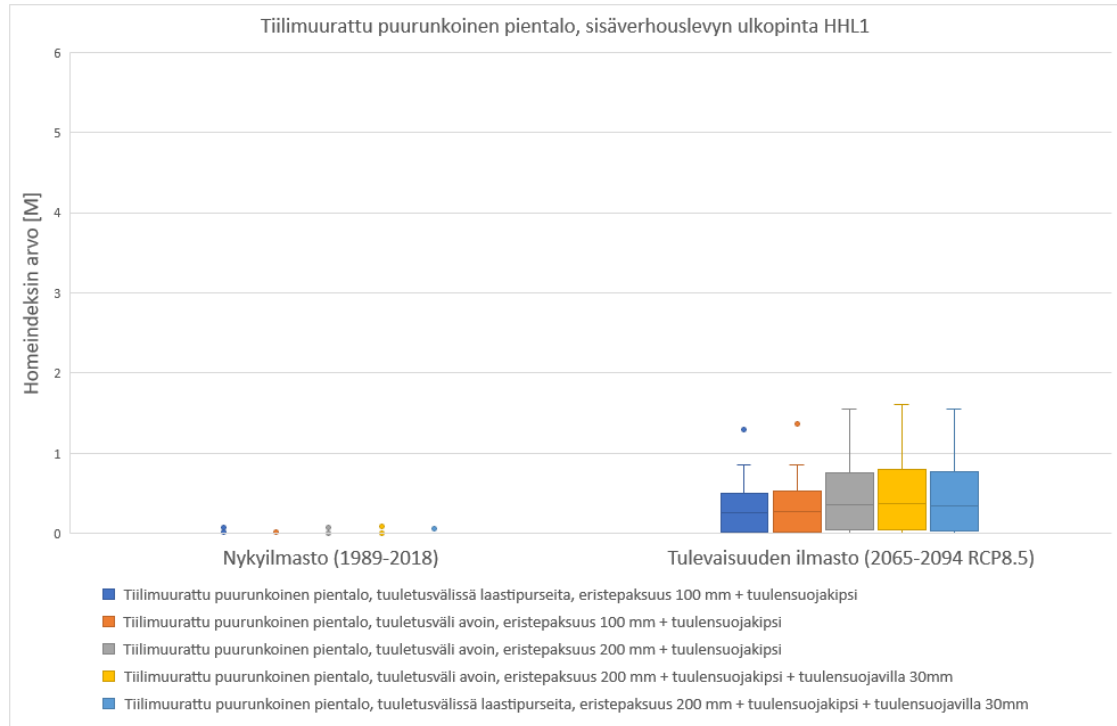
Kuva 31. *Tiilimuurattujen puurunkoisten pientalojen tuulensuojakipsilevyn sisäpinnan homeen kasvun tarkastelut homehtumisherkkyysluokassa HHL1 etelän julkisivulle Vantaan ilmastossa.*

Homeen kasvua tarkasteltiin myös puurungon sisäpinnalla. Kuvan 32 tuloksista havaitaan, että puurungon sisäpinnan homeindeksi nousee tulevaisuuden ilmastossa rakenteissa, joiden tuuletusväliä on laastipurseita.



Kuva 32. *Tiilimuurattujen puurunkoisten pientalojen puurungon sisäpinnan homeen kasvun tarkastelut homeutumisherkkyysluokassa HHL1 etelän julkisivulle Vantaan ilmastossa.*

Rakenteesta katsottiin myös sisäverhouskipsilevyn ulkopinnan homeen kasvu homeutumisherkkyysluokassa HHL1. Kuvan 33 tuloksista havaitaan rakenteen sisäverhouslevyn ulkopinnan homeindeksissä pientä kasvua tulevaisuuden ilmastossa. Tarkasteltuun kohtaan vaikuttaa tulevaisuuden ilmastossa huomattavasti käytetty sisäilman kosteuslisä.



Kuva 33. *Tiilimuurattujen puurunkoisten pientalojen sisäverhouskipsilevyn ulkopinnan homeen kasvun tarkastelut homehtumisherkkyysluokassa HHL1 etelän julkisivulle Vantaan ilmastossa.*

7.1.4 Yhteenveto tiilijulkisivuista

Tiilijulkisivuilla homeen kasvulle kriittisimmät rakenteet olivat puurungolliset julkisivut, joissa tuuletusvälit olivat laastipurseiden täyttämät. Kyseisissä tapauksissa homeen kasvua havaittiin myös puurungon sisäpinnalla. Tuulensuojan homehtumisherkkyydellä on suuri merkitys tuloksiin tarkastellessa lämmöneristeen ulkopintaa. Homeindeksi pieneni tapauksissa, joissa tuuletusväli oli avoin ja tuulensuojakipsin ulkopuolella oli käytetty tuulensuojavillaa.

Tiili- ja betonisäkuorisissa tapauksissa suurin riski homeen kasvulle oli tuulettumattomissa rakenteissa, joihin kohdistuu korkeampi saderasitus (matalat kerrostalot vs. pientalot). Rakenteissa jo pienikin ilmanvaihto laastipurseiden täyttämässä tuuletusväleissä paransi tilannetta, mutta niissäkin homeindeksin arvo 1 ylittyi tulevaisuuden ilmastossa suuressa osassa vuosia, joten riski homeen kasvulle on kyseisissä rakenteissa olemassa.

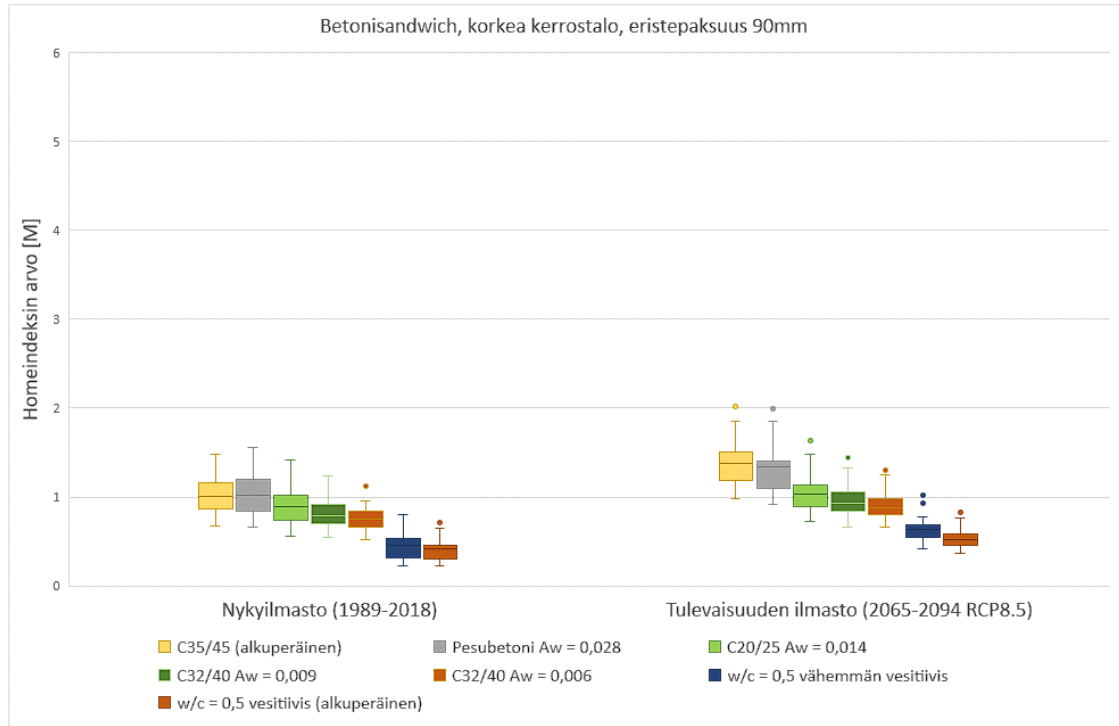
Kumulatiivisen homeindeksin laskennassa homeindeksin havaittiin kasvavan huomattavasti myös tapauksessa, jossa yksittäisten vuosien homeindeksin maksimiarvot olivat

pääosin arvon 1 alapuolella. Homeindeksin kumuloitumiseen voitiin vaikuttaa homeen taantumaluokkaa muuttamalla.

7.2 Betonijulkisivut

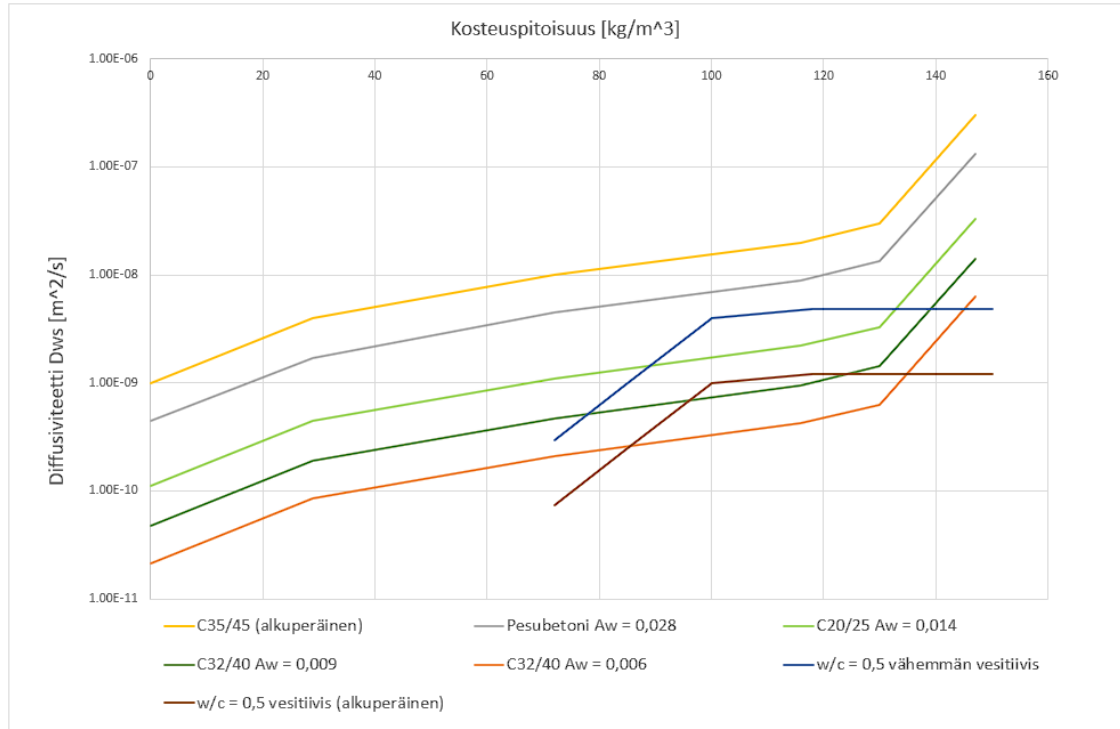
7.2.1 Betonien vertailu

Tässä luvussa on keskitytty eri betonivariaatioiden keskinäiseen vertailuun ja esitetty esimerkki betonimateriaaleille tehdyistä herkkyystarkasteluista. Kuvassa 34 on esitetty betonien kapillaarisesta kosteudensiirtymisestä johtuvia eroja kahden eri betonin perustapauksen *B1* (WUFI-tietokannassa nimellä *C35/45*) ja *B2* (WUFI-tietokannassa nimellä $w/c = 0,5$) sekä niiden pohjalta tehtyjen variaatioiden (*B1a*, *B1b*, *B1c*, *B1d* ja *B2a*) välillä betonisandwich-rakenteessa. Tässä luvussa betonisandwich-rakenteet sekä betonien kosteusdiffusiviteettien kuvaajat on nimetty luvussa 6.3.1 esitettyllä tavalla. Tuloksissa on nähtävissä selkeä laskeva trendi siirryttäessä kapillaarisesti aktiivisimmista betoneista kohti vähemmän aktiivisia. Huomattavaa tuloksissa on myös suuret erot WUFI-tietokannan alkuperäisistä betoneista *B1* ja *B2* tehtyjen betonisandwich-rakenteiden *C35/45* (alkuperäinen) ja $w/c = 0,5$ vesitiivis (alkuperäinen) välillä. Edellä mainituista alkuperäisistä betoneista *B2* on yleisesti tutkimuksissa käytetty materiaali ja näiden tulosten perusteella betonista muodostettu betonisandwich-rakenne $w/c = 0,5$ vesitiivis (alkuperäinen) on simuloinneissa hyvin epävarmalla puolella.

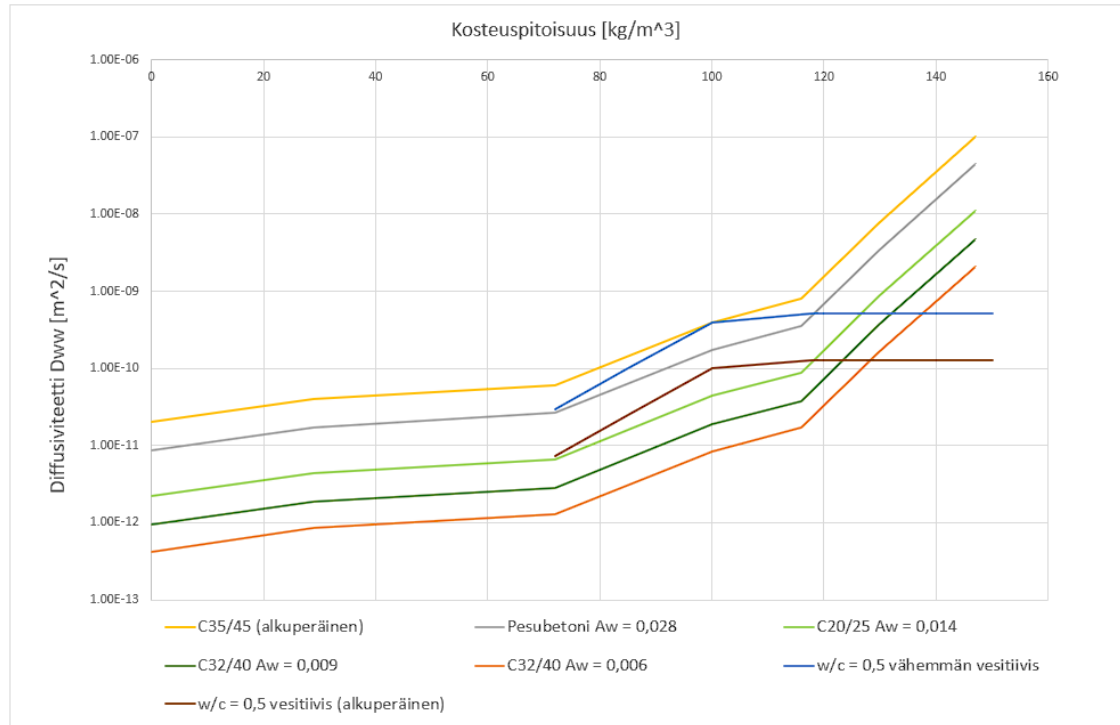


Kuva 34. Betonisandwich-rakenteen eri betonivaihtoehtojen mineraalivilla lämmöneristeen (HHL3) ulkopinnan homeindeksin vertailu etelän julkisivulle Vantaan ilmastossa.

Kuvissa 35 ja 36 on esitetty kuvan 34 variaatioissa käytettyjen betonien kosteusdiffusiviteetit D_{ws} ja D_{ww} . Kuvaajista nähdään betonien kosteusdiffusiviteettien väliset erot sekä kahden eri perustapauksen erimuotoiset kosteusdiffusiviteettien kuvaajat. Vesitiiviinä esitetyn betonin $w/c = 0,5$ vesitiivis (alkuperäinen) kosteusdiffusiviteetti ei kasva mentäessä kohti suurempia kosteuspitoisuuksia, jolloin kapillaarisen kosteudensiirron vaikutus korostuu erityisesti kosteammissa olosuhteissa olevien betonisandwich-rakenteiden ulkokuoribetonilla. Betonien vertailun tueksi olisi tärkeää saada mittausdataa oikeista rakennuksista sekä mitattuja ulkoseinärakenteita vastaaville betoneille kokeellisesti määritettyjä kosteusdiffusiviteettejä.



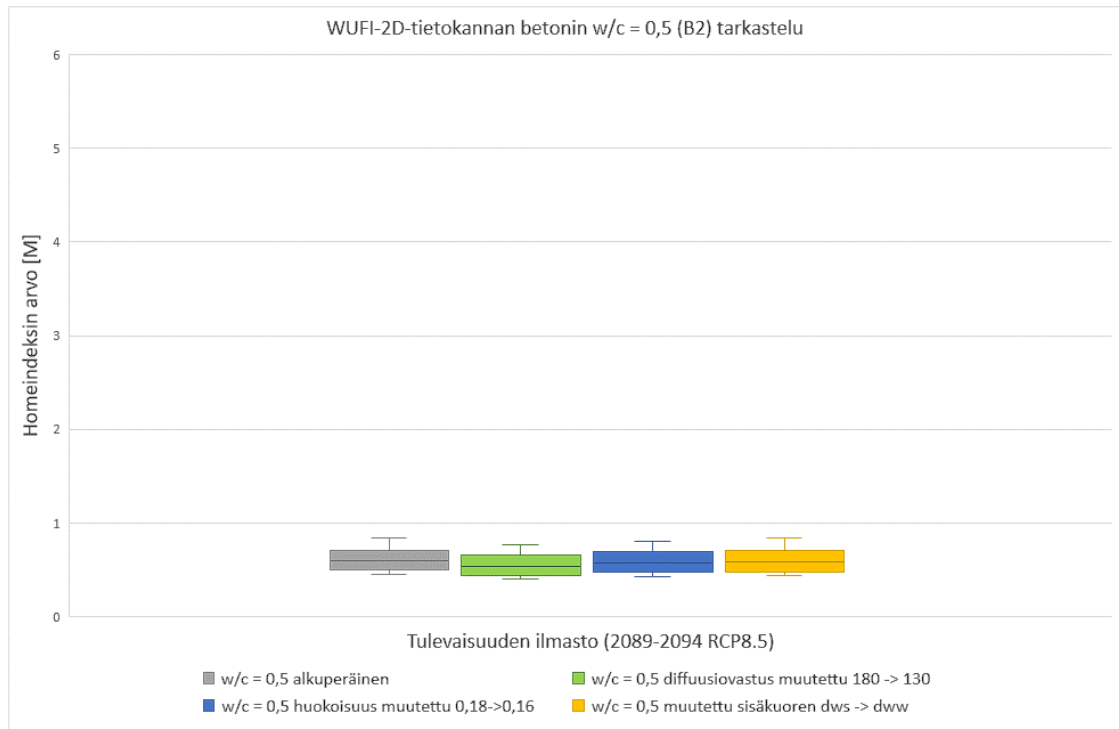
Kuva 35. Betonien kosteusdiffusiviteetit D_{ws} kosteuspitoisuuden funktiona.



Kuva 36. Betonien kosteusdiffusiviteetit D_{ww} kosteuspitoisuuden funktiona.

Betoneille testattiin kosteusdiffusiviteettien muutosten lisäksi muun muassa myös diffuusiovastuksen ja huokoisuuden muutoksen variaatioita lyhyemmällä laskenta-ajalla.

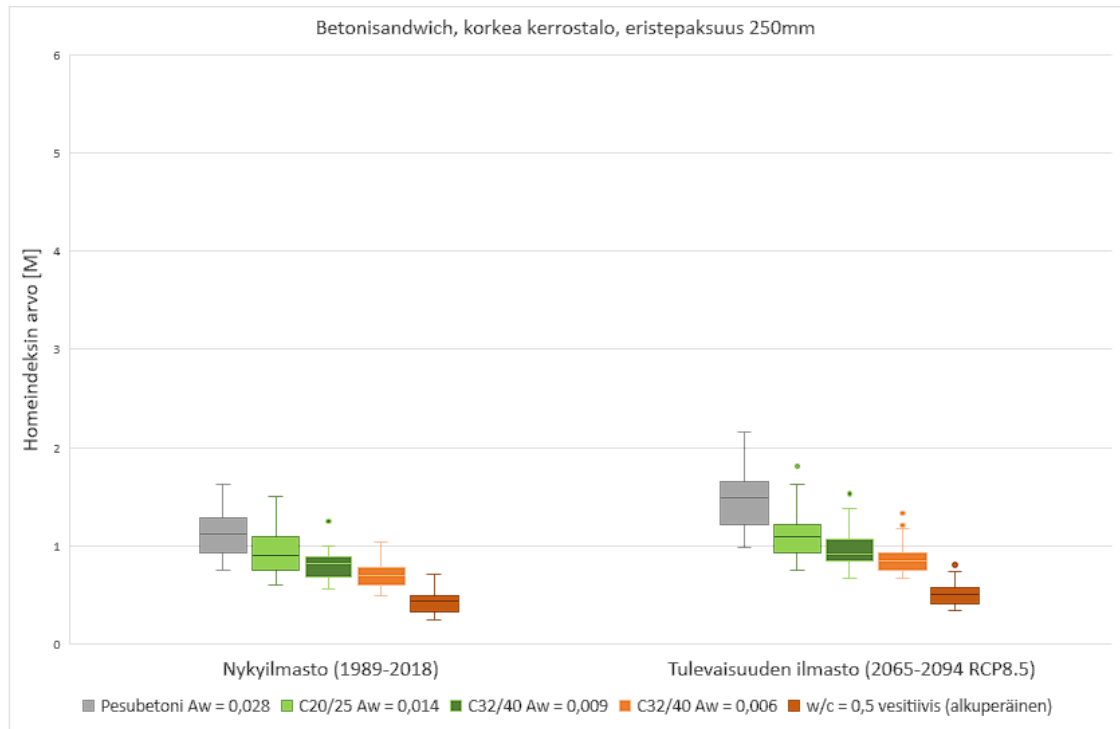
Kuvassa 37 on esitetty huokoisuuden, diffuusiovastuksen ja sisäkuoren kosteusdiffusiviteetin muuttamisen vaikutukset betonille B2 (WUFI-tietokannan betoni $w/c = 0,5$). Betonille suurin vaikutus aikaisemmin esitetyn diffusiviteettien skaalaamisen lisäksi oli diffuusiovastuksen pienentämisellä, mutta vaikutukset tuloksiin olivat kuitenkin hyvin pieniä.



Kuva 37. Betonin B2 ominaisuuksien muutosten vertailu mineraalivilla lämmöneristeen (M1) ulkopinnan homeindeksin avulla etelän julkisivulle Vantaan ilmastossa (HHL3).

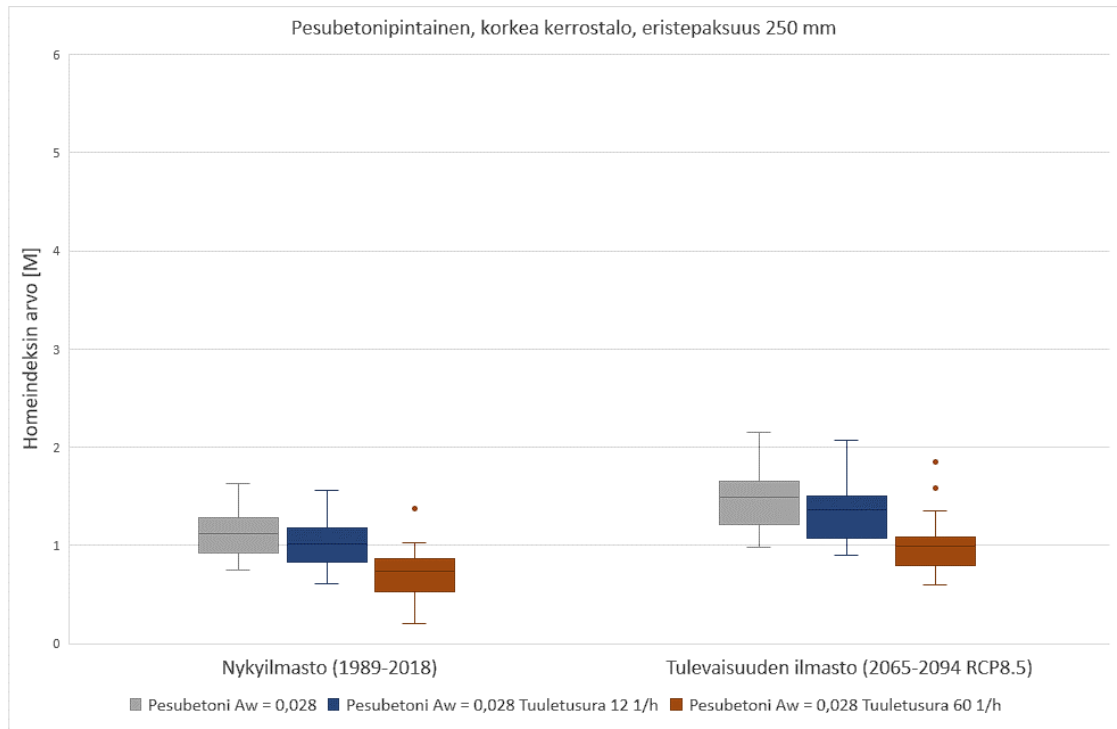
7.2.2 Laskentatulokset

Tässä luvussa on esitetty betonisandwich-rakenteiden eristepaksuuden kasvattamisen, pinnoitteiden sekä tuuletusurien vaikutuksia. Kuvassa 38 on esitetty betonisandwich-rakenteita käyttäen 250 mm:n eristepaksuutta (mineraalivilla MV1 korvattu pienemmän lämmönjohtavuuden mineraalivillalla MV2). Edellisen luvun kuvan 34 rakenteisiin verrattuna eristepaksuuden kasvattaminen yhdessä uudemman eristemateriaalin käyttämisen kanssa ei juuri muuta homeindeksin arvoa tutkituilla tapauksilla. Tulokset eri betonivariaatioista tehtyjen betonisandwich-rakenteiden välillä vastaavat pienemmällä eristepaksuudella saatuja tuloksia ja betonivariaatiot, joilla on korkeampi kosteusdiffusiviteetti, saavat myös suurempia homeindeksin arvoja (vrt. kuva 34). Pienimpien kosteusdiffusiviteetin betonirakenteiden homeindeksin arvot jäävät pääosin yhden alapuolelle.



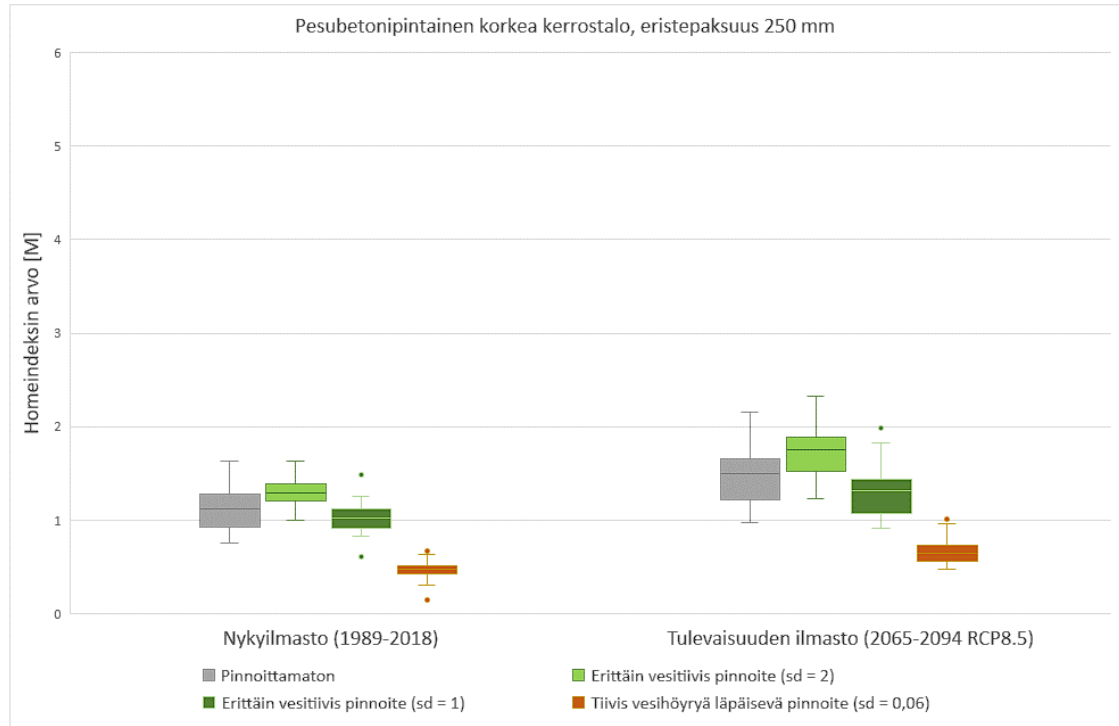
Kuva 38. Betonisandwich-rakenteen eri betonivaihtoehtojen mineraalivilla lämmöneristeen (HHL3) ulkopinnan homeindeksin vertailu etelän julkisivulle Vantaan ilmastossa.

Kuvassa 38 esitetyistä betonisandwich-rakenteista tarkasteluun otettiin homeen kasvua ajatellen kaikista otollisin variaatio *Pesubetoni* $Aw = 0,028$ ja rakenteella testattiin tuuletusurien vaikutusta tuloksiin. Tuuletusurallisen betonisandwich-rakenteen kriittisin kohta oli mahdollisimman kaukana tuuletusurasta. Tuuletusurien vaikutukset tuloksiin on esitetty kuvassa 39. Tuloksista havaitaan, että jo pienikin ilmanvaihtuvuus tuuletusurassa laskee homeindeksin arvoa, suuremmalla ilmanvaihtuvuudella on jo merkittävä ero. Suurimman ilmanvaihtuvuuden variaatiolla homeindeksin mediaani pysyy alle yhden tulevaisuudenkin ilmastossa.



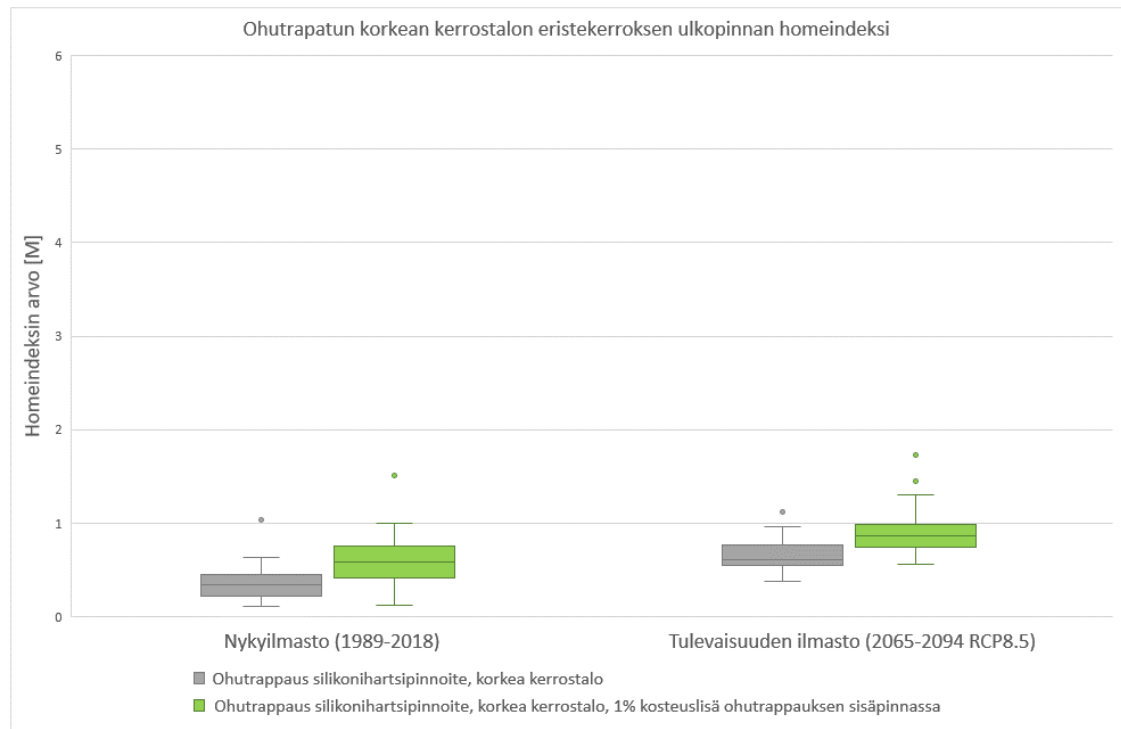
Kuva 39. *Betonisandwich-rakenteen tuuletusurien vaikutusten vertailu mineraalivilla lämmöneristeen (HHL3) ulkopinnan homeindeksin avulla etelän julkisivulle Vantaan ilmastossa.*

Kuvassa 39 esitetylle betonisandwich-rakenteen perustapaukselle *Pesubetoni* $A_w = 0,028$ testattiin myös pinnoitteiden vaikutusta homeindeksin arvoon. Variaatiot olivat hyvin vesitiivis pinnoite kahdella eri diffuusiovastuksella sekä hieman vähemmän vesitiivis pinnoite hyvällä vesihöyrynläpäisevyydellä. Kuvan 40 tuloksista havaitaan, että vesitiiviillä pinnoitteella pinnan suuri suhteellinen diffuusiovastus jopa heikentää rakennetta ja lisää homeen kasvun riskiä. Hyvin vesihöyryä läpäisevä pinnoite puolestaan vähentää homeindeksin arvoa huomattavasti ja homeindeksin arvo pysyy yhtä poikkeavaa vuotta lukuun ottamatta alle yhden myös tulevaisuuden ilmastossa.



Kuva 40. Betonisandwich-rakenteen pinnoitteiden vaikutusten vertailu mineraalivilla lämmöneristeen (HHL3) ulkopinnan homeindeksin avulla etelän julkisivulle Vantaan ilmastossa.

Silikonihartsipinnoitettua ohutrappaus-eristejärjestelmää tutkittiin yhdellä perustapauksella ja tapauksesta tehtiin variaatio, jossa 1 % sadevedestä pääsi kulkeutumaan ohutrappauksen sisäpintaan. Kuvan 41 tuloksista havaitaan, että ohutrappaus-eristejärjestelmän perustapauksen homeindeksi pysyy tulevaisuudessakin alle homeindeksin arvon 1. Kosteuslisän sisältämässä rakenteessa tulevaisuuden ilmastossa ainoastaan ylin 25. persentiili ylittää homeindeksin arvon 1.



Kuva 41. Silikonihartsipinnoitteen ohutrappaus-eristejärjestelmällisen korkean kerrostalon perustapauksen ja kosteusliisän vertailu mineraalivilla lämmöneristeen (HHL3) ulkopinnan homeindeksin avulla etelän julkisivulle Vantaan ilmastossa.

7.2.3 Yhteenveto betonijulkisivuista

Tietokannan alkuperäisten betonien *B1* ja *B2* kosteusdiffusiviteettien suuruusluokat sekä kuvaajien muodot poikkesivat huomattavasti toisistaan. Betonin kosteusdiffusiviteettien muuttamisella on huomattava vaikutus tuloksiin. Kosteusdiffusiviteettejä skaalaamalla matalammaksi kohti vesitiivistä betonia saatiin tulokseksi pienempiä homeindeksin arvoja.

Betonisandwich-rakenteissa kriittisimmät tulokset saatiin betonilla, jonka kosteuden-siirto-ominaisuuksien voidaan sanoa vastaavaan esimerkiksi hyvin huokoista tai halkeilutta betonia (tässä tutkimuksessa nimetty pesubetoniksi). Vesitiiviillä vesihöyryä hyvin läpäisevällä pinnoitteella ja toimivilla tuuletusurilla voidaan parantaa lämmöneristeen ulkopinnan olosuhteita merkittävästi.

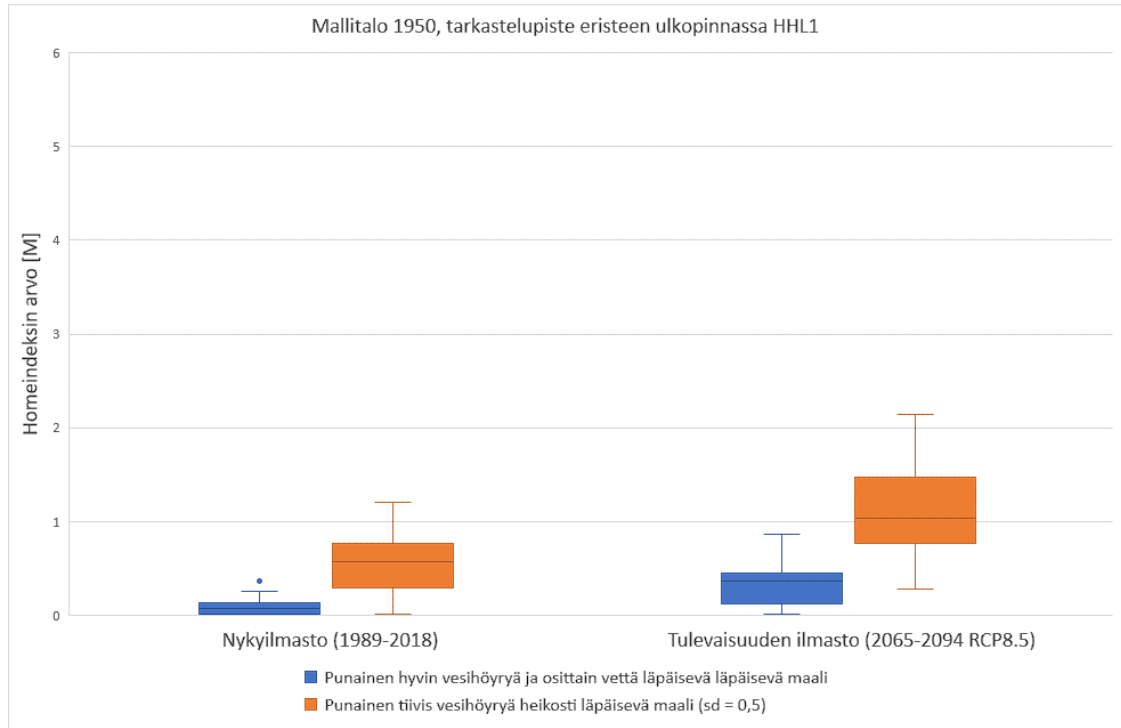
Betoni on simuloitavana rakenteena haastava ja oikeanlaisen betonin valinta esimerkiksi vanhan betonin variaatioksi vaatii vertailudataa oikeista rakenteista yhdessä simulointiohjelmalla varten kokeellisesti määritettyjen tarkempien kosteusdiffusiviteettien kanssa. Tulosten vertailu esimerkiksi materiaalinäytteenotoista saatuihin tuloksiin voi kuitenkin antaa suuntaa millaisella variaatiolla olisi mahdollista päästä lähelle todellista tilannetta.

7.3 Puujulkisivut

7.3.1 1950-mallitalo

Vanhan talon simulointiin liittyi huomattavasti epävarmuutta materiaalien ja ulkoseinära-kenteiden suuren vaihtelun vuoksi. Mallitalon simuloinnissa pyrittiin selvittämään maali-pinnan ominaisuuksien vaikutusta valitun rakenneratkaisun purueristeen ulkopinnan ho-meindeksin arvoon. Tarkastelupiste valittiin runkojaon keskeltä. Maalipinnan väriksi va-littiin tässä tapauksessa ainoastaan punainen, joka voi lähtökohtaisesti olla laskennalli-esti epävarmalla puolella, mutta ei korosta liikaa mahdollisia epävarmuustekijöitä las-kennassa ja lähellä ulkopintaa olevassa tarkastelupisteessä. Rakenteessa ei ollut tuule-tusväliä, joten sitä tutkittiin viistosateen kannalta kriittisellä etelän julkisivulla Vantaan il-mastossa.

Ensimmäinen maalivariaatio oli hyvin vesihöyryä läpäisevänä ja osittain vettä läpäisevä pyrkien vastaamaan yleisesti vanhoissa rakennuksissa käytettyä keittomaalia. Toinen maalivariaatio oli vesitiiviimpi, mutta heikosti vesihöyryä läpäisevä maali. Kuvan 42 tu-loksista voidaan selkeästi havaita, että hyvin vesihöyryä läpäisevän maalin homeindeksi pysyy huomattavasti heikosti vesihöyryä läpäisevää alempana, vaikka vesihöyryä läpäi-sevä maali läpäisee myös huomattavasti enemmän vettä. Hyvin vesihöyryä läpäisevän maalin rakenne pysyy tulevaisuuden ilmastossakin alle homeindeksin arvon 1. Suurin osa huonosti vesihöyryä läpäisevän maalin homeindeksien arvoista nousee tulevaisuu-den ilmastossa homeindeksin arvon 1 yläpuolelle, minkä lisäksi osassa vuosista ylite-tään myös arvo 2

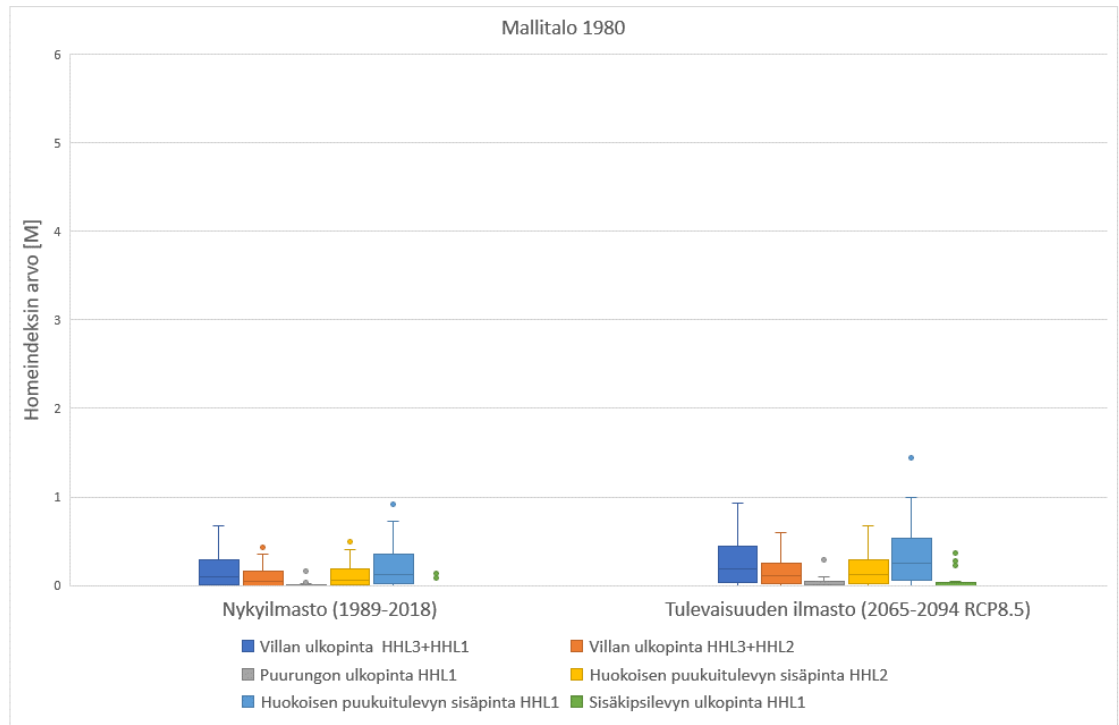


Kuva 42. Maalipinnan merkityksen vertailu 1950-luvun mallitalossa purueristeen (HHL1) ulkopinnan homeindeksiä vertailemalla etelän julkisivulla Vantaan ilmastossa.

7.3.2 1980-mallitalo

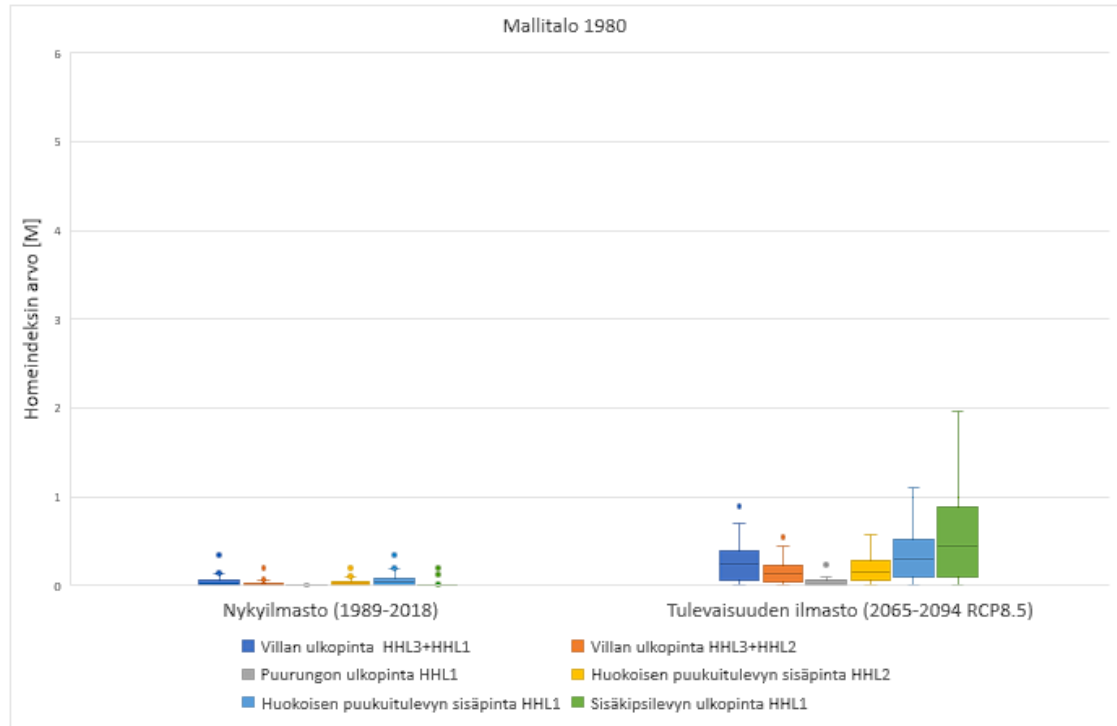
Tarkasteltavat pisteet puurunkoisessa 1980-luvun mallitalossa olivat puurungon ulkopinta, eristevillan ulkopinta runkojaon keskeltä, tuulensuojapuukuitulevyn sisäpinta runkojaon keskeltä ja sisäverhouskipsilevyn ulkopinta rungon kohdalta. Rakenne tutkittiin etelän julkisivulle Vantaan ilmastossa sekä pohjoisen julkisivulle Jokioisen ilmastossa. Kriittisin piste homeen kasvun tarkasteluiden kannalta oli Jokioisen ilmastossa villan ulkopinta ja huokoisenpuukuitulevyn sisäpinta runkojaon keskeltä eli mallissa mahdollisimman kaukana runkotolpista. Vantaan ilmastossa suurimmat homeindeksin arvot tulivat sisäkipsilevyn ulkopinnasta.

Kuvan 43 homeindekseissä nähdään pieni nousu tulevaisuuden ilmastossa, mutta arvot jäävät silti homeindeksin 1 alapuolelle. Tuloksissa ainoa homeindeksin 1 ylitys on poikkeava vuosi puukuitulevyn sisäpinnassa, kun käytettiin hyvin homeutumisherkkää, homeutumisherkkyysluokan HHL1 puukuitulevyä.



Kuva 43. 1980-luvun mallitalon homeindeksit eri tarkastelupisteissä pohjoisen julkisivulle Jokioisen ilmastossa.

Kuvan 44 tuloksista havaitaan homeindeksien olevan samaa suuruusluokkaa myös Vantaan ilmastossa. Vantaan nykyilmastossa homeindeksit pysyvät hyvin lähellä nollaa ja tulevaisuuden ilmastossa suurin ero Jokioisen ilmastoon on sisäkipsilevyn ulkopinnassa, jossa tuloksiin vaikuttaa erityisesti käytetty sisäilman kosteuslisä.



Kuva 44. 1980-luvun mallitalon homeindeksit eri tarkastelupisteissä etelän julkisivulle Vantaan ilmastossa.

7.4 Ulkoseinärakenteiden homehtumisriskin arviointi

Tähän lukuun on koottu tulokset käyttäen tarkastelupisteinä lämmöneristekerroksen ulkopintaa. Tulokset ovat siten vertailtavia näytteenottokohdan mukaisesti, sillä ulkoseinärakenteiden mikrobinäytteet on useimmiten otettu eristekerroksesta. Homeen kasvun riskiä arvioitiin 30 vuoden mittaisista tarkastelujaksoista perustuen siihen, kuinka suuressa määrässä vuosia ylitettiin tiettyjä homeindeksin raja-arvoja. Taulukossa 15 on esitetty tässä tutkimuksessa käytetty ulkoseinärakenteiden riskiluokitus homeen kasvulle.

Taulukko 15. Homeen kasvulle käytetty riskiluokitus.

Homeindeksin vuoden maksimiarvo [M] 30-vuoden tarkastelussa	Riski homeen kasvulle rakenteessa	Värikoodi
Mediaani > 3	Erittäinen merkittävä	Red
Ylin 75 persentiili > 2	Merkittävä	Orange
Mediaani > 2	Kohtalainen	Yellow
Ylin 75 persentiili > 1	Vähäinen	Light Yellow
Mediaani > 1	Erittäin vähäinen	Very Light Yellow
Mediaani < 1	Epätodennäköinen	White

Rakenteista kerättiin homeen kasvulle kaikista otollisimmat tapaukset lämmöneristeen ulkopintojen tarkastelupisteistä. Taulukossa 16 on esitetty taulukon 15 riskiluokituksen

mukaisesti tulokset tarkastelluista rakenteista. Tuloksissa on esitetty rakenteet, joissa homeindeksi nousee lämmöneristeen ulkopinnassa vähintäänkin tasolle *erittäin vähäinen*.

Taulukko 16. *Tutkittujen ulkoseinärakenteiden vertailu lämmöneristeen ulkopinnan homeen kasvun riskin perusteella. Taulukossa ei ole esitetty tutkittuja ulkoseinärakenteita, joiden homeen kasvun riski jää tasolle epätodennäköinen.*

Rakenne	Nykyilmasto	Tulevaisuuden ilmasto
Tiilimuurattu puurunkoinen pientalo, tuuletusvälissä laastipurseita, tuulensuojakipsilevyn homeutumisherkkyyssluokka HHL1		
Tiilimuurattu puurunkoinen pientalo, tuuletusvälissä laastipurseita, tuulensuojakipsilevyn homeutumisherkkyyssluokka HHL2		
Tiilimuurattu puurunkoinen pientalo, tuuletusvälissä laastipurseita, tuulensuojakipsilevyn homeutumisherkkyyssluokka HHL1 (suojattu tuulensuojavillalla)		
Tiilimuurattu puurunkoinen pientalo, tuuletusvälissä laastipurseita, tuulensuojakipsilevyn homeutumisherkkyyssluokka HHL2 (suojattu tuulensuojavillalla)		
Tiilimuurattu puurunkoinen pientalo, tuuletusväli avoin, eristepaksuus 200 mm tuulensuojakipsilevyn homeutumisherkkyyssluokka HHL1		
Tiilimuurattu puurunkoinen pientalo, tuuletusväli avoin, eristepaksuus 100 mm tuulensuojakipsilevyn homeutumisherkkyyssluokka HHL1		
Tiilimuurattu puurunkoinen pientalo, tuuletusväli avoin, eristepaksuus 200 mm tuulensuojakipsilevyn homeutumisherkkyyssluokka HHL2		
Tiilimuurattu puurunkoinen pientalo, tuuletusväli avoin, eristepaksuus 100 mm tuulensuojakipsilevyn homeutumisherkkyyssluokka HHL2		
Tiili-villa-tiili/betoni, matalat kerrostalot, ei tuuletusväliä		
Tiili-villa-tiili, matalat kerrostalot eristepaksuus 250 mm, tuuletusvälissä laastipurseita		
Tiili-villa-tiili, matalat kerrostalot eristepaksuus 60-100mm, tuuletusvälissä laastipurseita		
Tiili-villa-tiili, pientalot, ei tuuletusväliä		
Hyvin suurella vesihöyrynvastuksella pinnoitettu betonisandwich-rakenne ilman tuuletusuria		
Betonisandwich-rakenteet ilman tuuletusuria, vedenimuominaisuuksilta hyvin voimakkaat betonit(esim. pesubetoni)		
Betonisandwich-rakenteet heikoilla tuuletusurilla, vedenimuominaisuuksilta hyvin voimakkaat betonit(esim. pesubetoni)		
Betonisandwich-rakenteet ilman tuuletusuria, vedenimuominaisuuksilta voimakkaat betonit (esim. C20/25)		
Tuulettumaton purulla eristetty omakotitalo huonosti vesihöyryä läpäisevällä maalilla		

Tuloksista nähdään, että suurimmat riskit homeen kasvulle painottuvat puurunkoisiin tiilimuurattuihin rakenteisiin, joissa on käytetty homeutumisherkkyyssluokalta hyvin herkkää (HHL1) tai herkkää (HHL2) tuulensuojaa ja joiden tuuletusvälissä oli laastipurseita. Tutkituista betonirakenteista homeen kasvun riskinarvioinnissa esille nousivat ainoastaan kapillaarisilta vedenimuominaisuuksilta aktiivisimmat betonit sekä betonirakenne, jossa oli käytetty vesi- ja vesihöyrytiivistä pinnoitetta. Tässä tutkimuksessa tarkasteluissa puujulkisivujen rakenteissa ei tullut esille suuria homeindeksin arvoja ja homeutumISRISKIN

vertailussa esille nousi ainoastaan purueristetty tuulettumaton rakenne, jonka julkisivun pinnalla käytettiin huonosti vesihöyryä läpäisevää maalia.

7.5 Virhelähteet

Mallinnus on suoritettu pääosin ideaaleissa tapauksissa, joissa rakentamisen laadusta tai ajan mittaan tapahtuvasta ulkoseinärakenteiden tiiviyden heikentymisestä johtuvia epäkohtia ei ole otettu huomioon. Huomioimatta on jätetty muun muassa:

- Halkeilu esimerkiksi betonissa, tiilessä tai käytetyissä pinnoitteissa
- Höyrynsulun tai muun merkittävän diffuusiovastuksen sisältävän kalvon repeytyminen tai saumojen epätiiviydet
- Erialaisten rakenneliittymien esimerkiksi ulkonurkkien ja perusmuurin liitokset ja niiden viilentävä vaikutus muun muassa runkotolppien olosuhteisiin.

Mallinnuksessa käytettävissä lähtötiedoissa on myös useita tekijöitä, jotka voivat parantaa tai heikentää ulkoseinärakenteiden kosteusteknistä toimintaa. Tässä tutkimuksessa tuloksiin on vaikuttanut esimerkiksi:

Käytetty säädata (ilmastonmuutosskenaarion paikkansapitävyys)

- Rakenteen viistosaderasituksen arviointi
- Sisäilman kosteuslisän taulukkoarvot
- Sisäilman vakio lämpötila
- Tuulen huomiotta jättäminen lämmönsiirtokertoimissa
- Tuuletusuran ja tuuletusvälien ilmanvaihtuvuuden vakioarvot
- Rakennusmateriaalien ominaisuuksien vaihteluväli ja todenmukaisuus. Samalla rakennusmateriaalilla voi olla monia eri materiaalivaihtoehtoja, joiden välillä voi simuloinnissa tulla merkittäviäkin eroja.
- WUFI-2D-ohjelmassa ei ole materiaaliomaisuuksia suoraan sadeveden kanssa yhteydessä oleville pinnoitteille. Tämä aiheuttaa huomattavaa epävarmuutta muun muassa julkisivun maalipinnoitteiden käytössä. Julkisivussa käytetyt maalit ovat hyvä esimerkki materiaalista, joka voi mallissa huomattavasti parantaa tai huonontaa tarkastelupisteen olosuhteita.

Homemallin käyttöön liittyi seuraavia epävarmuustekijöitä:

- Eri homehtumisloukkien väliset erot voivat olla suuria, mutta jotkut materiaaleista voi perustellusti sijoittaa useaan eri luokkaan, jos täysin tarkkaa lähtötietoa ei ole tarjolla (esimerkiksi tuulensuojakipsi ja huokoiset puukuitulevyt)
- Homemallia ei ole kehitetty pitkän aikavälin kumulatiiviseen homeindeksin laskentaan. Tässä tutkimuksessa tulokset päädyttiin pääosin esittämään vuosittaisista keskiarvoista, eikä kumulatiivista arvoa käytetty kuin tiili-villa-tiili-rakenteiden perustapauksissa.
- Homemallia ei ole validoitu oikeista rakennuksista löytyviin vaurioihin verrattuna
- Orgaaninen materiaali eristekerroksessa rakentamisen ajalta tai ilnavuotojen seurauksena voi todellisuudessa kasvattaa homeen kasvun riskiä.

8. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkitut ulkoseinärakenteet keskittyivät olemassa olevan rakennuskannan asuinrakennuksiin, mutta tuloksia voidaan hyödyntää myös muissa rakennusryhmissä, sillä vastavia rakenteita on käytetty myös opetusrakennuksissa, hoitoalan rakennuksissa sekä liike- ja toimistorakennuksissa. Ilmastonmuutoksen vaikutus oli näkyvässä kaikissa tuloksissa. Jokaisen tarkasteltavan rakenteen homeindeksin mediaani kasvoi nykyilmaston ja tulevaisuuden ilmaston 30 vuoden tarkastelujaksojen välillä. Suurimmat muutokset nykyilmaston ja tulevaisuuden ilmaston välillä näkyivät puurunkoisten tiilijulkisivuisten ulkoseinärakenteiden tapauksissa, joissa tuuletusvälit olivat avoimina ja tuulensuojakipsilevyn ulkopuolella ei ollut tuulensuojavillaa.

Tutkituista rakenteista kaikista homehtumisherkeimmät rakenteet olivat eristekerroksen ulkopinnan tarkasteluissa tiilijulkisivuiset puurunkoiset rakenteet. Homehtumisriskiä tiilimuuruissa puurunkoisissa rakenteissa kasvattivat tuulensuojalevyt, joiden homehtumisherkkyyssluokka oli hyvin herkkä (HHL1) tai herkkä (HHL2) sekä tuuletusvälin heikko ilmanvaihtuvuus. Seuraavaksi suurin riski homeen kasvulle oli matalissa kerrostaloissa, joissa julkisivurakenteena oli tiilikuorimuri ilman tuuletusväliä. Rakennetta auttoi tuuletusvälin lisääminen, mutta laastipurseiden heikentämä ilmanvaihtuvuus nosti homeen kasvun riskiä huomattavasti verrattuna täysin avoimeen tuuletusväliin. Saderasituksen vaikutus oli havaittavissa tiili-villa-tiili-rakenteissa korkeampana homeindeksinä matalissa kerrostaloissa verrattuna pientaloihin.

Tiilimuurattujen puurunkoisten pientalojen runkotolpan ulkopinnan homeindeksin arvoksi saatiin tulevaisuuden ilmastossa lämmöneristeen ulkopintaa suurempia maksimiarvoja. Avoimen tuuletusvälin rakenteissa tulevaisuuden ilmaston tarkastelujakson homeindeksin mediaani oli kuitenkin kahdessa tapauksessa lämmöneristeen ulkopinnassa puurungon ulkopintaa korkeampi, jos tuulensuojan homehtumisherkkyyssluokka oletettiin hyvin herkäksi (HHL1). Kaikkein suurimmat homeindeksin arvot saatiin tuulensuojalevyn sisäpinnasta, mikäli sen homehtumisherkkyyssluokka oli hyvin herkkä (HHL1). Tuulensuoja kuitenkin kuuluu kantavan rakenteen ja lämmöneristekerroksen ulkopuolelle, joten sitä ei tulisi suoraan verrata puurungon ja lämmöneristeen tarkastelupisteisiin. Tiilimuuratun puurunkoisen laastipurseita täynnä olevan tuuletusvälin rakenteessa homeindeksin kasvua näkyi myös tulevaisuuden ilmastossa puurungon sisäpinnassa.

Betonijulkisivuista homehtumisriskin osalta esiin nousivat kapillaarisilta vedenimuominaisuuksilta aktiivisimmat betonit sekä betonirakenne, jossa oli käytetty vesi- ja vesihöyrytiivistä pinnoitetta. Betonimateriaalien osalta havaittiin huomattavaa vaihtelua tuloksissa ja vesitiiviimpiä betonilaatuja kohti mentäessä homeindeksin arvot putosivat ja jäivät pääosin alle homeindeksin arvon 1. Betonisandwich-rakenteiden lämmöneristeen ulkopinnan olosuhteita paransi myös toimivat tuuletusurat ja vesitiivis hyvin vesihöyryä läpäisevä pinnoite.

Tutkittujen puujulkisivujen osalta suurimmat homeindeksin arvot saatiin vanhalla puueristetyllä tuulettumattomalla rakenteella, jossa julkisivun pinnalla käytettiin huonosti vesihöyryä läpäisevää maalia. Uudemmassa rakenteessa 1980-luvulta ei havaittu homeindeksin arvon 1 ylityksiä eristeen ulkopinnassa tai puurungon ulkopinnassa.

9. YHTEENVETO JA LISÄTUTKIMUSTARPEET

Tutkimuksen tavoitteena oli luoda mahdollisimman useita olemassa olevan rakennuskannan rakenteita WUFI-2D-ohjelman simulointimalleiksi. Olemassa olevasta rakennuskannasta erilaisia rakennetyyppejä voidaan listata useita satoja, joten tässä tutkimuksessa pyrittiin löytämään sopivia perustapauksia, joilla rakennekantaa saadaan simuloitua laajasti. Tutkittavien ulkoseinärakenteiden määrää jouduttiin tutkimuksen edetessä rajaamaan, eikä eristepaksuuden kasvattamisessa tarkasteltu kaikkia vuosien saatossa käytössä olleita eristepaksuusvaihtoehtoja. Simulointimallit ovat kuitenkin helposti muutettavissa hankkeen edetessä, joten simuloitavien ulkoseinärakenteiden lisääminen onnistuu vaivattomasti.

Tutkimuksen yhtenä tavoitteena oli myös järjestää rakenteita homeen kasvun riskin mukaiseen järjestykseen. Homeindeksi ei ota kantaa materiaalisissa esiintyvien mikrobien laatuun ja sitä ei voi täysin suoraan verrata materiaalinäytteistä saatuihin tuloksiin. Tutkimuksessa 30 vuoden laskennasta saatuihin homeindeksin vuosittaisiin maksimiarvoihin perustuen esitettiin rakenteille riskiluokitus, jolla rakenteita voidaan vertailla ja sijoittaa riskitason mukaiseen järjestykseen. Tutkimuksessa homeen kasvulle esitettyä riskiluokitusta voidaan hyödyntää hankkeessa materiaalinäytteidenottoja suunniteltaessa. Riskiluokitusta voi ja pitääkin muuttaa hankkeen edetessä perustuen materiaalinäytteenottoista saatuihin tuloksiin.

Tutkituista rakenteista homehtumisherkeimmät olivat tiilimuurattuja puurunkoisia rakenteita. Rakentamisen laatuun liittyvänä tekijänä tiilirakenteissa tutkittiin laastipurseiden aiheuttaman pienemmän ilmanvaihtuvuuden vaikutusta tuloksiin. Rakentamisen laatuun olisi puurunkoisten seinien osalta voinut ottaa kantaa huomioimalla myös ulkoseinärakenteiden epätiiviyttä konvektion avulla, mutta tiilijulkisivujen osalta homeriskit olivat jo muutenkin muita rakenteita suurempia. Tutkimuksessa ei tehty eri tiilityyppien vertailua, mikä on suositeltavaa ottaa mukaan variaatioihin mahdollisissa jatkotutkimuksissa.

Tutkituissa puujulkisivuissa ei havaittu suuria riskejä. Purueristetyssä rakenteessa julkisivumaalipinnan suuri diffuusiovastus nosti homeindeksin arvoa huomattavasti lämmöneristeen ulkopinnassa. Puujulkisivujen tarkastellut rakennevariaatiot jäivät tämän tutkimuksen osalta vähäiseksi. Puujulkisivujen simulointia on suositeltava jatkaa tuulettuvien ulkoseinärakenteiden osalta eristepaksuuden muutoksilla, sisäpuolisen koolauk-

sen ja eristeen lisäämisellä sekä konvektion huomioimisella tarkasteluissa. Tarkasteluihin on suositeltavaa lisätä myös höyrynsulun osittainen vaurio tai kokonaan puuttuminen rakenteesta. Vanhan purueristetyin rakennemallin tarkastelua voidaan viedä pidemmälle eri rakennevariaatioiden kautta. Vanhaan purueristettyyn rakenteeseen liittyy huomattavasti epävarmuutta tutkittujen rakenteiden ja materiaalien osalta.

Tulevaisuuden tutkimuksissa on tärkeää ottaa huomioon materiaaliomaisuuksien merkitys tulosten kannalta. Materiaalien kosteudensiirto-ominaisuuksien tarkka määrittäminen on mallinnuksen kannalta yksi oleellisin tulosten oikeellisuuteen vaikuttava tekijä. Ominaisuuksien vaikutus korostuu sadeveteen yhteydessä olevilla pinnoilla. Tässä tutkimuksessa havaittiin huomattavaa epävarmuutta erityisesti betoniin ja pinnoitteisiin liittyvissä materiaalivalinnoissa. Betonimateriaalien välinen vaihtelu oli suurta ja betoni tarvitsee materiaalina paljon lisätutkimuksia. Betonisandwich-rakenteille suurimmat homeindeksin arvot saatiin käyttämällä kapillaarisilta vedenimuominaisuuksilta mahdollisimman aktiivista betonia. Betonille sopivaa materiaalia voi hankkeen edetessä määrittää vertailemalla tässä tutkimuksessa saatuja tuloksia betonirakenteista otettuihin materiaalinäytteisiin. Maaleihin liittyy paljon epävarmuutta ja valmiita materiaalitiedostoja ei ole WUFI-2D-ohjelman tietokannoista saatavilla. Tässä tutkimuksessa WUFI-2D-ohjelmaan rakennettujen pinnoitemateriaalien tulokset olivat loogisia, mutta lisätutkimuksia tarvitaan erityisesti oikeiden ulkoseinärakenteiden mittausten ja materiaaliominaisuuksien tarkemman määrittämisen suhteen.

Työtä tehdessä tuli selkeäksi, että jokaisen materiaalin ja rakenteen osalta oli jo yksinään tarpeeksi työtä opinnäytetyön aiheeksi. Tutkimuksen alussa tehty oletus, että materiaalit voi helposti valita materiaalikirjastoista tai poimia yksinkertaisiin perustietoihin perustuen vanhoista lähteistä osoittautui nopeasti virheelliseksi. Suomalaisen rakennuskannan materiaaleista ja erityisesti tarkemmista WUFI-2D-simulointiohjelman vaatimista kosteudensiirto-ominaisuuksista on vähän kirjallisuutta tarjolla. Suomalaisen rakennuskannan julkisivumateriaalien kosteudensiirto-ominaisuuksien tarkempi määrittäminen on tulevaisuuden kannalta yksi tärkeimmistä tutkimuksen kohteista, vaikka diffusiviteettien kokeellinen määrittäminen on kallista ja aikaa vievää. Simulointimallien ja materiaalien valintojen tueksi olisi myös erittäin tärkeää saada avointa mittausdataa oikeista rakenteista.

LÄHTEET

ASHRAE 160. (2009). Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings. ANSI/ASHRAE Standard 160–2009. 16 p.

ASHRAE 160. (2021). Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings. ANSI/ASHRAE Standard 160–2021. 24 p.

Atkins, P. & De Paula, J. (2010). Atkins' Physical Chemistry. 9th ed. Oxford: Oxford University Press, 2010. 972 p.

Björkholtz, D. (1997). Lämpö ja kosteus. Rakennusfysiikka. Rakennustieto Oy. 2.painos. 150 s.

Burnett, E. & Straube, J. (1995). Vents, Ventilation Drying, and Pressure Moderation. Research report. Building Engineering Group. University of Waterloo. 160 p.

Fagerholm, N.-E. (1986) Termodynamiikka. Espoo: Otakustantamo 382 s.

Finken, G. R., Bjarløv, S. P.; Peuhkuri, R. H. (2016) Effect of façade impregnation on feasibility of capillary active thermal internal insulation for a historic dormitory – A hygrothermal simulation study. Construction & building materials 113. pp.202–214.

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

Hens, H. S. L. C. (2007) Building physics--heat, air and moisture fundamentals and engineering methods with examples and exercises. Berlin: Ernst & Sohn. 270 p.

Hens, H. S. L. (2010) Applied Building Physics: Boundary Conditions, Building Performance and Material Properties. Newark: Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und Technische. 322 p.

Hukka, A. & Viitanen, H. A. (1999). A mathematical model of mould growth on wooden material. Wood Science and Technology, 33, pp.475-485.

Hyttinen, R. (1976). Omakotirakentajan opas: suunnittelunäkökohtia ja kustannustietoa. 2. p. Helsinki: Rakentajain kustannus. 136 s.

IPCC. (2013). IPCC, 2013: Annex II: Climate System Scenario Tables [Prather, M., Flato, G., Friedlingstein, P., Jones, C., Lamarque, J.-F., Liao H. & Rasch, P. (eds.)]. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex V. & Midgley P.M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC. (2021): IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R. & Zhou, B. (eds.)]. Cambridge University Press.

Jylhä, K., Ruosteenoja, K., Böök, H., Lindfors, A., Pirinen, P., Laapas, M. & Mäkelä, A. (2020). Nykyisen ja tulevan ilmaston säätietoja rakennusfysikaalisia laskelmia ja energialaskennan testivuotta 2020 varten. 81 s.

Karagiozis, A. N. & Kuenzel, H. M. (2010). The effect of air cavity convection on the wetting and drying behavior of wood-frame walls using a multi-physics approach. ASTM Special Technical Publication. 2010 pp. 48–67.

Kehrer, M. & Schmidt, T. (2006). Temperaturverhältnisse an Außenoberflächen unter Strahlungseinflüssen. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen, Germany. 3 p.

Krus, M. (1996). Moisture transport and storage coefficients of porous mineral building materials: Theoretical principles and new test methods. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag. 106 p + app.

Kuusisto, M. (2010). Puupinnoille soveltuvien ulkomaalien testaus ja vertailu. Metropolia Ammattikorkeakoulu. 228 s.

Künzel, H. M. (1995). Simultaneous heat and moisture transport in building components. One-and two-dimensional calculation using simple parameters. IRB-Verlag Stuttgart. 102 p. + app. Künzel, H.M., Holm, A. & Krus, M. (2008). Hygrothermal properties and behaviour of concrete. WTA-Almanach 2008 pp. 161-181

Künzel, H. M., Zirkelbach, D. & Schafaczek, B. (2012). Modelling the effect of air leakage in hygrothermal envelope simulation. 13 p.

Lahdensivu, J. & Hilliaho, K., (2010). Lämmöneristepaksuudet suomalaisissa betonielementtirakenteisissa asuinkerrostaloissa. Kiinteistöposti, 9, s. 26–28.

Lahdensivu, J. (2012) Durability Properties and Actual Deterioration of Finnish Concrete Facades and Balconies. Tampere University of Technology. 117 s. + liitteet 36 s.

Lähdesmäki, K., Vinha, J., Viitanen, H., Salminen, K., Peuhkuri, R., Ojanen, T., Paajanen, L., Iitti, H. & Strander, T. (2008). Development of an improved model for mould growth: Laboratory and field experiments. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/128620>

- Mandelin, W., Eskola P., Laiponen K. & Leka O. (1957) Jokamies rakentajana: huvila- ja omakotirakentajan opas. 4. painos. Porvoo-Hki: WSOY. 346 s.
- Muuratut rakenteet. (1983). Suomen rakennusinsinöörien liitto, RIL K7-1983.
- Mäkitalo, M. (2012). Puurunkoisten ulkoseinien kosteustekninen toimivuus nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa, Tampere University of Technology. 134 s. + liitteet 37 s. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi//handle/123456789/20999>
- Neuvonen, P. (2006). Kerrostalot 1880–2000: arkkitehtuuri, rakennustekniikka, korjaaminen, Rakennustieto, Helsinki. 288 s.
- Nevander, L. E. & Elmarsson, B. (1994). Fukthandbok. Praktik och teori. AB Svensk Byggtjänst. 526 s.
- Nieminen, J., Kouhia, I., Ojanen, T. & Knuuti, A. (2013). Kosteusteknisesti toimivia korjausrakentamisen periaateratkaisuja. VTT Technology 144. Espoo. 131 s. + liitteet 8 s.
- NOAA ESRL DATA. (2022). Earth System Research laboratories, Global Monitoring Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration. Saatavissa: <https://gml.noaa.gov/>, (viitattu 11.1.2022).
- Ojanen, T., Peuhkuri, R., Viitanen, H., Lähdesmäki, K., Vinha, J., & Salminen, K. (2011). Classification of material sensitivity - new approach for mould growth modeling. Tampere University of Technology. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/128548>
- Ormiskangas, P. (2009). Betonisandwich-elementin kosteustekninen toiminta paksuilla eristeillä, Diplomityö, Tampere University of Technology. 120 s. + liitteet 7 s. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi//handle/123456789/23180>
- Parkkinen, J. (2020). Tiili-villa-tiili-ulkoseinärakenteen rakennusfysikaalinen toiminta, Tampere University. 110 s. + liitteet. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/122200>
- Pentti, M. & Tuuliniemi, V. (1989). Julkisivupinnoitteiden kosteudensiirto-ominaisuudet: Osatutkimus SITRA:n julkisivujen pintakäsittely ja lisäeristys -projektissa, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Tampere.
- Pälve, M. (2013). Betonisandwich-seinäelementtien lämpö- ja kosteustekninen toiminta. Jyväskylä: Jyväskylän Ammattikorkeakoulu, Tekniikan ja liikenteenala. 77 s.
- Rakentajain kalenteri (1970). Rakennusmestarien keskusliitto, Rakentajain kustannus Oy, Helsinki.
- Rakentajain kalenteri (1984). Rakennusmestarien keskusliitto, Rakentajain kustannus Oy, Helsinki.

Ren, P., Feng, C. & Janssen, H. (2019). Hygric properties of porous building materials (V): Comparison of different methods to determine moisture diffusivity. *Building and Environment* 164 (2019) 106344. 9 p.

RIL 107-2012. Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry, 219 s.

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

Rinne, H. (2018). Perinnemestarin materiaalioppi: mistä on vanhat talot tehty. Helsinki: Werner Söderström Osakeyhtiö. 208 s.

Räsänen, A. (2022) Tiilien uudelleenkäytettävyyden arviointi. Tampereen yliopisto. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/137022>

Salonvaara, M. & Nieminen, J. (2003). Betonirakenteiden tuuletus ja lämmöneristävyyys. Espoo: VTT. 58 s. ISBN 951-38-6169-4 (painettu). ISBN 951-38-6170-8 (sähköinen).

Sandberg, K. (2001). Kiviainespintojen maalaus käsittelyt. Rakentajan kalenteri 2001. Rakennustietosäätiö RTS, Rakennustieto Oy ja Rakennusmestarit ja insinöörit AMK RKL ry. s. 605–620.

SFS EN ISO 6946 (2017). Building components and building elements. Thermal resistance and thermal transmittance. Calculation methods (ISO 6946:2017). Suomen standardisoimisliitto SFS ry, Helsinki.

Soulios, V., de Place Hansen, E. J. & Pehkuri, R. (2021) Hygrothermal performance of hydrophobized and internally insulated masonry walls - Simulating the impact of hydrophobization based on experimental results. *Building and environment* 187 (2021) 107410. 13 p.

Suomalainen homemalli. (2018). Saatavissa: <https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/suomalainen-homemalli/>, (viitattu 30.9.2021).

Suomen RakMK C3. (1976). Lämmöneristys. Määräykset. Helsinki: Sisäasiainministeriö. (Voimassa 1.7.1976–30.6.1979)

Suomen RakMK C3. (1978). Lämmöneristys. Määräykset. Helsinki: Sisäasiainministeriö. (Voimassa 1.7.1979–31.12.1984)

Suomen RakMK C3. (1985). Lämmöneristys. Määräykset. Helsinki: Ympäristöministeriö, Kaavoitus ja rakennusosasto. (Voimassa 1.1.1985–30.9.2003)

Suomen RakMK C3. (2003). Rakennuksen lämmöneristys. Määräykset ja ohjeet 2003. Helsinki: Ympäristöministeriö, Asunto ja rakennusosasto. (Voimassa 1.10.2003–31.12.2007)

Suomen RakMK C3. (2007). Rakennuksen lämmöneristys. Määräykset ja ohjeet 2007. Helsinki: Ympäristöministeriö, Asunto ja rakennusosasto. (Voimassa 1.1.2008–31.12.2009)

Suomen RakMK C3. (2010). Rakennuksen lämmöneristys. Määräykset ja ohjeet 2010. Helsinki: Ympäristöministeriö, Asunto ja rakennusosasto. (Voimassa 1.1.2010–31.12.2012)

Suomen RakMK C4. (1978). Lämmöneristys. Ohjeet. Helsinki: Sisäasiainministeriö. (Voimassa 27.10.1978–30.6.2012)

Suomen virallinen tilasto (2018). Suomen virallinen tilasto (SVT): Rakennukset ja kesämökit, Rakennuskanta 2018. Helsinki: Tilastokeskus. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/rakke/2018/rakke_2018_2019-05-21_kat_002_fi.html. (viitattu: 2.2.2022).

Tieteen termipankki (2021). Tieteen termipankki: Biologia: meniski. Saatavissa: <https://tieteentermipankki.fi/wiki/Biologia:meniski.> (viitattu 14.12.2021).

Tiilirakenteet (1982) Tiilirakenteet. Rakennuskirja Oy. Helsinki. 92 s.

Tuominen, E. (2016). Laastien ja betonien kapillaarisuusominaisuuksien määrittäminen vapaan veden imeytyskokeella. 141 s. + liitteet 88 s. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/handle/123456789/23934>

Tuominen, E., Ruusala, A., Laukkarinen, A., Pätsi, S., Pessi, A. & Vinha, J. (2019). Huokoisten puukuitu- ja kipsilevytuulensuojalevyjen homehtumisherkkyys, Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/129713>

Vainio, T., Lehtinen, E. & Nuuttila, H. (2005). Julkisivujen uudis- ja korjausrakentaminen. Tampere. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. 26 s. + liitteet.

Valvira (2016). Asumisterveysasteuksen soveltamisohje osa IV. Valviran julkaisuja 26.4.2016 (päivitetty 19.2.2020). Viitattu 21.1.2022.

Viitanen, H., Vinha, J., Peuhkuri, R., Ojanen, K., Lähdesmäki, K., & Salminen, K. (2008). Development of an improved model for mould growth: Modelling. Building Physics 2008 - 8th Nordic Symposium. pp. 927-934. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/128620>

Viitanen, H., Krus, M., Ojanen, T., Eitner, V., & Zirkelbach, D. (2015). Mold risk classification based on comparative evaluation of two established growth models. Energy Procedia 78, pp 1425–1430.

Viljanen, M. (1984) Lämmön siirtyminen säteilyllä rakennuksen vaipan pinnoilla. Espoo: Teknillinen korkeakoulu. 130 s.

Vinha, J., Valovirta, I., Korpi, M., Mikkilä, A. & Käkelä, P. (2005). Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona, Tampere University. 101 s. + liitteet 211 s. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/128233>

Vinha, J. (2007). Hygrothermal Performance of Timber-Framed External Walls in Finnish Climatic Conditions: A Method for Determining the Sufficient Water Vapour Resistance of the Interior Lining of a Wall Assembly, Tampere University of Technology. 338 p. + app. 10 p. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/114684>

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. (2013a). Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristykseen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa, Tampere University of Technology; Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/128222>

Vinha, J., Viitanen, H., Peuhkuri, R., Lähdesmäki, K., Ojanen, T., & Salminen, K. (2013b). VTT-TTY homemallin toimintaperiaatteet ja käyttö rakenteiden kosteusteknisen toiminnan tarkastelussa. In J. Vinha, & A. Aaltonen (Eds.), 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. s. 67–76.

Vinha, J. (2019a). RAK-33501 Rakennusfysiikka, Lämmön konvektio, Tampereen yliopisto. 45 s.

Vinha, J. (2019b). RAK-33501 Rakennusfysiikka, Materiaalien ja ilman kosteus, Tampereen yliopisto. 38 s.

WUFI-2D 4.3 Software. Application. Fraunhofer. Saatavissa: <https://wufi.de/en/>

Ympäristöministeriö. (2017). Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 1010/2017. Suomen säädöskokoelma. Helsinki. 27.12.2018. (Voimaantulo 1.1.2018.)

Ympäristöministeriö. (2018). Tyypillisiä olemassa olevien vanhojen rakennusten alkuperäisiä suunnitteluarvoja. Energiatodistusoppaan 2018 liite. 1.11.2018. Ympäristöministeriö. 49 s.

LIITE 1: WUFI-2D-OHJELMASSA KÄYTETYT MATERIAALIOMINAISUUDET

Materiaalien perustiedot						
Tunnus	Materiaali	Tiheys [kg/m ³]	Huokoisuus [m ³ /m ³]	Ominaislämpö kapasiteetti [J/(kg*K)]	Lämmön- johtavuus [W/(m*K)]	Vesihöyryn diffuusio vastuskerroin [-]
T1	Tiili	1900	0.24	850	0.6	10
MV1	Mineraalivilla	60	0.95	850	0.04	1.3
MV2	Kivivilla	37	0.97	850	0.034	1.2
MV3	Tuulensuojavilla	73	0.94	850	0.0306	1.4
SPK	Sahanpuru+kutterinlastu	149	0.89	2500	0.052	2.3
TS1	Tasoite	850	0.65	850	0.2	8.3
PK1	Tuulileijoina 12mm	270	0.85	1500	0.0465	4.8
PK2	Huokoinen puukuitulevy 12mm	234	0.85	1500	0.0465	4.6
K1	Kipsilevy	850	0.65	850	0.2	8.3
K2	Tuulensuojakipsi	774	68	1100	0.13	7.9
BVH1	Bitumivuoraushuopa 1mm	860	0.6	1500	0.12	419
HS1	Höyrynsulku 1mm	130	0.001	2300	2.3	50000
P1	Mänty	532	0.9	2700	0.1	84
P2	Kuusi	455	0.73	1400	0.09	130
BM1a	Vesitiivis vesihöyryä heikosti läpäisevä (sd = 2) pinta 1mm	2000	0.44	1000	0.7	2000
BM1b	Vesitiivis vesihöyryä heikosti läpäisevä (sd = 1) pinta 1mm	2000	0.44	1000	0.7	1000
BM2	Vesitiivis vesihöyryä läpäisevä pinta 1mm	2000	0.44	1000	0.7	60
BM3	Silikonihartsipinnoite	2000	0.44	1000	0.7	90
BM4	Silikonihartsin maali	2000	0.44	1000	0.7	46
PM1	Puumaali läpäisevä 1mm	2000	0.44	1000	0.7	10
PM2	Puumaali tiukka 1mm	2000	0.44	1000	0.7	500
B1	Betoni 1 + muokkaus a/b/c/d	2200	0.18	850	1.6	248
B2	Betoni 2 + muokkaus a	2300	0.18	850	1.6	180
O1	Ohutrappauslaasti	2000	0.3	850	1.2	25

Kosteusdiffusiviteetit 1/2										
Tunnus										
T1_ulkko	DWS m ² /s	0	1.50E-10	1.7E-06						
	w [kg/m ³]	0	10	190						
	DWW m ² /s	0	1.50E-10	1.7E-08						
	w [kg/m ³]	0	10	190						
T1_sisä	DWS m ² /s	0	1.50E-10	1.7E-08						
	w [kg/m ³]	0	10	190						
	DWW m ² /s	0	1.50E-10	1.7E-08						
	w [kg/m ³]	0	10	190						
SPK1	DWS m ² /s	0	9.35E-11	7.3E-08						
	w [kg/m ³]	0	23.3	630						
	DWW m ² /s	0	9.35E-11	7.3E-09						
	w [kg/m ³]	0	23.3	630						
TS1	DWS m ² /s	0	3E-09	1E-07	1E-07	1.2E-07	2.2E-07	6E-07	9E-07	4.5E-06
	w [kg/m ³]	0	60	100	160	240	320	360	380	400
	DWW m ² /s	0	3.00E-09	8E-09	8E-09	1.3E-08	1E-07	3E-07	7E-07	1E-06
	w [kg/m ³]	0	60	100	160	240	320	360	380	400
PK1	DWS m ² /s	0	4.16E-12	1.38E-09						
	w [kg/m ³]	0	33.6	210						
	DWW m ² /s	0	4.16E-12	1.38E-10						
PK2	w [kg/m ³]	0	10.8	500						
	DWS m ² /s	0	1.72E-11	4.34E-09						
	w [kg/m ³]	0	29.5	148						
K1	DWW m ² /s	0	1.72E-11	4.34E-10						
	w [kg/m ³]	0	29.5	148						
	DWS m ² /s	0	3E-09	1E-07	1E-07	1.2E-07	2.2E-07	6E-07	9E-07	4.5E-06
K2	w [kg/m ³]	0	60	100	160	240	320	360	380	400
	DWW m ² /s	0	3.00E-09	8E-09	8E-09	1.3E-08	1E-07	3E-07	7E-07	1E-06
	w [kg/m ³]	0	60	100	160	240	320	360	380	400
	DWS m ² /s	0	1.02E-10	8.78E-08						
P1	w [kg/m ³]	0	10.8	500						
	DWW m ² /s	0	1.02E-10	8.78E-09						
	w [kg/m ³]	0	10.8	500						
	DWS m ² /s	0	1.32E-13	8.03E-11						
P2	w [kg/m ³]	0	62.6	870						
	DWW m ² /s	0	1.32E-13	8E-12						
	w [kg/m ³]	0	62.6	870						
	DWS m ² /s	0	3.20E-13	9.20E-12						
BM1a	w [kg/m ³]	0	20	600						
	DWW m ² /s	0	3.20E-13	9.20E-12						
	w [kg/m ³]	0	20	600						
	DWS m ² /s	0	6.08E-14	2.91E-11						
BM1b	w [kg/m ³]	0	32	300						
	DWW m ² /s	0	6.08E-14	2.91E-12						
	w [kg/m ³]	0	32	300						
	DWS m ² /s	0	6.08E-14	2.91E-11						
BM2	w [kg/m ³]	0	32	300						
	DWW m ² /s	0	6.08E-14	2.91E-12						
	w [kg/m ³]	0	32	300						
	DWS m ² /s	0	2.46E-13	1.18E-10						
BM3	w [kg/m ³]	0	32	300						
	DWW m ² /s	0	2.46E-13	1.18E-11						
	w [kg/m ³]	0	32	300						
	DWS m ² /s	0	5.01E-13	4.69E-10						
BM4	w [kg/m ³]	0	2.9	300						
	DWW m ² /s	0	5.01E-13	4.69E-11						
	w [kg/m ³]	0	2.9	300						
	DWS m ² /s	0	5.51E-13	2.64E-10						
PM1	w [kg/m ³]	0	32	300						
	DWW m ² /s	0	5.51E-13	2.64E-11						
	w [kg/m ³]	0	32	300						
	DWS m ² /s	0	7.07E-13	3.38E-10						
PM2	w [kg/m ³]	0	32	300						
	DWW m ² /s	0	7.07E-13	3.38E-11						
	w [kg/m ³]	0	32	300						
	DWS m ² /s	0	1.20E-13	5.75E-11						
PM2	w [kg/m ³]	0	32	300						
	DWW m ² /s	0	1.20E-13	5.75E-12						
	w [kg/m ³]	0	32	300						

Kosteusdiffusiviteetit 2/2

Tunnus								
B1_ulko	DWS m ² /s	1E-09	4.00E-09	1.00E-08	2.00E-08	3.00E-08	3.00E-07	
	w [kg/m ³]	0	29	72	116	130	147	
	DWW m ² /s	2.00E-11	4.00E-11	6.00E-11	4.00E-10	8.00E-10	8.00E-09	1.00E-07
	w [kg/m ³]	0	29	72	100	116	130	147
B1_sisä	DWS m ² /s	2.00E-11	4.00E-11	6.00E-11	4.00E-10	8.00E-10	8.00E-09	1.00E-07
	w [kg/m ³]	0	29	72	100	116	130	147
	DWW m ² /s	2.00E-11	4.00E-11	6.00E-11	4.00E-10	8.00E-10	8.00E-09	1.00E-07
	w [kg/m ³]	0	29	72	100	116	130	147
B1a_ulko	DWS m ² /s	4.44E-10	1.70E-09	4.44E-09	8.88E-09	1.33E-08	1.33E-07	
	w [kg/m ³]	0	29	72	116	130	147	
	DWW m ² /s	8.80E-12	1.70E-11	2.64E-11	1.76E-10	3.52E-10	3.52E-09	4.4E-08
	w [kg/m ³]	0	29	72	100	116	130	147
B1a_sisä	DWS m ² /s	8.80E-12	1.70E-11	2.64E-11	1.76E-10	3.52E-10	3.52E-09	4.4E-08
	w [kg/m ³]	0	29	72	100	116	130	147
	DWW m ² /s	8.80E-12	1.70E-11	2.64E-11	1.76E-10	3.52E-10	3.52E-09	4.4E-08
	w [kg/m ³]	0	29	72	100	116	130	147
B1b_ulko	DWS m ² /s	1.10E-10	4.40E-10	1.10E-09	2.20E-09	3.30E-09	3.30E-08	
	w [kg/m ³]	0	29	72	116	130	147	
	DWW m ² /s	2.20E-12	4.40E-12	6.60E-12	4.40E-11	8.80E-11	8.80E-10	1.10E-08
	w [kg/m ³]	0	29	72	100	116	130	147
B1b_sisä	DWS m ² /s	2.20E-12	4.40E-12	6.60E-12	4.40E-11	8.80E-11	8.80E-10	1.10E-08
	w [kg/m ³]	0	29	72	100	116	130	147
	DWW m ² /s	2.20E-12	4.40E-12	6.60E-12	4.40E-11	8.80E-11	8.80E-10	1.10E-08
	w [kg/m ³]	0	29	72	100	116	130	147
B1c_ulko	DWS m ² /s	4.73E-11	1.89E-10	4.73E-10	9.47E-10	1.42E-09	1.42E-08	
	w [kg/m ³]	0	29	72	116	130	147	
	DWW m ² /s	9.47E-13	1.89E-12	2.84E-12	1.89E-11	3.79E-11	3.79E-10	4.7E-09
	w [kg/m ³]	0	29	72	100	116	130	147
B1c_sisä	DWS m ² /s	9.47E-13	1.89E-12	2.84E-12	1.89E-11	3.79E-11	3.79E-10	4.7E-09
	w [kg/m ³]	0	29	72	100	116	130	147
	DWW m ² /s	9.47E-13	1.89E-12	2.84E-12	1.89E-11	3.79E-11	3.79E-10	4.7E-09
	w [kg/m ³]	0	29	72	100	116	130	147
B1d_ulko	DWS m ² /s	2.11E-11	8.44E-11	2.11E-10	4.22E-10	6.33E-10	6.33E-09	
	w [kg/m ³]	0	29	72	116	130	147	
	DWW m ² /s	4.22E-13	8.44E-13	1.27E-12	8.44E-12	1.69E-11	1.69E-10	2.11E-09
	w [kg/m ³]	0	29	72	100	116	130	147
B1d_sisä	DWS m ² /s	4.22E-13	8.44E-13	1.27E-12	8.44E-12	1.69E-11	1.69E-10	2.11E-09
	w [kg/m ³]	0	29	72	100	116	130	147
	DWW m ² /s	4.22E-13	8.44E-13	1.27E-12	8.44E-12	1.69E-11	1.69E-10	2.11E-09
	w [kg/m ³]	0	29	72	100	116	130	147
B2_ulko	DWS m ² /s	0	7.40E-11	2.50E-10	1.00E-09	1.20E-09	1.20E-09	
	w [kg/m ³]	0	72	85	100	118	150	
	DWW m ² /s	0	7.40E-12	2.50E-11	1.00E-10	1.30E-10	1.30E-10	
	w [kg/m ³]	0	72	85	100	118	150	
B2_sisä	DWS m ² /s	0	7.40E-12	2.50E-11	1.00E-10	1.30E-10	1.30E-10	
	w [kg/m ³]	0	72	85	100	118	150	
	DWW m ² /s	0	7.40E-12	2.50E-11	1.00E-10	1.30E-10	1.30E-10	
	w [kg/m ³]	0	72	85	100	118	150	
B2a_ulko	DWS m ² /s	0	2.96E-10	1.00E-09	4.00E-09	4.80E-09	4.80E-09	
	w [kg/m ³]	0	72	85	100	118	150	
	DWW m ² /s	0	2.96E-11	1.00E-10	4.00E-10	5.20E-10	5.20E-10	
	w [kg/m ³]	0	72	85	100	118	150	
B2a_sisä	DWS m ² /s	0	2.96E-11	1.00E-10	4.00E-10	5.20E-10	5.20E-10	
	w [kg/m ³]	0	72	85	100	118	150	
	DWW m ² /s	0	2.96E-11	1.00E-10	4.00E-10	5.20E-10	5.20E-10	
	w [kg/m ³]	0	72	85	100	118	150	
O1	DWS m ² /s	0	2.87E-12	1.21E-09				
	w [kg/m ³]	0	35	280				
	DWW m ² /s	0	2.87E-12	1.12E-10				
	w [kg/m ³]	0	35	280				

Lämmönjohtavuudet kosteuspitoisuuden funktiona

Tunnus																
T1	w [kg/m ³]	0	240													
	λ [W/(m*K)]	0.6	1.737													
MV1	w [kg/m ³]	0	10	20	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	950	
	λ [W/(m*K)]	0.04	0.04	0.041	0.043	0.049	0.07	0.1	0.15	0.2	0.27	0.35	0.44	0.55	0.6	
MV2	w [kg/m ³]	0	0.15	0.33	0.62	0.93	970									
	λ [W/(m*K)]	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.6									
MV3	w [kg/m ³]	0	0.5	0.6	1.6	3.3	940									
	λ [W/(m*K)]	0.031	0.031	0.031	0.031	0.031	0.6									
SPK1	w [kg/m ³]	0	9.3	17.2	28.5	41.9	630									
	λ [W/(m*K)]	0.052	0.052	0.054	0.057	0.064	0.6									
TS1	w [kg/m ³]	0	650													
	λ [W/(m*K)]	0.2	1.424													
PK1	w [kg/m ³]	0	12.4	22.4	45.9	71.3	850									
	λ [W/(m*K)]	0.047	0.049	0.051	0.054	0.053	0.6									
PK2	w [kg/m ³]	0	10.4	19.8	47.6	62.2										
	λ [W/(m*K)]	0.047	0.049	0.051	0.054	0.053										
K1	w [kg/m ³]	0	650													
	λ [W/(m*K)]	0.2	1.424													
K2	w [kg/m ³]	0	6.1	9	11.5	18.2	500									
	λ [W/(m*K)]	0.19	0.19	0.19	0.2	0.21	0.6									
B1	w [kg/m ³]	0	180													
	λ [W/(m*K)]	1.6	2.638													
B2	w [kg/m ³]	0	180													
	λ [W/(m*K)]	1.6	2.602													