



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Mikael Mäkitalo

PUURUNKOISTEN ULKOSEINIEN KOSTEUSTEKNINEN TOIMIVUUS NYKYISESSÄ JA TULEVAISUUDEN ILMASTOSSA

Diplomityö

Tarkastajat: tutkimusjohtaja Juha Vinha ja professori Ralf Lindberg

Tarkastajat ja aihe hyväksyttiin Rakennetun ympäristön tiedekunta-neuvoston kokouksessa 8. helmikuuta 2012

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

MÄKITALO, MIKAEL: Puurunkoisten ulkoseinien kosteustekninen toimivuus nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa

Diplomityö, 134 sivua, 37 liitesivua

Huhtikuu 2012

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastajat: tutkimusjohtaja Juha Vinha ja professori Ralf Lindberg

Avainsanat: puurakenteiset ulkoseinät, tuuletusväli, vesihöyrynvastus, kriittiset ilmasto-olosuhteet, kosteuden kondensoituminen, homeen kasvu, lämmöneristys

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli tarkastella puurunkoisten ulkoseinien kosteusteknistä toimivuutta nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa Suomessa. Lisäksi työssä määritettiin laskennallisesti seinärakenteiden sisä- ja ulkopinnalta vaadittavat vesihöyrynvastussuhteet ja verrattiin saatuja arvoja nykyisissä ohjeissa vaadittuihin arvoihin. Tutkittavina seinärakenteina olivat puu- ja tiiliverhotut sekä levy- ja eristerapatut rankaseinät. Runkorakenteena käytettiin pääsääntöisesti eristeen vahvuista sahatavarasta tai viilupuusta tehtyä puurunkoa, jonka jako oli 600 mm.

Laskennassa käytettävät kriittiset ulkoilman olosuhteet oli valittu neljän paikkakunnan ilmastodatasta. Vuosien valintakriteereinä käytettiin kosteuden kondensoitumista ja homeen kasvua lämmöneristeen sisä- ja ulkopinnassa. Valittu laskentavuosi edusti 90 % kriittisyystasoa, jonka mukaan enintään 10 % tutkituista vuosista oli valittua vuotta kriittisempiä. Sisäilmassa käytettiin vakioilämpötilaa, joka oli 21°C. Asumisen eri toimintojen tuottama lisäkosteus perustui aikaisempiin kenttätutkimuksiin ja sen suuruus oli 5 g/m³ talvella ja 2 g/m³ kesäaikana, kun lämpötila oli suurempi kuin 15 °C. Homeen kasvua tutkittiin VTT:n ja TTY:n yhteistyössä laatimalla homeenkasvun laskentamallilla, jossa homeen kasvu ilmaistaan homeindeksillä (M). Homeen kasvun kriteerinä käytettiin lämmöneristeen ulko- ja sisäpinnassa nollatasoa ($M_{\max} < 1$), jonka mukaan homeetta ei tutkituilla pinnoilla saanut esiintyä lainkaan. Kosteustekniset laskelmat tehtiin WUFI-1D ja 2D-ohjelmilla.

Tutkimustulokset osoittavat, että kosteusvaurion riski kasvaa monissa tavanomaisissa seinärakenteissa lämmöneristykseen lisäyksen ja ilmastonmuutoksen vaikutuksesta. Tiiliverhottujen ulkoseinien toiminta heikkenee tulevaisuudessa lisääntyvien viistosateiden myötä. Tiiliverhotussa seinässä tuulensuojan tulisi olla hyvin lämpöä eristävä ja homehtumista kestävä. Korkeassa tiiliverhotussa ulkoseinässä vaaditaan rakenteellisia muutoksia, jotta homeen kasvua ei seinärakenteesta esiintyisi. Eristerapatun rankarakenteisen ulkoseinän käytöstä tulisi luopua, koska kosteus tunkeutuu helposti rakenteen sisäosiin ja sen kuivuminen on rakenteesta hidasta. Rapattu rakenne tulisi tutkimusten mukaan erottaa sisemmästä seinän osasta kuivumisen mahdollistavalla tuuletusraolla.

Muovisen höyrynsulun käyttö on turvallisinta Suomessa vallitsevissa ulko- ja sisäilman olosuhteissa. Jos rakenne halutaan toteuttaa ilman höyrynsulkua, vaadittu sisä- ja ulkopinnan välinen vesihöyrynvastussuhde riippuu tuulensuojan lämmönvastuksesta ja

sen vesihöyrynläpäisevyydestä. Myös lämmöneristeen kosteuskapasiteetilla voidaan parantaa rakenteen kosteusteknistä toimivuutta. Suomalaisessa rakentamismääräyskokoelmassa esitetty sisä- ja ulkopinnan välinen vastussuhde (5:1) ei ole riittävä tulevaisuudessa seinärakenteissa, joissa tuulensuojan lämmönvastus on $< 0,8 \text{ m}^2\text{K/W}$. Näissä tapauksissa vaaditaan sisäpinnalta huomattavasti tiiviimpää vesihöyrynvastusta, jotta rakenne olisi toimiva.

Lämpöä eristävä ja hyvin vesihöyryä läpäisevä tuulensuoja estää homeen kasvun runkotalpan ulkopinnassa tulevaisuuden ilmastossa. Vesihöyrytiivien ja huonosti lämpöä eristävien rakennuslevyjen toimintaa tuulensuojana voidaan parantaa sijoittamalla levyn ulkopintaan lisälämmöneriste.

Höyrynsulku voidaan sijoittaa 50 mm syvyyteen seinän sisäpinnasta, jos sisäpuolella käytetään pystysuuntaista koolausta runkotolppia vasten. Sisäpuolista ristikoolausta käytettäessä tuulensuojan on oltava hyvin lämpöä eristävä tai runkorakenteena on käytettävä kuitulevyumaista runkotolppaa tai eriytettyä runkoa, jotta hometta ei sisäpinnassa esiintyisi. Myös ulkopuolisen ristikoolauksen ja lämmöneristeen käyttö eliminoivat homeen kasvun rakenteen sisäosissa. Tiloissa, joissa sisäilman kosteus on normaalia huoneilmaa suurempi, on höyrynsulku sijoitettava sisäverhouslevyn alle tai käytettävä vaihtoehtoisesti muuta tiivistä pinnoitetta rakenteen sisäpinnassa.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in construction Technology

MÄKITALO, MIKAEL: Hygrothermal Performance of Wood-Framed External Walls in the Present and Future Climate

Master of Science Thesis, 134 pages, 37 Appendix pages

April 2012

Major: Construction Engineering

Examiners: Assoc. prof. Juha Vinha and prof. Ralf Lindberg

Keywords: wood-framed external walls, ventilation gap, water vapour resistance, critical climate conditions, condensation of moisture, mould growth, thermal insulation

The goal of this thesis was to study the moisture behavior of wood-framed external walls in the present and future climate of Finland. The minimum water vapour resistance ratios between the interior and exterior linings of different wall types were calculated and compared to present requirements of the Finnish Building Code. The studied walls were wood- and brick-clad and insulation plastered wall assemblies. Their frames were as thick as their thermal insulation layer. The frame material was sawn timber or laminated veneer lumber (LVL). Stud spacing was 600 mm.

The critical year for calculation was selected based on climate data on four localities, so that only 10% of the years were more critical than it. Moisture condensation and mould growth on the inner and outer surfaces of thermal insulation were selected as performance criteria for the selected years. The indoor air temperature used in the calculation was constant at 21 °C. The excess moisture of indoor air amounting to 5 g/m³ in winter and 2 g/m³ in summer when temperature exceeds 15 °C was based on earlier field measurements. The limit value for mould growth on the exterior and interior wall linings was set to < 1 means where mould growth would not occur on the studied surfaces. Simultaneous heat and moisture transport calculations were made with WUFI 1D and 2D programs. The mould growth risk of the assembly was examined with the mould growth calculation model prepared jointly by VTT and TTY where mould growth is denoted by the mould index (M).

The study indicates that the risk of moisture damage increases in many typical assemblies as a result of adding thermal insulation and climate change. The hygrothermal performance of brick-clad external walls will deteriorate in future due to driving rain stress. The sheathing of brick-clad walls should have high thermal insulation capacity as well as be mould proof. Structural changes will be required in high brick-clad wall assemblies to prevent mould growth. A rendered and unventilated wood-framed wall is sensitive to moisture. Moisture easily enters the structure and causes mould growth. Therefore, they should be avoided. A rendered wall should have a ventilation gap behind the cladding to allow it to dry.

Using a plastic vapour barrier is safest in the typical indoor and outdoor air conditions of Finland. If an assembly is implemented without a plastic vapour barrier in the interior wall lining, the required water vapour resistance ratio between the interior and exterior wall linings depends on the thermal and water vapour resistance of the sheathing. High

moisture capacity of thermal insulation also improves the hygrothermal performance of the assembly. The water vapour resistance ratio between the interior and exterior wall lining (5:1) given in the Finnish Building Code is not sufficient for assemblies where the thermal resistance of sheathing is $< 0.8 \text{ m}^2\text{K/W}$. Considerably higher water vapour resistance is required there of the interior wall lining to ensure reliable moisture performance of the assembly.

Heat-insulating and highly water vapour permeable sheathing will prevent mould growth on the exterior surface of a wooden stud in future climate conditions. The performance of building boards of low thermal and high water vapour resistance used as sheathing can be improved by installing extra thermal insulation on the outer surface.

A plastic vapour barrier can be installed in external wall assemblies at a depth of 50 mm from the interior surface if vertical laths are fastened to the studs on the interior side of the vapour barrier. When horizontal laths are fastened to the inside of the external wall, the sheathing should be highly heat-insulating or the frame should have fibreboard webbed studs or a double-frame should be used to prevent mould growth on the interior surface of walls. Horizontal lathing and thermal insulation on the exterior surface of a wall also prevent mould growth inside an assembly. In spaces where relative humidity of indoor air is higher than normal, a plastic vapour barrier must be installed behind the interior lining or some other watertight lining placed on the interior surface of the assembly.

ALKUSANAT

Tämä tutkimus on tehty Tampereen teknillisellä yliopistolla, rakennustekniikan laitoksella diplomityönä tutkimusjohtaja Juha Vinhan johdolla.

Työ liittyy osana FRAME-hankkeeseen (Future envelope assemblies and HVAC solutions), jonka tarkoituksena on tuottaa perustietoa ilmastonmuutoksen ja lämmöneristykseen lisäyksen vaikutuksista vaipparakenteiden rakennusfysikaaliseen toimintaan. Tutkimusta rahoittavat Tekes, ympäristöministeriö, Rakennusteollisuus RT sekä rakennusalan yritykset.

Kiitän Juha Vinhaa päättötyöni ohjauksesta ja tarkastamisesta sekä professori Ralf Lindbergiä työni tarkastamisesta. Kiitokset kuuluvat myös rakennustekniikan henkilökunnalle saamastani ohjeista ja neuvoista.

Lisäksi haluan kiittää kaikkia läheisiäni ja ystäviäni saamastani tuesta ja kannustuksesta.

Tampereella 7.5.2012

Mikael Mäkitalo

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	9
1.1	Tutkimuksen tausta.....	9
1.2	Tutkimuksen tavoitteet ja sisältö.....	10
1.3	Tutkimuksen rajaukset.....	10
2	LÄMMÖN JA KOSTEUDEN SIIRTYMISEN TEORIA	12
2.1	Lämmön siirtymismuodot.....	12
2.1.1	Johtuminen	12
2.1.2	Konvektio.....	15
2.1.3	Säteily	18
2.2	Kosteuslähteet	24
2.2.1	Ilman kosteus.....	24
2.2.2	Viistosade.....	27
2.3	Materiaalin kosteuspitoisuus ja hygroskooppisuus	31
2.4	Kosteuden siirtymismuodot	33
2.4.1	Vesihöyryn diffuusio	34
2.4.2	Kosteuden konvektio	37
2.4.3	Kapillaarinen kosteuden siirtyminen	38
2.5	Ilmavirtaus tuuletusraossa.....	43
2.5.1	Ilmaraon vaikutus rakenteen toimivuuteen.....	43
2.5.2	Painehäviö muuratassa julkisivussa	50
2.5.3	Painehäviö puu- ja paneelijulkisivuissa.....	53
3	HOME SEINÄRAKENTEESSA.....	57
4	ULKOSEINÄRAKENTEEN KOSTEUSTEKNINEN TOIMINTA.....	65
4.1	Kosteusliikkeet ulkoseinässä.....	65
4.2	Ulkoseinärakenteiden höyry- ja ilmatiiviyttä säätelevät ohjeet ja määräykset.....	66
4.2.1	RakMk C2:ssa annetut ohjeet.....	66
4.2.2	RIL 107:ssa annetut ohjeet.....	66
4.2.3	Yhteenvedo	67
4.3	Ilmastonmuutoksen vaikutukset.....	67
5	KRIITTISTEN OLOSUHDETEKIJÖIDEN VALINTA.....	70
5.1	Ulkoilman mitoitusolosuhteiden määrittäminen	70
5.2	Sisäilman olosuhteet.....	75
5.2.1	Sisäilman lisäkosteus	75
5.2.2	Sisäilman lämpötila	76
5.3	Seinärakenne ja käytetyt materiaalit.....	78
5.4	Laskentamalli	84
6	LASKENTATARKASTELUJEN TULOKSET.....	86
6.1	Puu- ja levyverhotut puurankaseinät	86
6.2	Tiiliverhottu rankaseinä	92
6.3	Eristerapattu rankaseinä.....	100

6.4	Levyrapattu rankaseinä.....	107
6.5	Sisäpuolinen koolaus	108
6.6	Sisäpinnalta vaadittu vesihöyrynvastus	115
7	YHTEENVETO.....	120
	Lähteet.....	124

Liite 1: Pintojen säteilykertoimia

Liite 2: Materiaaliarvoja

Liite 3. Materiaalien tasapainokosteuskäyriä

Liite 4: Homeen kasvu puuverhotussa rankaseinässä

Liite 5: Homeen kasvu tiiliverhotussa rankaseinässä

Liite 6: Homeen kasvu eristerapatussa rankaseinässä

Liite 7: Homeen kasvu levyrapatussa rankaseinässä

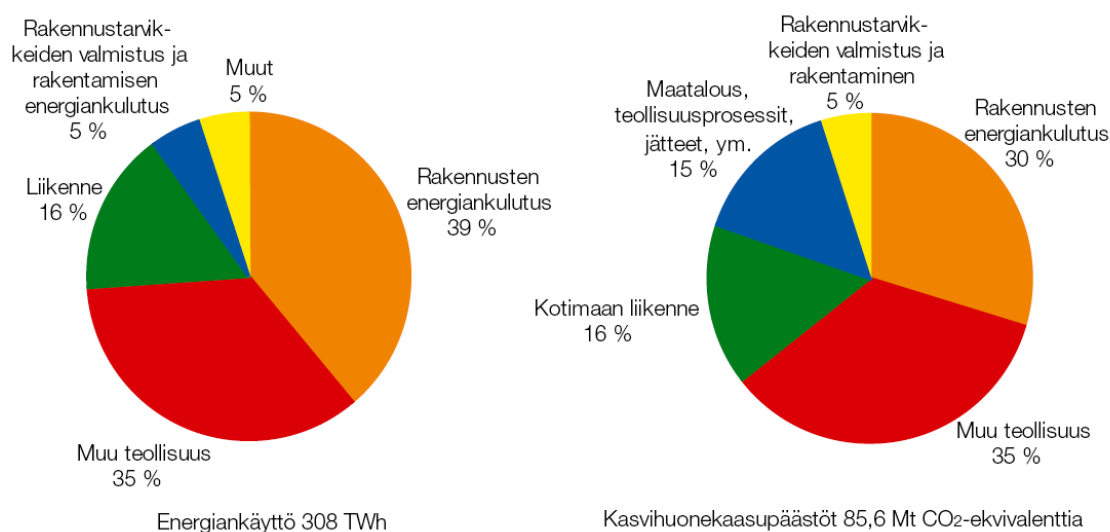
Liite 8: Homeen kasvu ja kondenssi sisäpuolisessa koolauksessa

Liite 9: Höyrynsulun sijainnin vaikutus vaakakoolauksen homeindeksiin

1 JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Suomi on sitoutunut EU:n jäsenmaiden solmimaan Kioton ilmastopöytäkirjaan, joka velvoittaa jäsenmaat vähentämään päästöjä yhteensä kahdeksan prosenttia vuoden 1990 tasosta vuoteen 2012 mennessä ja 20 prosenttia vuoteen 2020 mennessä. (Tilastokeskus 2011; Työ- ja elinkeinoministeriö 2009). Kasviuonepäästöjä voidaan pienentää tehostamalla erityisesti rakennusten energiankäyttöä. Rakennusten käytön osuus oli 39 % Suomen vuotuisesta kokonaisenergiankulutuksesta vuonna 2005 ja niiden energiankäyttö kattoi 30 % Suomen kokonaishiilidioksidipäästöistä (Työ- ja elinkeinoministeriö 2009). Tämän takia rakennusten energiatehokkuuden parantaminen on päästöjen leikkaamisen ja ilmastonmuutoksen torjumisen kannalta erityisasemassa. Kuvassa 1.1 on esitetty energiankäytön ja kasviuonepäästöjen jakaantuminen Suomessa vuonna 2005.



Kuva 1.1. *Energiankäytön ja kasviuonepäästöjen osuus Suomessa vuonna 2005. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2009)*

Asuin- ja palvelurakennusten aiheuttamat vuosittaiset kasviuonepäästöt tulevat lisääntymään huomattavasti seuraavan kahdenkymmenen vuoden aikana, jos merkittäviin muutoksiin ei energiakäytön ja kasviuonekaasujen rajoittamisen osalta ryhdytä (Heljo et al. 2005). Ympäristöministeriön toimesta rakennuksen energiatehokkuutta on tarkoitus parantaa tuntuvasti vuoteen 2050 mennessä. Energiatehokkuustoimet koskevat erityisesti uudisrakentamista ja lämmöneristysmääräysten kiristämistä. (Ympäristöministe-

riö 2010) Ilmastonmuutoksella ja rakennusten vaipan energiatehokkuuden parantamisella on merkittävä vaikutus vaipparakenteiden kosteustekniseen toimivuuteen. Puurunkoisten ulkoseinärakenteiden kosteusteknistä toimivuutta on tutkittu aikaisemmin nykyilmaston olosuhteissa 150 mm, 175 mm ja 200 mm vahvaisilla eristepaksuuksilla (Vinha 2007; Vinha et al. 2003). Aiemmissä tutkimuksissa ei ole kuitenkaan otettu huomioon viistosateen, auringonsäteilyn ja ilmastonmuutoksen vaikutusta rakenteen kosteustekniseen toimivuuteen.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja sisältö

Tämän tutkimuksen tavoitteena on tarkastella puurunkoisten ulkoseinärakenteiden toimivuutta Suomen ilmastossa ottamalla huomioon ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen vaikutukset rakenteiden toiminnassa. Tutkittavina ulkoseinärakenteina ovat Suomen rakennuskannassa yleisesti esiintyvät kuorimuuratut ja puuverhotut rankaseinät sekä Ruotsissa yleisesti käytössä oleva eristerapattu rankaseinä.

Keskeinen osa tätä tutkimusta on seinärakenteiden luotettavan toiminnan arvioiminen kosteuden kondensoitumisen ja homeen kasvun kannalta. Homeen kasvun tutkimisessa ja esiintymisessä käytetään alun perin VTT:n kehittämää (Hukka & Viitanen 1999) ja sittemmin TTY:n ja VTT:n yhteistyössä parantamaa homeen kasvun laskentamallia (Vinha et al. 2012). Lisäksi tässä työssä on tarkoitus tutkia sisä- ja ulkopinnan vaadittavaa vesihöyrynvastussuhdetta erilaisilla eriste- ja tuulensuojamateriaaleilla. Tutkimustulosten perusteella pyritään antamaan suosituksia ja ohjeita tulevien rakentamismääräysten ja ohjeiden kehittämiseen.

1.3 Tutkimuksen rajaukset

Tässä tutkimuksessa ei tutkita rakennevirheiden tai kosteusvuotojen vaikutusta lukuun ottamatta eristerapatuilla seinillä tehtyjä kuivumistarkasteluja. Laskennallisissa analyyseissä oletetaan, että lämmöneristys on asennettu siten, että ilmavuotoreittejä ei eristekerrokseen tai sen reuna-alueille muodostu, jolloin sisäisen konvektion vaikutus voidaan jättää laskennassa ottamatta huomioon. Lisäksi tässä työssä oletetaan, että rakentamisen aikana seinärakenne on suojattu ulkoisilta säärasituksilta ja että rakentamisen eri vaiheet on toteutettu siten, että niistä ei muodostu ylimääräistä kosteuslisää seinärakenteeseen.

Tutkittavissa ulkoseinissä otetaan huomioon viistosateen, auringonsäteilyn ja tuuletusraossa olevan pystysuuntaisen konvektiovirtauksen vaikutus rakenteessa vallitseviin lämpö- ja kosteusolosuhteisiin. Tiiliverhoiluilla seinillä tutkittavaksi seinärakenteeksi on valittu etelänpuoleinen seinä, jossa auringonsäteily ja viistosaderasitus ovat muita il-

mansuuntia voimakkaampia. Sadetta huonosti imevillä julkisivupinnoilla, kuten puujulkisivuilla, tutkittavana on pohjoisen puoleinen seinä, joka on ulkoilman suhteellisen kosteuden vaikutuksen kannalta Suomessa kriittisempi. Laskenta-analyyseissä käytetään tuntikohtaista säädataa, joka ottaa huomioon tarkemmin hetkelliset vaihtelut ulkoilman olosuhteissa. Tutkimus on rajattu lämpimiin rakennuksiin, joissa huoneenlämpötila on normaali läpi koko vuoden. Laskennassa käytetään sisäilman lämpötilana 21 astetta talvi- ja kesäkauden aikana. Tutkimuksessa otetaan huomioon normaalista asumisesta ja rakennuksen käytöstä johtuvien olosuhteiden, kuten sisäilman kosteustuoton ja RH:n vaikutus. Sisäilman kosteuden vaikutusta tutkitaan ulkoilman lämpötilasta riippuvalla funktiolla siten, että kosteuspitoisuus sisäilmassa on kesäaikana 2 g/m^3 ja talvella 5 g/m^3 . Rakennusmateriaalien kosteussisällön muuttuminen tasapainokosteuteen ja rakennusmateriaalien sisältämän ylimääräisen kosteuden poistuminen otetaan huomioon tarkastelemalla vasta toista vuotta laskennan alkuhetkestä.

Lämmöneriste on laskentamallissa homogeenista, jolloin märkäruiikutettavien tai puhallettavien puukuitueristeiden mahdollista paakkuuntumista ei lämmönsiirtymisessä oteta huomioon. Myöskään puukuitueristeiden usein sisältämän homeenestoaineen vaikutusta ei laskennassa tutkita. Rakenteet analysoidaan kosteuskapasiteetiltaan erilaisille lämmöneristeille: ei-hygroskooppiselle ja hygroskooppiselle eristeelle. Tuulensuojana käytetään laskennassa joko levyä tai kalvoa. Kaikissa tutkituissa seinärakenteissa on tietyn vesihöyrynvastuksen omaava ilmansulku lämmöneristeen sisäpinnassa, jolloin vesihöyrytiivis ilmansulku toimii rakenteessa myös höyrynsulkuna. Verhouslevynä käytetään rakenteen sisäpinnassa kaikissa laskentatarkasteluissa pinnoittamatonta 13 mm paksua kipsikartonkilevyä.

Julkisivuverhouksen ja tuulensuojan välissä käytetään 20-30 mm:n tuuletusrakoa, lukuun ottamatta eristerapattuja ulkoseiniä. Tuuletusraon pääasiallisena tehtävänä on ehkäistä sadeveden kulkeutumista sisempään seinäosaan ja sallia lisäkosteuden vapaa virtaus ulkoilmaan. Tutkimuksessa käytettävät ilmanvaihtuvuusarvot selvitetään kirjallisuustutkimuksen ja laskennallisen analyysiin perusteella.

2 LÄMMÖN JA KOSTEUDEN SIIRTYMISEN TEORIA

2.1 Lämmön siirtymismuodot

Lämmön siirtyminen on lämpöenergian välittymistä lämpötilaeron vaikutuksesta. Lämpöenergian liike tapahtuu lämpöopin sääntöjen mukaisesti aina korkeammasta lämpötilasta matalampaa lämpötilaa kohti. Siirtymismuodoissa on erotettavissa kolme eri tapausta: johtuminen, konvektio ja säteily. Näistä johtumisella on suurin merkitys seinärakenteissa tapahtuvassa lämmön siirtymisessä.

2.1.1 Johtuminen

Johtumisessa lämmön siirtyminen tapahtuu joko systeemin sisällä tai molekyylien keskinäisten törmäysten välityksellä ilman aineen siirtymistä. Lämmön siirtyminen selittyy molekyylin kineettisen energian siirtymisenä. Isotrooppisessa ja homogeenisessa materiaalissa johtumalla siirtyvä lämpövirran tiheys q pinta-alayksikkö kohden (W/m^2) saadaan Fourierin yhtälöstä (Mills 1999):

$$q = -\lambda \nabla T = -\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.1)$$

missä,

λ on lämmönjohtavuus ($\text{W}/(\text{mK})$)

T on lämpötila (K)

Yhtälöstä 2.1 havaitaan, että lämpövuoto q on positiivinen alenevan lämpötilagradientin ∇T suuntaan eli lämpö pyrkii tasaantumaan siirtymällä lämpimämmästä tilasta kylmempää kohti. Kun otetaan huomioon Termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön mukainen energian säilymlaki, saadaan Fourierin differentiaaliyhtälö (Jantunen et al. 1986; Hagentoft 2001)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.2)$$

missä,

ρ	on	tiheys (kg/m ³)
c	on	ominaislämpökapasiteetti (J/(kgK))

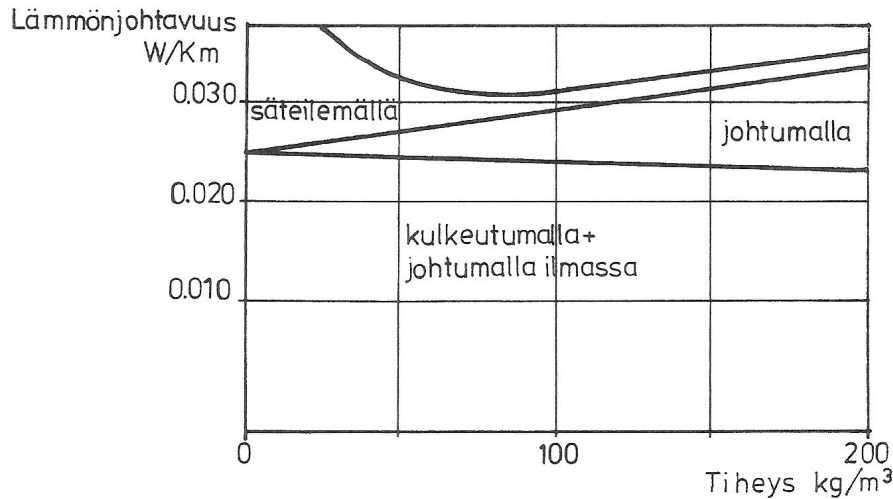
Termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön mukaisesti systeemiin tuodun ja siinä kehittyneen energian summa on yhtä suuri kuin systeemistä otetun ja siihen varastoituneen energian summa. Yhtälössä 2.2 vasemman puoleiset termit kuvaavat lämmön johtumista tilavuusalkion läpi x-, y- ja z-suunnassa ja q lämmön sitoutumista tai kehittymistä tilavuusalkiossa esimerkiksi kemiallisen reaktion seurauksena. Oikeanpuoleinen termi kuvaa tilavuusalkioon sitoutuvaa lämpöenergiaa. Yhtälössä 2.2 esiintyvät materiaaliominaisuudet: lämmönjohtavuus ja ominaislämpökapasiteetti ovat lämpötilan ja kosteuspiitoisuuden funktioita, jotka ovat kokeellisesti määritettyjä. Aineen kykyä johtaa lämpöä suhteessa kykyyn varastoida lämpöenergiaa kuvataan termisellä diffusiviteetillä a (m²/s), joka määritellään kaavasta (Hagentoft 2001)

$$a = \frac{\lambda}{\rho_0 c} \quad (2.3)$$

missä,

ρ_0	on	materiaalin kuivatiheys (kg/m ³)
----------	----	--

Terminen diffusiviteetti kuvaa materiaalin ominaisuutta reagoida ympäristössä tapahtuviin muutoksiin. Mitä suurempi on materiaalin terminen diffusiviteetti, sitä nopeammin materiaali reagoi lämpötilan muutoksiin ja sitä nopeammin se myös saavuttaa muutoksen jälkeisen tasapainotilan. Yleensä rakennusfysiikan tutkimuksissa lämmönjohtavuuden ja ominaislämpökapasiteetin arvot oletetaan vakioiksi, koska tutkittavilla lämpötila-alueilla näiden arvojen riippuvuus lämpötilasta on merkityksetön, lukuun ottamatta veden faasimuutosaluetta, jossa kosteutta sisältävässä materiaalissa tapahtuu porrasmainen hyppäys veden aineominaisuuksien muuttuessa (Jantunen et al. 1986). Kuten kaavasta 2.3 havaitaan lämmönjohtavuus vaikuttaa suoraan siirtyvän lämpöenergian määrään, sen kaksinkertaistuessa myös siirtyvä lämpöenergia kaksinkertaistuu. Kosteuden, ilmavirtauksen ja materiaaliominaisuuksien hajonta on tyypillisesti otettu huomioon rakennuksen vaipan suunnittelussa käyttämällä normaalista lämmönjohtavuutta λ_n tai lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoa λ_U . Vaikka lämmönjohtavuusarvo kuvaa materiaalin kykyä johtaa lämpöä, sisältää se yleensä myös kaikki muut rakenteessa esiintyvät lämmönsiirtomuodot. Huokoisessa materiaalissa, kuten mineraalivillassa, konvektiolla ja säteilyllä on huomattava vaikutus materiaalin lämmönjohtokykyyn (ks. kuva 2.1). Näiden tekijöiden vaikutus on otettu huomioon yleensä materiaalin lämmönjohtavuusarvossa.



Kuva 2.1. Lämmönsiirron mekanismit mineraalivillassa. (Jantunen et al. 1986)

Lämmön johtumista tarkastellaan rakennuksen ulkoseinässä tyypillisesti yksisuuntaisena tasotapauksena, jolloin lämpövirran otaksutaan siirtyvän rakenteen läpi ainekerrosten suhteen kohtisuorassa suunnassa. Jos otetaan huomioon faasimuutokseen liittyvä latenttilämpö h_w , voidaan energiataseyhtälö 2.2 esittää muodossa

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + h_w \delta_p \left(\frac{\partial^2 p_v}{\partial x^2} \right) + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.4)$$

missä,

δ_p	on	vesihöyrynläpäisevyys (kg/(msPa))
p_v	on	vesihöyryn osapaine (Pa)
h_w	on	veden faasimuutoslämpö (kJ/kg)

Tässä tutkimuksessa otetaan huomioon faasimuutosenergioista vain höyrystymislämmön ($h_v = 2500$ kJ/kg) vaikutus, koska se on hallitseva energiayhtälössä. Rakennusten lämmöneristyksen suunnittelussa käytetään lämmönjohtavuuden asemesta tyypillisesti lämmönvastusta, joka ilmoittaa rakenneosan tai -kerroksen lämmönsiirtymisvastuksen. Lämmönvastus R ($\text{m}^2\text{K/W}$) määritellään lämmönjohtavuuden λ ja homogeenisen materiaalikerroksen d (m) suhteen eli (ISO 6946 2008)

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (2.5)$$

Rakennusosan, esimerkiksi ulkoseinän, lämmönvastus on kuvattu lämmönläpäisyker-toimena U ($\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$). U -arvo kuvaa seinän läpi siirtyvää lämpövirtaa pinta-alayksikön suuruisen alueen läpi lämpötilaeron ollessa yhden asteen suuruinen. U -arvo on rakenteen kokonaislämmönvastuksen käänteisarvo. Kun lämpö siirtyy ainekerrosten läpi koh-

tisuorassa suunnassa, saadaan rakenteen lämmönläpäisykerroin kaavasta (ISO 6946 2008):

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{si} + R_{se} + R_1 + \dots + R_n} \quad (2.6)$$

missä,

R_T	on	rakenteen kokonaislämmönvastus ($\text{m}^2\text{K/W}$)
R_{si}	on	sisäpinnan pintavastus ($\text{m}^2\text{K/W}$)
R_{se}	on	ulkopinnan pintavastus ($\text{m}^2\text{K/W}$)
$R_{1\dots n}$	ovat	rakenneosien 1...n lämmönvastukset ($\text{m}^2\text{K/W}$)

Rakenteen kylmäsiltojen vaikutus otetaan huomioon laskemalla rakenteelle lämmönvastuksen ylä- ja alalikiarvot, jolloin rakenteen kokonaislämmönvastus saadaan näiden arvojen keskiarvona (ISO 6946 2008). Jos lämmönvastuksen ylä- ja alalikiarvojen suhde on suurempi kuin 1,5 tai metallirakenne läpäisee lämmöneristekerroksen, ei edellä esitettyä menetelmää voida käyttää (ISO 6946 2008). Tällöin kylmäsiltojen aiheuttama lämmönläpäisykerroimen lisäys otetaan huomioon numeerisella laskennalla ISO 10211 (2007) standardin mukaisesti.

Pintavastuksen arvot riippuvat pinnan suunnasta, pintaan tulevasta ja poistuvasta säteilystä ja ilmavirtauksista. Laskennassa käytettävät sisä- ja ulkopinnan pintavastukset on määritetty kokeellisesti. Ulkoseinissä sisäpinnan pintavastuksena käytetään arvoa $0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ ja ulkopinnassa $0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$ standardin ISO 6946 mukaisesti (2008). Rakenteen ulkopinnan rajoittuessa tuuletustilaan tai hyvin tuuletettavaan ilmapäliin voidaan ulkopinnan pintavastuksena käyttää sisäpinnan pintavastuksen arvoa (RakMk C4 2003).

2.1.2 Konvektio

Konvektiolla tarkoitetaan lämpöenergian siirtymistä liikkuvan nesteen tai kaasun mukana kuljettumalla. Konvektio voi olla pakotettua tai luonnollista. Pakotetussa konvektiossa ilman virtaus aiheutuu ulkopuolisen voiman, esimerkiksi tuulen, paine-eron tai puhaltimen vaikutuksesta. Luonnollisessa eli vapaassa konvektiossa ilmavirtaus aiheutuu pelkästään lämpötilaerojen aiheuttamista ilman tiheyseroista. Painovoimakentässä lämmin ilma kohoaa harvempaan ylöspäin, jolloin virtauksen liikkeelle panevana voimana ovat nostevoimat. Ulkoseinärakenteessa konvektiovirtaus johtuu pääasiassa sisä- ja ulkopinnan erilaisesta lämpötilasta, sisätilan alipaineisuudesta ja huokoisessa eristeessä tapahtuvasta sisäisestä lämpövirtauksesta (sisäinen konvektio).

Konvektiolla tapahtuvaa lämmönsiirtymistä kuvataan konvektion lämmönsiirtokertoimella α_{conv} ($\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$), joka ilmaisee lämpömäärää, joka siirtyy aikayksikössä pinta-

alayksikön suuruiselta alueelta, lämpötilaeron ollessa yhden asteen suuruinen (Hagentoft 2001). Lämmönsiirtokerroimen suuruus riippuu pinnan geometriasta, laadusta, virtauskentästä ja virtaavan aineen termodynaamisista ominaisuuksista. Lämmönsiirtokerroimen likimääräistä arviointia varten kirjallisuudesta löytyy useita erilaisia kaavoja (Nevander & Elmarsson 1994; Hagentoft 2001). Kerroimen tarkka määrittäminen edellyttää kuitenkin tarkempia kokeita, esimerkiksi dimensioanalyysin käyttämistä (Iivonen & Viljanen 1984). Konvektiivinen lämpövirran tiheys q_{conv} (W/m^2) saadaan Newtonin laista (Hagentoft 2001)

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

missä,

$$\begin{aligned} T_s & \text{ on materiaalin pinnan lämpötila (}^\circ\text{C, K)} \\ T_a & \text{ on ympäröivän ilman lämpötila (}^\circ\text{C, K)} \end{aligned}$$

Ilman tilavuusvirta R_a (m^3/s) huokoisen materiaalin läpi yksiulotteisessa tapauksessa saadaan Darcyn laista (Nevander & Elmarsson 1994)

$$R_a = r_a A = \kappa_a A \frac{p_1 - p_2}{d} = K_a A (p_1 - p_2) \quad (2.8)$$

missä,

$$\begin{aligned} K_a & \text{ on materiaalin ilmanläpäisykerroin (}m^3/(m^2sPa)\text{)} \\ d & \text{ on materiaalin paksuus (m)} \\ p_1 - p_2 & \text{ on paine-ero materiaalin yli (Pa)} \end{aligned}$$

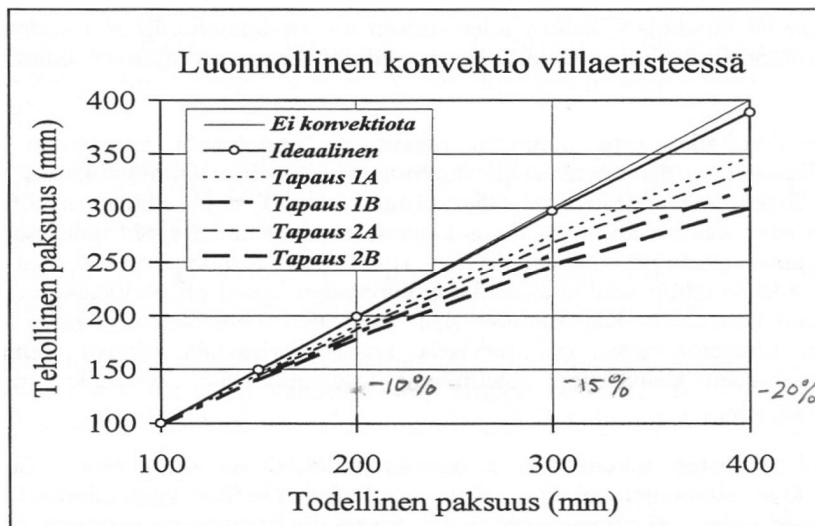
Rankarakenteisissa ulkoseinissä käytetään tyypillisesti huokoista lämmöneristettä, jossa ilmenee sisäistä konvektiota. Sisäisellä konvektiolla tarkoitetaan ilman liikkumista avo- huokoisen lämmöneristeen sisällä ja sen voimakkuus on sitä suurempi mitä paksumpi ja ilmaa läpäisevämpi on rakenteen lämmöneristyskerros (Kokko et al. 1997) Sisäinen konvektio aiheutuu pääasiassa rakenteen pintojen välisestä lämpötilaerosta, mutta joskus sen aiheuttajana on myös rakenteen ulkopuolella vallitseva tuuli.

Konvektio lisää huomattavasti seinän läpi virtaavaa lämpömäärää. Tätä lämpövirtaa voidaan kuvata Nusseltin luvulla, Nu , joka kuvaa konvektio- ja johtumislämmönsiirron suhdetta rakenteessa ja ilmaisee sisäisen konvektion osuuden koko seinärakenteen läpi virtaavasta lämpövuosta (Hagentoft 2001)

$$Nu = \frac{q_{konvektio+ johtu\ min\ en}}{q_{johtu\ min\ en}} \quad (2.9)$$

Rakenteille voidaan määrittää Nusseltin luku modifoidun Rayleighin luvun (Ra_m) funktiona (Hagentoft 2001; Mills 1999). Kirjallisuudessa esiintyvät likiarvot sisäiselle konvektiolle on määritetty ideaalitalanteessa, jolloin ne eivät anna täysin oikeaa kuvaa todellisessa rakenteessa esiintyvistä sisäisestä konvektiosta.

Ulkoseinän mineraalivillaeristys sisältää käytännössä aina epäideaalisuuksia, jotka johtuvat normaalin rakennustavan ja materiaalien rajakerrosten epätäydellisen kontaktin aiheuttamista ilmavirtauksista. Epäideaalisuudet kasvattavat rakenteen sisäistä ilmavirtausta ja lisäävät rakenteen lämpöhäviöitä ideaaliseen tilanteeseen verrattuna. Paksuissa, yli 200 mm:n lämmöneristeissä sisäinen konvektion osuus on merkittävä (Kokko et al. 1997). Normaalin rakennuskäytännön mukaiset epäideaalisuudet voivat aiheuttaa jopa yli 20 %:n lämpöhäviöiden kasvun mitoitusolosuhteissa. Esimerkiksi 300 mm eristeen tehollinen paksuus on noin 250 mm (ks. kuva 2.2). Kuvassa olevat prosenttiluvut esittävät arvioita siitä, kuinka paljon lämmöneristeen todellinen paksuus tapauksessa 1B heikkenee, jos sitä verrataan ideaalitalanteeseen.



Kuva 2.2 Sisäisen konvektion vaikutus 2,5 m korkean lämmöneristysrakenteen teholliseen paksuuteen todellisen paksuuden funktiona eri epäideaalisuustapauksissa. Käsitellyt tapaukset: 1: eristerkerros on yhtenäinen, kontakti ympäröiviin pintoihin on lievästi epäideaalinen, 2: eristys on tehty 100 mm kerroksista, joiden välissä on epäideaalinen kontakti, A: lievästi epäideaalinen ja B: enemmän epäideaalinen. (Kokko et al. 1997)

Tässä tutkimuksessa ei oteta huomioon sisäisen konvektion vaikutusta rakenteen kosteustekniseen toimivuuteen. Tarkempi analysointi edellyttäisi virtausohjelmien käyttöä.

2.1.3 Säteily

Säteily on energian siirtymistä sähkömagneettisena aaltoliikkeenä. Aallot etenevät valon nopeudella ja muuttuvat lämmöksi osuessaan absorboivaan aineeseen. Säteily ei tarvitse väliainetta edetäkseen (Björkholtz 1997). Kappaleen lämpötilan noustessa säteilyn intensiteetti kasvaa ja säteilyn aallonpituus lyhenee. Pintamateriaalin laatu vaikuttaa heijastuvan ja absorboituvan säteilyn määrään ja siihen kuinka paljon kappale itse emittoi lämpösäteilyä. Kappaletta, joka absorboi kaiken siihen kohdistuvan säteilyn, kutsutaan mustaksi kappaleeksi. Stefan-Boltzmannin lain mukaan mustan kappaleen säteilemä teho E_b (W/m^2) on suoraan verrannollinen lämpötilan neljänteen potenssiin (Mills 1999)

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (2.10)$$

missä,

$$\begin{array}{ll} \sigma & \text{on Stefan-Boltzmannin vakio, } 5,67 \times 10^{-8} \text{ (W}/(\text{m}^2\text{K}^4)) \\ T_s & \text{on pinnan lämpötila (K)} \end{array}$$

Todellisen kappaleen ominaisuudet poikkeavat mustan kappaleen ominaisuuksista. Kappaleen säteilytehon E ja ideaalisen mustan kappaleen säteilytehon E_b suhdetta kutsutaan emissiviteetiksi ε eli (Hagentoft 2001)

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} \quad (2.11)$$

Emissiivisyys vaihtelee nollan ja ykkösen välillä ja on voimakkaasti riippuvainen kappaleen pinnan laadusta. Rakennusmateriaaleilla pintojen emissiviteetit ovat tyypillisesti varsin suuria, yleensä välillä 0,8 – 0,95 (Viljanen 1984). Kun huomioidaan todellisen pinnan vaikutus säteilytehoon, saadaan kappaleen lähettämän kokonaisenergian suuruus E (W/m^2) kaavasta (Björkholtz 1997)

$$E = \varepsilon \cdot E_b = \varepsilon \cdot \sigma T^4 \quad (2.12)$$

Kun säteily kohtaa materiaalin pinnan, se osittain heijastuu, absorboituu ja läpäisee kappaleen. Rakennusfysiikassa kiinteän kappaleen ei oleteta läpäisevän säteilyä. Tärkeänä poikkeuksena on lasi, joka läpäisee lyhytaaltoista säteilyä (Hagentoft 2001). Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa kappaleen pintoja käsitellään harmaina pintoina, joissa säteilyn oletetaan emittoituvan tasaisesti kaikkiin suuntiin. Harmaan pinnan emissiviteetin oletetaan olevan riippumaton säteilyn aallonpituudesta. Kirchoffin lain mukaan harmaan pinnan absorptiokertoimen α ja emissiviteetin ε välillä on voimassa yhtälö (Hagentoft 2001)

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

Kun otaksutaan, että pinnan absorboivuus ja emissiivisyys on yhtä suuri, pintojen välisen säteilyllä siirtyvän lämpövirran tiheys q_{rad} (W/m^2) saadaan kaavasta (Nevander & Elmarsson 1994)

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (2.14)$$

missä,

T_{sur} on ympäröivien pintojen lämpötila ($^{\circ}\text{C}$, K)

Auringonsäteilyä käsitellään rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa vaipan ulkopintaan vaikuttavana lämmönlähteenä, jonka seurauksena ulkopinnan lämpötila ja vaipan läpäisevä lämpövirta muuttuu. Auringon vaikutusta rakenteessa voidaan tarkastella niin sanotun ekvivalentin ulkolämpötilan T_{ekv} avulla, joka ottaa huomioon auringonsäteilyn, pitkäaaltoisen lämpösäteilyn, ulkoilman konvektion ja pinnassa tapahtuvien kosteuden faasimuutosten vaikutukset. Ekvivalentti ulkolämpötila, T_{ekv} ($^{\circ}\text{C}$, K) saadaan stationääritilassa kaavasta (Hagentoft 2001)

$$T_{ekv} = T_e + \frac{1}{\alpha_e} (\alpha_{sol} I_{sol,N+D} + gh_v + (T_{sky} - T_e) \alpha_{rad,e}) \quad (2.15)$$

missä,

T_e on ulkoilman lämpötila ($^{\circ}\text{C}$, K)
 α_e on ulkopinnan lämmönsiirtokerroin ($\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$)
 α_{sol} on lyhytaaltoisen auringonsäteilyn absorptiokerroin ($\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$)
 $I_{sol,N+D}$ on ulkopintaan absorboitunut auringon lyhytaaltoinen säteily (W/m^2)
 g on ulkoilmasta pintaan kondensoituva kosteusvirta ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$)
 h_v on veden höyrystymislämpö, $2,5 \times 10^6$ (J/kg)
 T_{sky} on taivaan tehollinen lämpötila ($^{\circ}\text{C}$, K)
 α_{rad} on ulkopinnan säteilyn lämmönsiirtokerroin ($\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$)

Pinnan ja ilman välistä lämmönsiirtoa tarkasteltaessa johtumalla siirtyvä lämpövirran osuus on marginaalisen pieni muihin lämmönsiirtotapoihin verrattuna, minkä takia se jätetäänkin usein laskennassa ottamatta huomioon. Näin ollen ulkopinnan lämmönsiirtokerroin α_e muodostuu säteilyn ja konvektion lämmönsiirtokertoimien summasta eli

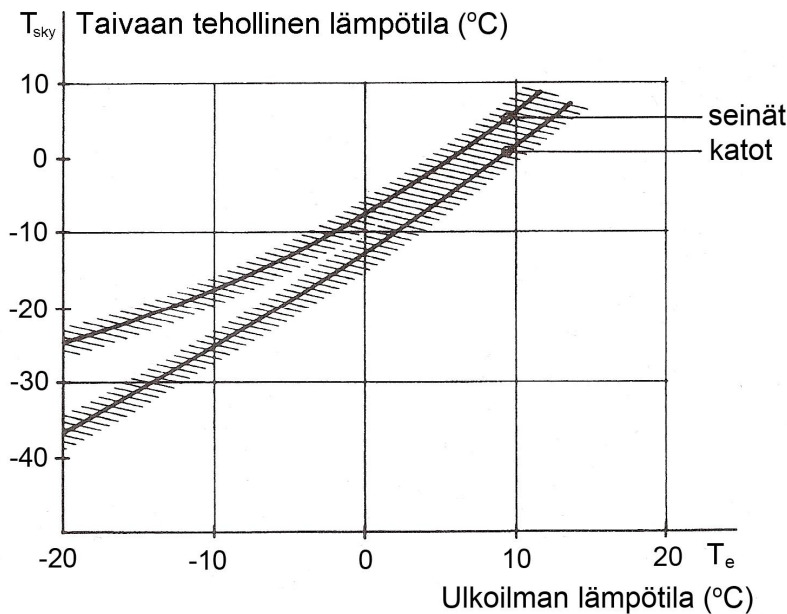
$$\alpha_e = \alpha_{rad} + \alpha_{conv} \quad (2.16)$$

missä,

α_{rad} on ulkopinnan säteilyn lämmönsiirtokerroin ($\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$)

α_{conv} on ulkopinnan konvektion lämmönsiirtokerroin ($\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$)

Jokainen kappale, jonka lämpötila on korkeampi kuin absoluuttisessa nollassa ($-273,15\text{ }^\circ\text{C}$), lähettää pitkäaaltoa lämpösäteilyä (Björkholtz 1997). Rakennuksen pinnasta ulospäin siirtyvän lämpösäteilyn määrä riippuu ilmakehässä olevasta vesihöyrystä, taivaan pilvisyydestä ja pinnan laadusta. Rakennuksen pinnasta taivaalle lähtevän lämpösäteilyn ja ilmakehästä rakennuksen pintaan tulevan lämpösäteilyn (vastasäteilyn) erotusta kutsutaan teholliseksi ulossäteilyksi ja se on suurimmillaan yöaikaan, kun taivas on täysin pilvettömä ja ilma samalla kirkas. (Angervo 1948). Mitä suurempi on pinnan tehollinen ulossäteily niin sitä alhaisempi on taivaan tehollinen lämpötila ulkoilman lämpötilaan verrattuna. Kirkkaina öinä taivaan tehollinen lämpötila voi olla jopa $10\text{--}20\text{ }^\circ\text{C}$ alhaisempi kuin ilman lämpötila (Björkholtz 1997). Tämän seurauksena kirkkaana yönä rakenteen pinta jäähtyy voimakkaasti ja laskee ulkoilman lämpötilaa alemmaksi saavuttaen lopulta taivaan tehollisen lämpötilan. Tämä saattaa näkyä vesihöyryn tiivistymisenä tai härmistymisenä rakenteen pinnoille. Kuvassa 2.3 on esitetty taivaan tehollisen lämpötilan ja ulkoilman lämpötilan välinen riippuvuus kirkkaana yönä. Kuvasta voidaan havaita, että seinän ulkopinnan lämpötila on pilvettömänä yönä noin viisi astetta kylmempi kuin ympäröivän ilman lämpötila.



Kuva 2.3. Taivaan tehollisen lämpötilan ja ulkoilman lämpötilan välinen riippuvuus kirkkaana yönä. (Nevander & Elmarsson 1994)

Käyrä voidaan yksinkertaistaa lineaariseksi suoraksi, jolloin ulkoseinätarkasteluissa käytettävä taivaan tehollinen lämpötila T_{sky} ($^\circ\text{C}$, K) kirkkaana yönä voidaan ratkaista kaavasta (Hagentoft 2001)

$$T_{sky} = 1,1 \cdot T_e - 5 \quad (2.17)$$

Rakennuksen ulkovaipan päiväaikaisissa tarkasteluissa voidaan riittävällä tarkkuudella olettaa, että $T_{sky} = T_e$. Tutkittaessa auringonsäteilyn vaikutusta kesäaikana päivällä, ei pintakondenssia rakennuksen vaipan ulkopintaan synny, jolloin kaava 2.15 sievenee muotoon (Viljanen 1984)

$$T_{ekv} = T_e + \frac{\alpha_{sol} I_{sol,N+D}}{\alpha_e} \quad (2.18)$$

Vaipan ulkopinnan lämpötila määritetään ekvivalentin ulkolämpötilan avulla, kun tiedetään rakenteen sisälämpötila ja rakennekerroksen lämmönvastukset. Ulkoseinän ulkopinnan lämpötila T_{se} voidaan määrittää kaavasta (Nevander & Elmarsson 1994)

$$T_{se} = T_{ekv} + \frac{R_{se}}{R_T} (T_i - T_{ekv}) \quad (2.19)$$

missä,

$$\begin{aligned} T_i & \text{ on } && \text{sisäilman lämpötila (}^\circ\text{C, K)} \\ R_T & \text{ on } && \text{rakenteen kokonaislämmönvastus (m}^2\text{K/W)} \\ R_{se} & \text{ on } && \text{ulkopinnan pintavastus, } R_{se} = (\alpha_{rad} + \alpha_{conv})^{-1} \text{ (m}^2\text{K/W)} \end{aligned}$$

Rakennuksen ulkopinnan säteilyn lämmönsiirtokerroin α_{rad} (W/(m²K)) saadaan kaavasta (Björkholz 1997)

$$\alpha_{rad} = 4\varepsilon\sigma \left(\frac{T_{se} + T_{sky}}{2} \right)^3 \quad (2.20)$$

Säteilyn lämmönsiirtokertoimen arvo vaihtelee ulkoilmassa tyypillisesti välillä 3-6 W/(m²K) (Nevander & Elmarsson 1994). Pintojen välinen nettosäteilyn lämpövirran tiheys q_{rad} (W/m²) voidaan rakennuksen ulkoseinälle laskea vastaavalla kaavalla kuin mitä esitettiin konvektion yhteydessä (ks. kaava 2.7) (Nevander & Elmarsson 1994)

$$q_{rad} = \alpha_{rad} (T_{ekv} - T_{se}) \quad (2.21)$$

missä,

$$\alpha_{rad} \quad \text{on} \quad \text{tarkasteltavan pinnan säteilyn lämmönsiirtokerroin (W/(m}^2\text{K))}$$

Laskennassa käytettävä auringon säteilyteho koostuu suoran säteilyn ja hajasäteilyn (difuusin säteilyn) summasta. Auringon asema taivaalla määritetään auringon korkeuskulman ja atsimuutin avulla. Auringon säteilyteho riippuu ulkoseinillä auringon kohta-

uskulmasta. Ilmakehän läpäisevästä säteilystä käytetään nimitystä suora säteily. Vaipan pystysuoralle pinnalle kohtisuoraan tulevan suoran säteilyn teho $I_{sol,N}$ (W/m^2) saadaan kaavasta (Wufi [viitattu 14.7.2011])

$$I_{sol,N} = I_{sol} \cos \gamma \cos \phi = (I_{glob} - I_{diff}) \cos \gamma \cos \phi \quad (2.22)$$

missä,

γ	on	auringon korkeuskulma ($^\circ$)
ϕ	on	säteilyn alaisen pinnan aurinkoatsimuutti ($^\circ$)
I_{glob}	on	kokonaissäteilyn teho vaakapinnalle (W/m^2)
I_{diff}	on	hajasäteilyn teho vaakapinnalle (W/m^2)

Auringon korkeuskulma mitataan vaakatasosta, ja se saa arvoja välillä $0 \dots 90$ astetta. Atsimuuttikulma mitataan joko etelästä tai pohjoisesta lähtien laskentamenetelmästä riippuen. Tässä tutkimuksessa nollasuuntana on etelä. Auringonsäteily, joka heijastuu ja siroaa pilvistä ja ilmakehässä olevista ainehiukkasista on niin kutsuttua hajasäteilyä eli diffuusia säteilyä. Diffuusin säteilyn teho kohtisuoraan tarkasteltavalle seinäpinnalle, I_D (W/m^2) on (Wufi [viitattu 14.7.2011])

$$I_D = I_{diff} \left(\cos \frac{\beta}{2} \right)^2 = \frac{1}{2} I_{diff} \quad (2.23)$$

missä,

β	on	pinnan kaltevuuskulma ($^\circ$), pystysuora seinä: $\beta = 90^\circ$
---------	----	--

Laskennassa diffuusi säteily oletetaan kaikkiin suuntiin tasan jakautuneeksi ja suunta-riippumattomaksi. Sen suuruus riippuu ainoastaan pinnan kaltevuuskulmasta (ks. kaava 2.23). Pintaan tulevan kokonaissäteilyn teho $I_{sol,N+D}$ (W/m^2) on suoran säteilyn ja hajasäteilyn summa eli

$$I_{sol,N+D} = I_{sol,N} + I_D \quad (2.24)$$

Laskennassa voidaan ottaa huomioon myös auringonsäteily, joka heijastuu ympäristöstä, esimerkiksi maan pinnasta, pitkäaaltoisena lämpösäteilynä tarkasteltavaan seinäpintaan. Lämpösäteilyn määrä riippuu ympäristön auringonsäteilyn heijastuskertoimesta ρ_g . Ympäristöstä heijastuvalla säteilyllä on merkitystä seinän pintalämpötilaan tapauksessa, jossa seinäpinnan heijastuskerroin poikkeaa merkittävästi maan pinnan heijastuskertoimesta. Heijastuskertoimen suuruus on asfaltilla 0,10 ja puhtaalla lumella 0,85 (Viljanen 1984). Maanpinnasta seinään heijastuva säteily I_e (W/m^2) saadaan kaavasta (Wufi [14.7.2011])

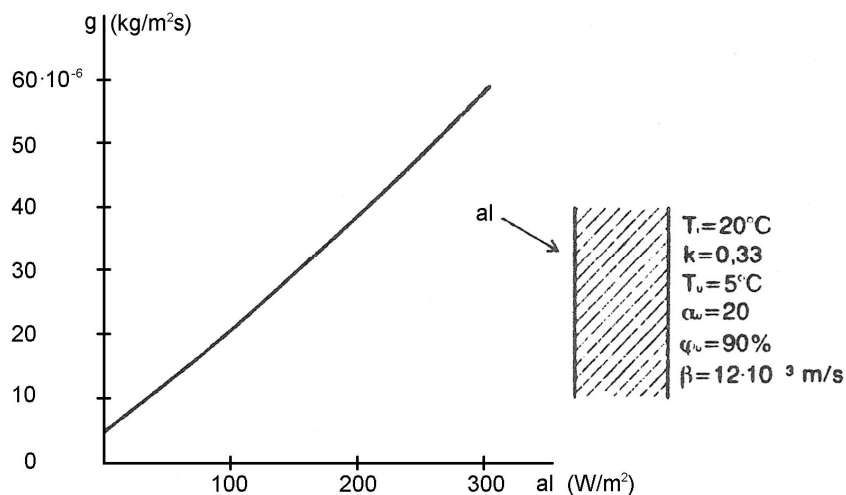
$$I_e = \rho_g I_{glob} \left(\sin \frac{\beta}{2} \right)^2 \quad (2.25)$$

missä,

ρ_g on maan heijastuskerroin (-)

Tässä tutkimuksessa ei oteta huomioon auringonsäteilyä, joka heijastuu maasta seinäpintaan pitkäaaltoisena lämpösäteilynä. Pidempikestoissa säteilytarkasteluissa pinnalle tuleva auringonsäteily vaihtelee ajan funktiona, jonka takia tarkastelu suoritetaan numeerisella laskennalla.

Materiaalit absorboivat auringon spektrin infrapuna- eli termistä säteilyä, jolloin materiaalien lämpötila nousee. Materiaalin absorboima säteily määrä riippuu materiaalin väristä ja pinnan laadusta (ks. liite 1). Auringonsäteily nostaa rakenteen pintalämpötilaa ja samalla pinnan läheisen ilman lämpötilaa. Tämä lisää ilman kyllästysvajausta, jolloin rakenteiden kuivuminen tehostuu (Viljanen et al. 1997). Auringonsäteilyllä on myös kosteutta rakenteiden ulko-osista sisälle siirtävä vaikutus. Kosteuden siirtyminen seinärakenteen sisäosiin on merkittävää varsinkin tiilimuuratuissa julkisivuissa, joissa viistosade on kastellut rakennetta. Seinärakenteen ulko-osiin ja muurauksen taakse päässyt kosteus haihtuu auringonsäteilyn vaikutuksesta muurauksen takana olevaan tuuletusrakoon ja siirtyy seinän sisäosiin diffuusiovirtauksen seurauksena. Rakenteen pintalämpötila ja rakenteesta haihtuva vesimäärä riippuu auringonsäteilyn voimakkuudesta. Kuvassa 2.4 on esitetty haihtuvan kosteuden määrän riippuvuus auringonsäteilystä yhdelle seinärakenteelle.



Kuva 2.4. Erään seinärakenteen kuivumisnopeus auringonsäteilyn funktiona. (Björkholtz 1987)

Auringonsäteilyn keskimääräinen voimakkuus kohtisuoraan pintaa vasten Vantaan ilmastossa vuosina 1980-1998 on eteläjulkisivulla 100 W/m^2 ja pohjoisella julkisivulla 46

W/m^2 (Tietäväinen 2012). Kun pinnan absorptiokerroin lyhytaaltoiselle säteilylle on 0,9, saadaan kuivumisnopeudeksi kuvasta 2.4 eteläsivulla $20 \text{ kg}/(m^2s)$ ja pohjoissivulla $10 \text{ kg}/(m^2s)$. Haihtuminen eteläseinästä on siis keskimäärin 2 kertaa nopeampaa kuin pohjoisseinästä.

2.2 Kosteuslähteet

Ulkoseinärakennetta rasittavia kosteuslähteitä ovat sade, sisä- ja ulkoilman kosteus ja rakennusaikainen kosteus. Sisäilman kosteus on peräisin sisätilan käytöstä vapautuvasta kosteudesta: pyykin kuivattamisesta, peseytymisestä ja ruuanlaitosta sekä ihmisistä ja eläimistä vapautuneesta kosteudesta. Se riippuu myös ilmanvaihdosta ja tätä kautta ulkoilman kosteuspitoisuudesta. Sisäilman kosteuspitoisuus on kuivatettuja tiloja lukuun ottamatta pääsääntöisesti korkeampi kuin ulkoilman kosteuspitoisuus (Hemmilä 1988). Näin ollen sisäilman kosteuslisällä on merkittävä vaikutus ulkoseinärakenteen kosteustekniseen toimintaan.

Rakennuksen ulkopuolinen kosteusrasitus vaihtelee voimakkaasti vuodenaikojen ja ympäristöolosuhteiden mukaan. Se voi olla rakennusta kuivattava tai kasteleva riippuen auringonsäteilyn, viistosateen ja ulkoilman suhteellisen kosteuden voimakkuudesta. Materiaalien valmistuksen, kuljetuksen, varastoinnin tai rakennustyön aikana rakenteisiin voi sitoutua ylimääräistä kosteutta, jonka määrä riippuu useasta tekijästä. Näin ollen sen tarkka määrittäminen on vaikeaa. Rakennusaikaisen kosteuden määrään vaikuttavat huomattavasti muun muassa materiaalien valmistusmenetelmä ja rakennusaikainen suojaus. Tämän takia rakennusaikaisen kosteuden vaikutus jätetään tässä tutkimuksessa huomioimatta.

2.2.1 Ilman kosteus

Ilma on usean kaasun seos. Ilmakehän alaosissa kaasujen seossuhteet pysyvät likimain vakiona, ainoastaan vesihöyrynpitoisuus vaihtelee. Näin ollen ilmaa voidaan tarkastella kuivan ilman ja vesihöyryn seoksena. Jokaisella kaasulla on oma osapaineensa, jolloin kokonaispaine on kuivan ilman (kaasuseoksen) ja vesihöyryn osapaineen summa. Rakennusteknisissä tarkasteluissa ilma voidaan olettaa ideaalikaasuksi, joka noudattaa kaasujen tilanyhtälöä (Björkholz 1997)

$$pV = \frac{m}{M} RT \quad (2.26)$$

missä,

p on kaasun paine (Pa)
 V on kaasun tilavuus (m^3)

m	on	kaasun massa (kg)
M	on	kaasun moolimassa (kg/mol)
R	on	yleinen kaasuvakio, 8314,3 (J/(kmolK))
T	on	ilman lämpötila (K)

Ideaalikaasujen tilanyhtälössä molekyylit oletetaan pistemäisiksi ja niiden oletetaan olevan vuorovaikutuksessa keskenään vain elastisten törmäysten kautta. Todellisilla eli niin sanotuilla reaalikaasuilla hiukkasten välillä on vuorovaikutusenergioita, jotka vaikuttavat kaasun paineeseen ja tilavuuteen. Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa käytetyissä lämpötiloissa ja normaalissa ilmanpaineessa (101325 Pa) kaavan 2.26 mukainen korrelaatio on kuitenkin riittävän lähellä reaalikaasujen mallia. Kaasujen yleisestä tilanyhtälöstä (kaava 2.26) saadaan vesihöyrypitoisuudeksi v (kg/m³)

$$v = \frac{m}{V} = \frac{p_v M_v}{RT} = \frac{p_v M_v}{R(273,15 + \theta)} \quad (2.27)$$

missä,

M_v	on	veden moolimassa, 18,02 (kg/kmol)
θ	on	ilman lämpötila (°C)

Ilman kosteudella tarkoitetaan ilmassa kaasumaisessa muodossa olevaa veden (vesihöyryn) määrää. Ilmaan sitoutunut vesimäärä on riippuvainen vallitsevasta lämpötilasta, ja se on sitä suurempi, mitä korkeampi on ilman lämpötila (ks. kuva 2.5). Nestemäisen ja kaasumaisen veden välisestä tasapainotilanteesta johtuen ilman sisältämällä absoluuttisella kosteudella (g/m³) on yläraja, niin sanottu kyllästyskosteus. Tässä tilassa ilma on täysin vesihöyryn kyllästämää ja kosteus tiivistyy pisaroiksi. Kylläisessä tilassa ilman suhteellinen kosteus on 100 %. Suhteelliseen kosteuteen vaikuttaa vesihöyryn absoluuttinen kosteus ja ilman lämpötila. Suhteellinen kosteus ilmoittaa absoluuttisen vesihöyrypitoisuuden (paineen) ja kyllästyskosteuspitoisuuden (kyllästyspaineen) välisen suhteen. Se siis kuvaa kuinka lähellä kastepistettä ollaan. Suhteellinen kosteus φ voidaan määrittää kaavoista (Siikanen 1996)

$$\varphi = \frac{p_v}{p_{v,sat}}, \quad \varphi = \frac{v}{v_{sat}} \quad (2.28)$$

missä,

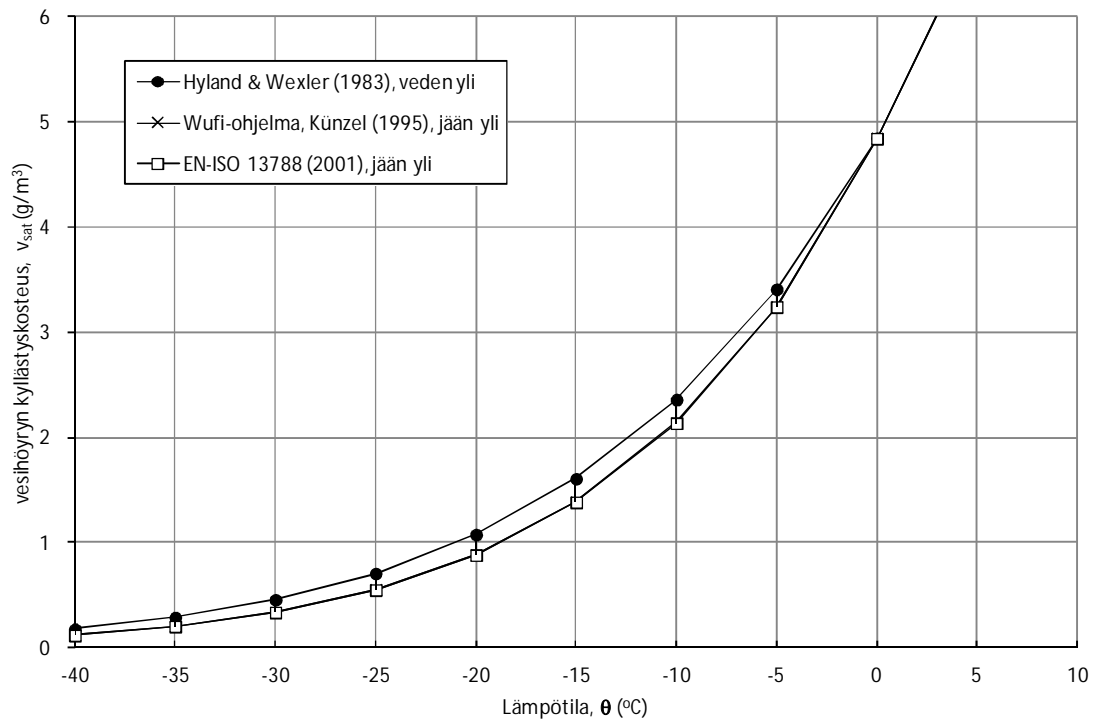
p_v	on	vesihöyryn osapaine (Pa)
$p_{v,sat}$	on	vesihöyryn kyllästyspaine vallitsevassa lämpötilassa (Pa)
v	on	vesihöyryn kosteuspitoisuus (g/m ³)
v_{sat}	on	vesihöyryn kyllästyspitoisuus vallitsevassa lämpötilassa (g/m ³)

Veden kemiallisista ominaisuuksista johtuen vesihöyry härmistyy helpommin jääkiteisiin kuin tiivistyy pisaroihin. Tämän takia veden kyllästyskosteus nollan alapuolisissa lämpötiloissa on veden suhteen suurempi kuin jään suhteen (ks. kuva 2.5). Vesihöyrynpaine ilmassa voi olla pakkasella korkeampi kuin vesihöyryn kyllästyspaine jään yli tilanteissa, jossa maassa ei ole lunta tai kun ilmasto muuttuu hetkellisesti. Hygroskooppiset materiaalit saavuttavat tasapainokosteuden tyypillisesti nestemäisen veden suhteen. Vesihöyryn kyllästyspaine $p_{v,sat}$ (Pa) nestemäisen veden suhteen voidaan laskea kaavasta (Hyland & Wexler 1983)

$$\begin{aligned} \ln p_{v,sat} = & -0,58002206 \times 10^4 T^{-1} + 0,13914993 \times 10^1 \\ & -0,48640239 \times 10^{-1} T + 0,41764768 \times 10^{-4} T^2 \\ & -0,14452093 \times 10^{-7} T^3 + 0,65459673 \times 10^1 \ln(T) \end{aligned} \quad (2.29)$$

Ilmatieteellisissä mittauksissa ja kosteutta mittaavissa antureissa suhteellinen kosteus annetaan yleensä veden yli olevina arvoina (Vaisala 2009), kun taas rakennusfysiikan sovelluksissa ja ohjelmissa käytetään tyypillisesti jään yli olevia arvoja. Tässä tutkimuksessa käytettävä WUFI-ohjelma käyttää laskenta-analyyseissa vesihöyryn kyllästyspainetta $p_{v,sat}$ (Pa), joka on laskettu jään yli kaavalla 2.30 (Künzel 1995), joka on likimain sama mitä on esitetty standardissa EN-ISO 13788 (2001). Tämä havaitaan kuvasta 2.5, kun tarkastellaan lämpötila-aluetta 0...-40 °C.

$$p_{v,sat} = \begin{cases} 611 e^{\frac{17,08\theta}{234,18+\theta}}, & \text{kun } \theta \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 611 e^{\frac{22,44\theta}{272,44+\theta}}, & \text{kun } \theta < 0 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases} \quad (2.30)$$



Kuva 2.5. Vesihöyryn kyllästyspitoisuuden muuttuminen lämpötilan funktiona veden ja jään suhteen. (Vinha 2007)

Ilman sisältämä kosteus kulkeutuu rakenteisiin joko vesihöyrypitoisuuseron (osapaine-eron) vaikutuksesta diffuusion muodossa tai rakenteen eri puolilla vallitsevan ilmanpaine-eron aiheuttaman konvektiovirtauksen kuljettamana (Siikanen 1996). Ilmassa oleva vesihöyryn määrä vaikuttaa myös suoraan huokoisen aineen kosteussisältöön sen hakeutuessa tasapainoon ympäristönsä kanssa.

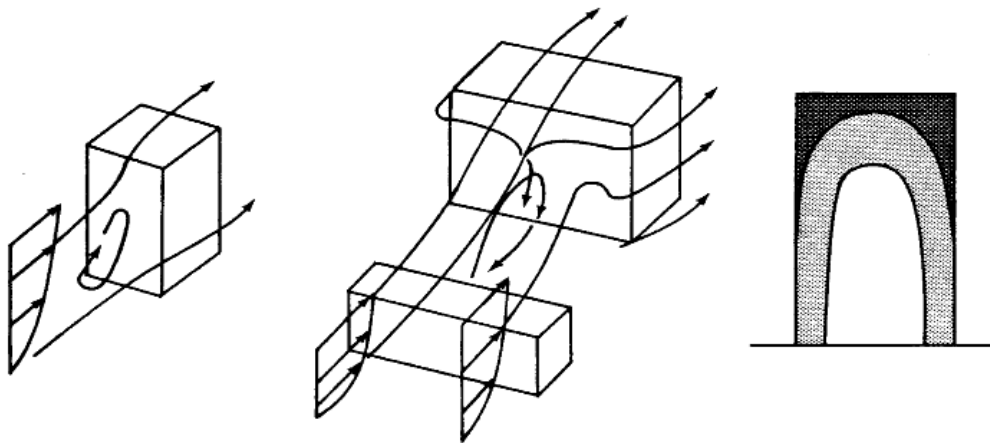
2.2.2 Viistosade

Sade voi esiintyä lumena, vetenä tai räntänä. Seinärakenteiden kannalta merkittävä tekijä on vetenä tulevan sateen vaakakomponentti eli viistosateen intensiteetti. Viistosateen määrä riippuu sateen ja tuulen voimakkuudesta, sadepisaroiden koosta, rakennuksen muodosta sekä ilmavirtauksista rakennuksen ympärillä.

Keskimäärin puolet koko vuoden sademäärästä tulee syys-marraskuussa. Vapaan viistosateen osuus pystysuoran sateen määrästä on noin 20-30 % (Björkholz 1997). Sateisimmilla alueilla: etelärannikolla, Pohjois-Karjalassa ja Pirkanmaalla vuosittainen sadanta on yli 650 mm, josta viistosateen osuus on noin 100-200 mm/vuosi (Ilmatieteenlaitos 2011 [viitattu 2.8.2011]). Seinän yläosaa rasittava viistosade on likimain puolet vapaan viistosateen kokonaismäärästä. (Metiäinen 1984) Viistosateen määrä riippuu suuresti myös rakennuksen sijainnista, rakennuksen keskinäisistä väleistä ja ympäröivän

puuston määrästä. Rakennuksen ulkoisella muotoilulla voidaan vaikuttaa ilmavirtauksiin ja täten ulkoseinään osuvaan viistosateen määrään. Esimerkiksi pitkät räystäät pienentävät alapuolisen seinän virtauksia ja seinään kohdistuvaa viistosaderasitusta. (Lehtinen & Viljanen 1989)

Viistosateen määrä on suoraan verrannollinen tuulen nopeuteen. Tuulet ovat voimakkaimpia meren rannikkoalueilla ja laajoilla peltoaukeilla, joissa maanpinnan epätasaisuus ja kasvillisuus eivät rajoita ilmavirtausta. Aukeassa maastossa viistosateelle alttiimpia ovat yleensä eteläsivut (Virta 2000) ja rannikkoalueilla lounaanpuoleiset julkisivut (Metiäinen 1984). Tuulen vaikutuksesta rakennuksen ympärille muodostuu virtauskenttä, jossa tuulen nopeus voi huomattavasti poiketa vapaan tuulen arvosta. Tuulen virtausnopeudet ovat etenkin rakennuksen reuna-alueilla suuria, joka näkyy viistosateen suurempana jakautumisena rakennuksen yläosissa ja nurkka-alueilla (ks. kuva 2.6). Toisen rakennuksen suojaava vaikutus on huomattava. Viistosateen osuus eteläsivulla on keskimäärin 10-50 % ja kulma-alueilla 50-85 % suoran sateen määrästä (Nieminen 1988).



Kuva 2.6. Tuulen ja viistosateen periaatteellinen jakautuminen ulkoseinällä. (Metiäinen 1984)

Lacy (1965) on esittänyt vapaalle viistosateelle r_v (mm/h) empiirisen yhtälön, joka perustuu sadepisaran keskimääräisen koon ja putoamisnopeuden väliseen korrelaatioon (katso Straube & Burnett 1997):

$$r_v = 0,222 \cdot v \cdot r_h^{0,88} \quad (2.31)$$

missä,

v on tuulen nopeus (s/m)
 r_h on vaakapinnalle tulevan sateen intensiteetti (mm/h)

Kaava 2.31 on usein yksinkertaistettu olettamalla, että viistosade on lineaarinen funktio tuulen nopeudesta ja sademäärästä eli

$$r_v = 0,222 \cdot v \cdot r_h = DRF \cdot v \cdot r_h \quad (2.32)$$

missä,

DRF on viistosadekerroin, Driving Rain Factor (s/m)

Lacyn yhtälön mukaisesti vapaa viistosade koostuu halkaisijaltaan 1,2 mm pisaroista, joiden putoamisnopeus on $v_f = (1/0,222) \text{ m/s} = 4,5 \text{ m/s}$. Tuulen virtaukset rakennuksen ympärillä aiheuttavat sadepisaran lentoradan poikkeamia, josta johtuen viistosateen määrä rakennuksen pinnalla on erilainen kuin vapaassa tuulen virtauksessa. Viistosadekerroin riippuu rakennuksen korkeudesta sekä ympäröivien rakennusten ja puiden suojaavasta vaikutuksesta. Mittauksin on todettu, että viistosadekerroin vaihtelee rakennusten koosta riippuen välillä 0,02...0,26. (Blocken & Carmeliet 2004) Vapailla pinnoilla, rakennuksen yläosissa ja aukeassa maastossa, joissa ei ole ympäröiviä rakennuksia tai puita suojana, viistosadekerroin on likimain 0,2. Rakennuksen julkisivun keskellä viistosadekerroin on huomattavasti pienempi, yleensä noin 0,07 s/m, ja suojattomissa kulma-alueilla jopa suurempi kuin 0,2 s/m. (Künzel et al. 2000) Matalissa rakennuksissa puustolla ja muiden rakennusten suojaavalla vaikutuksella on suuri vaikutus viistosadekertoimen arvoon. Wufi-ohjelmassa on ehdotettu neljää eri viistosadekerrointa r_s (s/m) rakennuksen korkeudesta riippuen:

<i>matala rakennus, $h < 10 \text{ m}$;</i>	$r_s = 0,07 \text{ s/m}$
<i>korkean rakennuksen alaosa, $h < 10 \text{ m}$</i>	$r_s = 0,05 \text{ s/m}$
<i>korkean rakennuksen keskiosa, $h = 10\text{-}20 \text{ m}$</i>	$r_s = 0,1 \text{ s/m}$
<i>korkean rakennuksen yläosa, $h > 20 \text{ m}$</i>	$r_s = 0,2 \text{ s/m}$

Tässä tutkimuksessa viistosateen vaikutusta tutkitaan matalassa ja korkeassa rakennuksessa käyttämällä viistosadekertoimelle arvoa 0,07 matalissa rakennuksissa ($h \leq 10 \text{ m}$) ja 0,2 korkeissa rakennuksissa ($h \geq 20 \text{ m}$). Viistosateen määrä R_s ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$) seinäpinnalle lasketaan käyttämällä Künzelin (1995) yhtälöä, jonka mukaan viistosade on suoraan verrannollinen tuulen nopeuteen, sademäärään ja viistosadekertoimeen:

$$R_s = r_s v R_N \quad (2.33)$$

missä,

r_s	on	viistosadekerroin (s/m)
v	on	tuulen nopeus kohtisuoraan pintaa vasten (m/s)
R_N	on	vaakapinnalle tulevan sateen intensiteetti ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$)

Korkeissa rakennuksissa kaava 2.33 antaa likimain saman tuloksen kuin Lacyn yksinkertaistettu yhtälö (ks. kaava 2.32). Vaakapinnalle tuleva sademäärä ja tuulen nopeus pohjautuvat paikkakuntaan ilmastotietoon. Julkisivupintaan imeytyvä sademäärä g_w ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$) riippuu pinnan adsorptiokertoimesta a_r seuraavan yhtälön mukaisesti (Künzel 1995):

$$g_w = a_r R_s \quad (2.34)$$

Pinnan adsorptiokerroin kuvaa sitä osuutta viistosademäärästä, joka kiinnittyy seinäpintaan. Se on siis yksikötön luku, joka riippuu pinnan karkeudesta, suunnasta ja kaltevuudesta. Tarkkoja tutkimuksia pinnan vaikutuksesta ei ole olemassa. Tämän takia aikaisemmissa tutkimuksissa käytetyt imeytymiskertoimien arvot perustuvat lähinnä empiirisiin havaintoihin. Vaakapinnalla on kertoimen arvona käytetty yleisesti ykköstä, koska pinnalta roiskuva vesi putoaa takaisin alustaansa. (Künzel et al. 2000) Tarkasteltaessa ulkoseinän vettymisaikaa laskennallisesti ajan funktiona voidaan havaita, että sadeveden imeytyminen betoniseinällä on huomattavasti pienempää kuin tiili- ja rappauspinnoissa. Näihin havaintoihin perustuen Künzel (1994) on päätenyt käyttämään tiilirakenteelle, rappaukselle ja kevytbetonille arvoa 0,7 ja normaalille betonille arvoa 0,2 (katso Koronthályová & Matiasovský 2000). Vesitiiviillä elastomeerilla päällystetyillä rappauspinnoilla on käytetty sadeveden absorptiokertoimen arvoa 0,03-0,10 pinnoitteen tiiviyydestä riippuen (Decareau et al. 2007). Toinen vaihtoehto on käyttää laskennassa ohutta materiaalikerrosta, jolla on pinnoitetta vastaavat kapillaarisuus- ja vesihöyrynläpäisevyysominaisuudet. Tällöin sateen adsorptiokertoimen arvo voidaan käyttää pinnoitetulla rappauspinnalla arvoa 0,7 (Zirkelbach 2011).

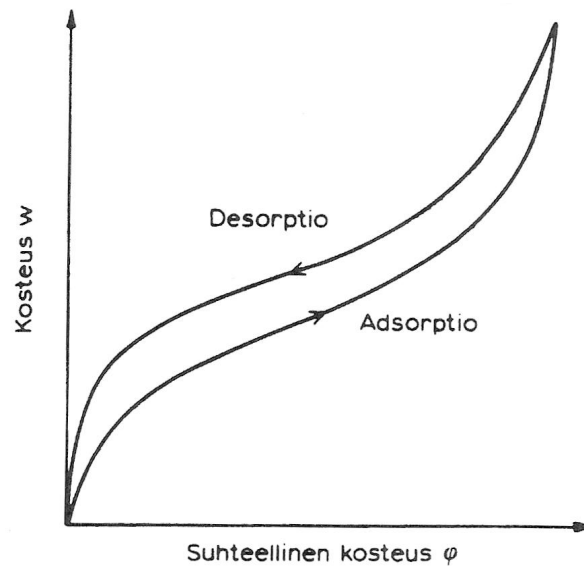
Aikaisemmissa tutkimuksissa maalatuilla puuverhotuilla pinnoilla sadeveden adsorptio ei ole otettu huomioon (esimerkiksi Evrard & Herde 2010; Kehl et al. 2009). Tämä on kuitenkin epävarmalla puolella, koska julkisivumaalit eivät estä sadeveden imeytymistä kokonaan. Puujulkisivu on yleensä myös tehty raakalaudasta, joka edistää sadeveden imeytymistä. Tässä tutkimuksessa oletetaan, että viistosateesta 50 % kiinnittyy puuverhoukseen ja siirtyy kapillaarisesti takana olevaan tuuletusrakoon. Raekuuron ja lumisateen sattuessa a_r -kerroin on likimain nolla (Künzel 1995), jonka takia tässä tutkimuksessa on tehty oletus, että viistosadetta ei oteta laskennassa huomioon, mikäli tarkasteluhetkeä edeltävien kolmen tunnin lämpötilakeskiarvo on alle $0\text{ }^\circ\text{C}$.

2.3 Materiaalin kosteuspitoisuus ja hygroskooppisuus

Rakennusmateriaalin huokosrakenteella, kokonaishuokostilavuudella ja huokosjakauksella on merkittävä vaikutus materiaalin kosteuskäyttäytymiseen. Materiaalin sisältäessä paljon pieniä huokosia, se varastoi enemmän hygroskooppista kosteutta kuin suurihuokoinen materiaali (Siikanen 1996). Huokosissa oleva kosteus lisää lämmönsiirtoa rakenteen läpi. Tämä johtuu veden suuremmasta lämmönjohtavuudesta. Kosteuden sitoutuminen tapahtuu hygroskooppisilla materiaaleilla pääasiassa adsorptiona ja kapillaarikondensaationa (Saarimaa et al. 1989). Kapillaarikondenssin esiintyminen on edellytys materiaalin hygroskooppisuudelle. Huokoskoon ylittäessä 10^{-7} m on materiaali ei-hygroskooppista ja kosteuden sitoutuminen tapahtuu ainoastaan adsorptiona eli pinta-voimien (van der Waalsin voimien) välityksellä huokosen pintaan, eikä kapillaarikondenssia esiinny. Adsorptiona sitoutuvan veden määrä riippuu lämpötilasta, suhteellisesta kosteudesta ja materiaalin huokospinnan alasta. (RIL 155 1984)

Ollessaan kosketuksissa kosteaan ilmaan ei-hygroskooppinen materiaali pysyy kuivana, kun taas hygroskooppisen materiaalin kosteuspitoisuus seuraa ympäröivän ilman suhteellista kosteutta. Hygroskooppisessa materiaalissa vesimolekyylit sitoutuvat materiaalin huokosjärjestelmän sisäpintoihin kunnes vesimäärässä saavutetaan tasapainotila ympäristön kanssa (Künzel 1995). Tätä tasapainotilaa kutsutaan hygroskooppiseksi tasapainokosteudeksi. Tasapainokosteus ilmaistaan usein sorptioisoterminä eli tasapainokosteuskäyränä, joka kuvaa materiaalin tasapainokosteutta ilman suhteellisen kosteuden funktiona. Materiaalin tasapainokosteus riippuu lämpötilan lisäksi siitä, onko kyseessä kostuminen (adsorptio) vai kuivuminen (desorptio) (Björkholz 1997).

Hygroskooppiseen tasapainokosteuteen liittyy aina niin sanottu hystereesi-ilmiö, jonka mukaisesti desorptiossa materiaalin tasapainokosteus on suurempi kuin adsorptiossa (kuva 2.7). Tämä ilmiö mahdollistaa kosteuden siirtymisen kuivemmasta materiaalista kostempaan, jos jälkimmäisessä vallitsee suurempi huokosalipaine (RIL 155 1984). Kuvassa 2.7 esitetyt adsorptio- ja desorptiokäyrät edustavat tasapainotilanteessa olevia raja-arvoja. Todellisuudessa materiaalissa tapahtuu vuorottaista kastumista ja kuivumista, jolloin todellinen tasapainokosteus sijaitsee hystereesikäyrien välissä (Saarimaa et al. 1989).

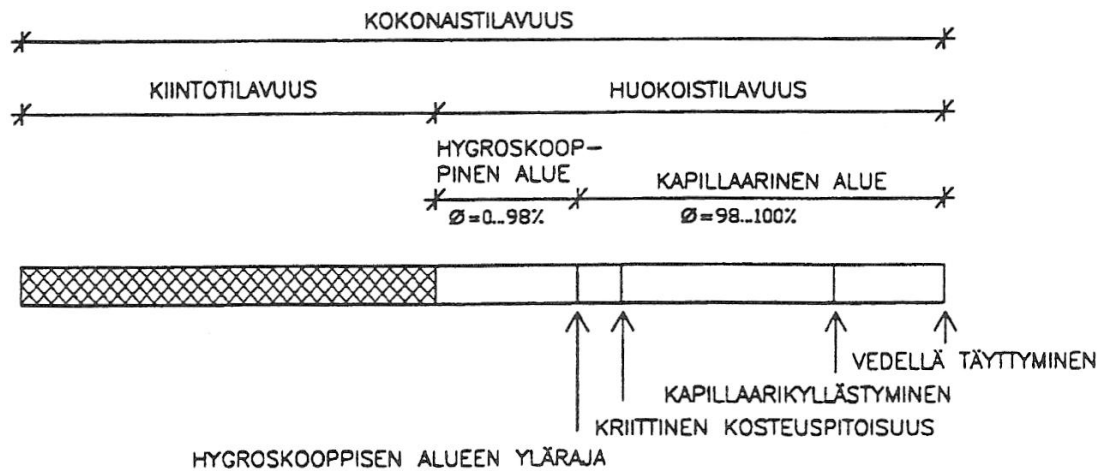


Kuva 2.7. Aineen hygroskooppisuutta kuvaava sorptiokäyrä. (Björkholtz 1990)

Hystereesi-ilmiölle on annettu useita erilaisia selityksiä (Saarimaa et al. 1989; RIL 155 1984). Eräs todennäköinen syy on niin sanottu mustepullovaikutus (Nevander & Elmarsson 1994). Materiaalin huokosverkostossa on aina laajempia osia, joihin ei synny kapillaarikondenssia. Korkeassa suhteellisessa kosteudessa suuret huokokset täyttyvät kuitenkin lopulta diffuusiovirran vaikutuksesta. Materiaalin kuivussa vesi saattaa jäädä materiaalin suuriin huokosiin, jotka ovat yhteydessä muuhun huokosverkostoon vain ohuempien huokosten kautta. Ohuissa huokosissa vesi pysyy paikallaan kapillaarivoimien eli sisäisen koheesion ja adheesion vaikutuksesta estäen samalla veden poistumisen suuremmista huokosista. Tästä ilmiöstä johtuen kapillaarisesti sitoutunut vesi jää materiaalin kuivussa osittain materiaalin huokosverkostoon ja poistuu vasta, kun ilman suhteellinen kosteus laskee riittävästi. Tämä ilmiö on ominainen hygroskooppisille materiaaleille.

Materiaali voi varastoida vain rajallisen määrän vettä tasalämpöisissä olosuhteissa. Suhteellinen kosteus, joka vastaa hygroskooppista kyllästyskosteuspitoisuutta on likimain 98 % (Björkholtz 1990). Hygroskooppisen alueen yläraja riippuu kuitenkin suuresti materiaalin huokosrakenteesta ja joillakin materiaaleilla se saavutetaan jo 95 % suhteellisessa kosteudessa (Bomberg 1974; Künzeli 1995). Kapillaarinen tiivistyminen alkaa tämän rajan yläpuolelta. Käytännössä yli 98 % huokosilman suhteellista kosteutta on vaikea saavuttaa, ellei materiaali ole suorassa yhteydessä nestemäiseen veteen (Björkholtz 1997). Kapillaarisella alueella kosteuden siirtyminen tapahtuu jatkuvana nestevirtauksena materiaaliin. Tätä pistettä, jossa kapillaarinen veden yhtäjaksoinen siirtyminen alkaa, kutsutaan usein kriittiseksi kosteuspitoisuudeksi w_{crit} . Kun materiaali on riittävän kauan kosketuksissa nestemäiseen veteen, saavuttaa se kapillaarisen kyllästyskosteuden w_{cap} . Suurinta mahdollista kosteusmäärää, jossa materiaalin kaikki huokokset ovat vedellä täyttyneitä, kutsutaan maksimikosteuspitoisuudeksi w_{max} (ks. kuva 2.8). Tämä on saa-

vutettavissa vain tyhjiökäsittelyllä, jolla voidaan poistaa kaikki ilma materiaalin huokosista. Tätä tilaa ei ole mahdollista saavuttaa normaaliolosuhteissa.



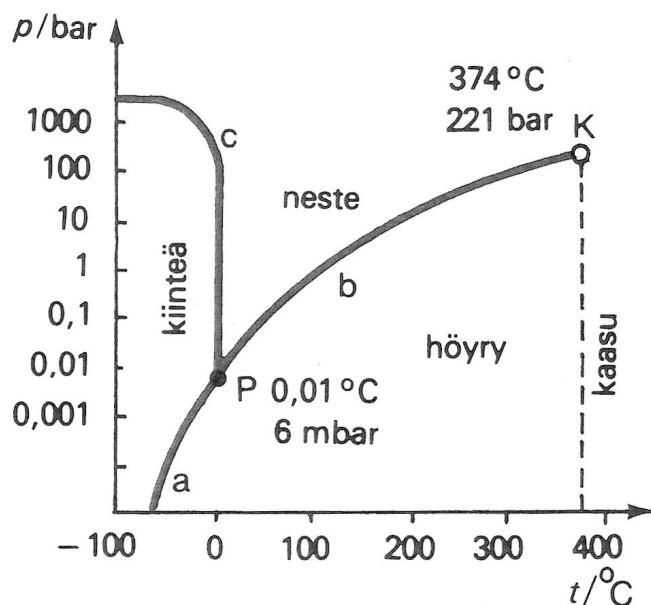
Kuva 2.8. Materiaalin kostuminen. (Björkholtz 1997)

Normaaleissa käyttöolosuhteissa rakennusmateriaalit ovat hygroskooppisella alueella ja materiaalin vesipitoisuus riippuu ympäristön suhteellisesta kosteudesta. Kapillaarinen kosteus tulee kyseeseen lähinnä silloin, kun materiaalissa on rakennusaikaista kosteutta, rakenne on kontaktissa veteen suoraan tai toisen kapillaarisesti vettä siirtävän rakenteen kautta tai kun rakenteessa on kosteusvaurio. Tällöin kosteuspitoisuus on kapillaarisella alueella. Kapillaarisessa kontaktissa olevien materiaalien välillä kosteus siirtyy materiaalista toiseen, kunnes materiaalien huokosalipaineissa saavutetaan tasapaino.

2.4 Kosteuden siirtymismuodot

Kosteuden siirtyminen tapahtuu samanaikaisesti usean eri mekanismin vaikutuksesta. Vettä nesteinä liikuttavia siirtymismuotoja rakenteessa ovat vedenpaine, tuuli, kapillaari-imu ja gravitaatiovoima ja vesihöyrynä liikuttavia siirtymismuotoja puolestaan diffuusio ja konvektio. Muuttuvassa lämpötilassa ja höyrynpaineessa kosteus saattaa muuttaa olotilaa tai siirtymismuotoa. Tällaiseen olomuodon muutokseen liittyy aina energian sitoutumista tai vapautumista, jota kutsutaan latenttilämmöksi (Hemilä & Utrianen 1989). Nesteen tai kiinteän aineen höyrystyessä suuri osa faasimuutoslämmöstä johtuu tilavuuden kasvusta. Olomuodon muutos riippuu normaalissa ilmanpaineessa lämpötilasta ja ainehiukkasten välisistä vetovoimista eli koheesiosta. Kaasu- tai nestefaasissa molekyylien keskinäinen liike on melko vapaata, jolloin ne siirtyvät tehokkaasti materiaalien rajapinnoista toiseen. Näillä olomuodoilla on myös suurin vaikutus rakenteen kosteustekniseen toimivuuteen.

Veden eri olomuodot voidaan esittää faasidiagrammina lämpötilan ja paineen funktiona (ks. kuva 2.9). Kuvasta voidaan havaita, että aineen olomuoto riippuu vallitsevasta lämpötilasta ja paineesta. Faasialueen tasapainokäyrällä vesi voi esiintyä kummassakin vallitsevassa olomuodossa. Rajakäyrät kohtaavat toisensa kolmoispisteessä, jossa kaikki kolme olomuotoa ovat tasapainossa. Vedellä kolmoispiste esiintyy oheisen faasikaavion mukaisesti olosuhteissa, joissa paine on 6 mbar ja lämpötila 0,01 °C. Kiehumiskäyrä päättyy kriittiseen pisteeseen, jota korkeammilla lämpötiloilla kaasu ei enää nesteydy puristamalla. Kyseisessä lämpötilassa molekyyileillä on niin suuri kineettinen energia, että niiden väliset vetovoimat eivät kykene sitomaan niitä toistensa vaikutuspiiriin. Veden kriittisessä pisteessä lämpötila on 374 °C ja paine 221 baaria. (Nikkola et al. 1988) Tällä pisteellä on kuitenkin harvoin merkitystä rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa.



Kuva 2.9. Veden faasidiagrammi p,t -funktiona. Kutakin faasialuetta erottaa olomuodon tasapainokäyrä: a. sublimoitumiskäyrä, b. höyrystymiskäyrä ja c sulamiskäyrä. (Nikkola et al. 1988)

Faasin muutoksessa aineen lämpötila ei muutu, koska systeemin tuotu lämpöenergia kuluu kiderakenteen rikkomiseen. Vedelle on ominaista, että sulamiskäyrä nousee vasemmalle. Tämä johtuu veden kiderakenteen muutoksesta, jossa vesi laajenee jäätyessään 9,04 %. Kiinteän faasin (jään) tiheys on näin ollen pienempi kuin nestefaasin, toisin kuin useimmilla muilla aineilla. (Isoaho & Valve 1986)

2.4.1 Vesihöyryn diffuusio

Vesihöyryn diffuusiolla tarkoitetaan kaasuseoksessa (ilmassa) tapahtuvaa vesihöyrymolekyylien liikettä, joka pyrkii tasoittamaan kaasuseoksessa vallitsevat vesihöyryn pitoisuuserot. Termodynamiikan toisen pääsäännön mukaisesti diffuusiiovirran suunta on aina kohti suurempaa entropiaa eli kaasumolekyylien määrä pyrkii tasoittumaan siirtymällä kohti matalampaa pitoisuutta. Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa diffuusiota tarkastellaan yleensä rakenteen läpi siirtyvänä kosteuden siirtymismuotona, jossa ta-

saantumisnopeus riippuu rajapinnan diffuusiovastuksesta. Diffuusiolla siirtyvä kosteusvirran tiheys g_v ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$) 1-dimensioisessa tapauksessa saadaan Fick:n laista (Mills 1999), jossa siirtyvän kosteuden määrä ainekerroksen läpi voidaan laskea käyttäen siirtävänä voimana joko vesihöyrypitoisuuseroa tai vesihöyryn osapaine-eroa.

$$g_v = -\delta_v \frac{\partial v}{\partial x} = -\delta_p \frac{\partial p_v}{\partial x} \quad (2.35)$$

missä,

δ_v	on	materiaalin vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuseron avulla ilmaistuna (m^2/s)
δ_p	on	materiaalin vesihöyrynläpäisevyys vesihöyryn osapaine-eron avulla ilmaistuna ($\text{kg}/(\text{msPa})$)
v	on	kosteusmäärä (kg/m^3)
p_v	on	vesihöyryn osapaine (Pa)

Materiaalin vesihöyrynläpäisevyys voidaan ilmoittaa myös vesihöyryn diffuusiovastuskertoimen μ avulla, joka kuvaa ilman vesihöyrynläpäisevyyden ja materiaalin vesihöyrynläpäisevyyden suhdetta eli (EN ISO 12572 2001)

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p} \quad (2.36)$$

missä,

δ_a	on	ilman vesihöyrynläpäisevyys vesihöyryn osapaine-eron avulla ilmaistuna ($\text{kg}/(\text{msPa})$)
------------	----	--

Ilman vesihöyrynläpäisevyys δ_a riippuu lämpötilasta ja ilmanpaineesta. Ulkoseinärakenteen kosteusteknisissä tutkimuksissa käytettävä Wufi-ohjelma määrittää ilman vesihöyrynläpäisevyyden kaavan 2.37 mukaisesti (Künzel 1995).

$$\delta_a = 2,0 \cdot 10^{-7} \frac{T^{0,81}}{P_n} \quad (2.37)$$

missä,

T	on	ympäröivän ilman lämpötila (K)
P_n	on	normaali ilmanpaine (101,325 Pa)

Materiaalin vesihöyrynläpäisevyydet on yleensä määritetty kuppikokeella standardin EN ISO 12572 (2001) mukaisesti. Kuppikokeessa materiaalin vesihöyrynläpäisevyys riippuu voimakkaasti kosteudesta ja vallitsevasta lämpötilasta. Ilmiö johtuu pääasiassa kos-

teuden pintadiffuusiosta ja kapillaarisesta siirtymisestä, jonka takia kuppikokeessa saatu vesihöyrynläpäisevyyden arvo onkin oikeastaan summa usean kosteussiirtomekanismin vaikutuksesta. Diffuusiolaskelmissa materiaalin vesihöyrynläpäisevyys oletetaan yleensä vakioksi, koska kapillaarisen kosteuden siirtymisen vaikutus otetaan huomioon erikseen määritettävässä kosteusdiffusiviteetin arvossa. Tässä tutkimuksessa materiaalin vesihöyrynläpäisevyys on ilmaistu pääasiassa vesihöyryyn pitoisuuserolla mitattuna δ_v -arvona, joka on määritetty kuppikokeella 23 °C lämpötilassa. Mitatut tulokset korreloivat myös kirjallisuudessa esitettyjen arvojen kanssa (Mikkilä 2001).

Ohuille kalvoille ei yleensä voida määrittää vesihöyrynläpäisevyyttä kuppikokeella, koska kalvojen paksuutta ei kyetä mittaamaan riittävällä tarkkuudella. Vesihöyrynläpäisevyys näillä materiaaleilla kuvataan vesihöyrynvastuksena Z_v , joka on riippumaton materiaalin paksuudesta. Yksittäisen ainekerroksen vesihöyrynvastus Z_v (s/m) saadaan määritettyä vesihöyryläpäisykerroimen käänteislukuna (Vinha et al. 2005a)

$$Z_v = \frac{1}{W_v} \quad (2.38)$$

missä,

$$W_v \quad \text{on} \quad \text{vesihöyrynläpäisykerroin, } W_v = \partial g / \partial(\Delta v) \quad (\text{m/s})$$

Kirjallisuudesta löytyy myös seinän sisä- ja ulkopinnalle kosteudensiirtokerroimen β_v ja vesihöyrynvastuksen $Z_{v,s}$ arvoja (Hagentoft 2001), mutta näiden arvojen vaikutus on niin pieni, että ne yleensä jätetään rakenteen vesihöyrynvastusta määritettäessä ottamatta huomioon. Suomen ilmastossa diffuusiiovirran suunta voi vaihdella ulko- ja sisäolosuhteiden muuttuessa. Tällaisessa epästationäärisessä tilanteessa, jossa kosteusvirran tiheys ei ole vakio, saadaan rakenteen läpi siirtyvä kosteusvirta määritettyä massan säilymislaista kaavan 2.39 mukaisesti (Künzel 1995)

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(-\delta_v \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (2.39)$$

Huokosissa, joiden säde on suurempi kuin 10^{-6} m, vallitsee puhdas Fickin lain mukainen diffuusio. Pienissä huokosissa, joiden säde on pienempi kuin 5×10^{-9} m, diffuusioliikkeeseen vaikuttavat molekyylien väliset törmäykset toisiinsa ja materiaalin huokosseinämiin sekä materiaalin mikrorakenne. Syntyvää makroskooppista virtausta kutsutaan Knudsenin molekyyliiikkeeksi eli effuusioksi. Materiaalin huokosissa, jotka osuvat edellä mainittujen huokosten välille, vallitsee Fickin diffuusion ja effuusion välinen niin sanottu sekoitettu molekyyliiike. (Künzel 1995) Effuusion kulkusuunta voi olla huokosissa materiaalissa joko diffuusion (Fickin diffuusion) suuntainen tai siihen nähden vastakkainen (Nevander & Elmarsson 1994).

Kaasuseos pyrkii jakautumaan molekyyli­massan suhteen siten, että raskaammat kaasumolekyylit pyrkivät alenevan lämpötilan suuntaan. Huokoisessa materiaalissa raskaampi hiilidioksidi, happi ja typpi siirtyvät pienemmän ja vesihöyry kevyempänä suuremman lämpötilagradientin suuntaan (Hemmilä 1988). Tätä makroskooppista, lämpötilagradientin aiheuttamaa molekyyli­liikettä kutsutaan termodiffuusioksi (Nevander & Elmarsson 1994). Termodiffuusion virtaussuunta on yleensä diffuusiota vastaan (RIL 155 1984).

Kosteusliikkeenä effuusiolla ja termodiffuusiolla on mitätön vaikutus kosteuden siirtymiseen, jos verrataan näiden siirtymismuotojen vaikutusta diffuusion vaikutukseen. Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa näiden liikkeiden vaikutus jätetään normaalisti ottamatta huomioon.

2.4.2 Kosteuden konvektio

Ilmavirtauksen mukana tapahtuvaa vesihöyryn siirtymistä kutsutaan kosteuden konvektioksi. Ilmavirtauksen edellytyksenä on rakenteen eri puolilla vallitseva ilmanpaine-ero. Paine-eron syntymiseen vaikuttavia tekijöitä on käsitelty aiemmin luvussa 2.1.2. Ilmavirtauksen tapahtuessa lämpimästä sisäilmasta rakenteen läpi kylmempään ulkoilmaan, virtaava ilmamassa jäähtyy ja sen seurauksena voi olla kosteuden tiivistymistä rakenteisiin. Vesihöyryn kondensoitumista tapahtuu, kun ilman kosteus ylittää vallitsevan lämpötilan kyllästyskosteuspitoisuuden. Tällöin vesihöyry voi tiivistyä materiaalin sisällä, rajapinnoissa tai rakenteen pintakerroksissa. Vastaavasti ilmavirran liikkeessä ulkoa sisäänpäin, rakenteen läpimenevä virtaus kuivattaa rakennetta, koska ilmankosteuden sitomiskyky kasvaa lämpötilan noustessa.

Vesihöyryn konvektio ilmenee huokoisessa lämmöneristeessä luonnollisena tai rakenteessa olevien reikien kautta tapahtuvana pakotettuna konvektiona. Rakenteiden toiminnan kannalta suurin merkitys on kylmänä vuodenaikana rakenteen epäjatkuvuuskohtien, saumojen, rakojen ja reikien läpi tapahtuvilla ilmavirtauksilla, jotka saattavat kuljettaa suuriakin määriä kosteutta rakenteisiin. Ilmavirtauksen mukana siirtyvä kosteus­määrä voi olla paikallisesti moninkertainen diffuusiolla siirtyvään kosteuteen verrattuna (RIL 155 1984). Konvektiolla siirtyvä kosteusvirran tiheys g_{conv} (kg/(m²s)) ilmaraon tai reiän läpi saadaan yhtälöstä (Nevander & Elmarsson 1994):

$$g_{conv} = r_a (v_{out} - v_{in}) \quad (2.40)$$

missä,

r_a on ilmavirran tiheys (m³/(m²s))

v_{out} on ilman vesihöyrypitoisuus ulosvirtausaukossa (kg/m^3)
 v_{in} on ilman vesihöyrypitoisuus sisäänvirtausaukossa (kg/m^3)

Huokoisessa materiaalissa kuten mineraalivillassa esiintyy sisäistä vesihöyryn konvektiota, joka aiheuttaa kosteuden epätasaista jakaantumista seinärakenteessa (ks. luku 2.1.2). Sisäiset ilmavirtaukset lisäävät paikallisesti rakenteen home- ja lahorisikiä (Kokko et al. 1997).

2.4.3 Kapillaarinen kosteuden siirtyminen

Kapillaarisella vedenliikkeellä tarkoitetaan kosteuden siirtymistä rakenteen huokosissa nesteenä. Kapillaarinen imu on seurausta veden pintajännitysvoimien aiheuttamasta huokosalipaineesta, jonka aiheuttajana on sitoutuneen veden alhaisempi höyrynpaine (RIL 155 1984). Huokosalipaineen voimakkuus riippuu vallitsevasta lämpötilasta. Lämpötilan noustessa veden pintajännitys laskee, josta on suoraan seurauksena myös huokosalipaineen lasku. Veden pintajännityksen σ (N/m) lämpötilariippuvuus voidaan esittää yhtälöllä (Absetz & Viljanen 1985)

$$\sigma = 78 \cdot (1 - 0,0032T) \cdot 10^{-3} \quad (2.41)$$

missä,

T on ympäröivän ilman lämpötila ($^{\circ}\text{C}$)

Materiaalin huokoseen muodostuu pintajännityksen vaikutuksesta kaareva vesipinta, niin sanottu meniskus, joka on seurausta vesimolekyylien välisestä koheesiosta sekä vesimolekyylien ja huokosseinämän välisestä adheesiosta (Künzel 1995). Painovoima ei rajoita kapillaarista siirtymistä huokosessa, jonka koko on pienempi kuin 0,01 mm (RIL 155 1984). Huokosalipaine p_c (Pa) voidaan määrittää yhtälöstä (Hagentoft 2001)

$$p_c = \frac{2\sigma}{r} \cos \phi \quad (2.42)$$

missä,

r on huokosputken säde (m)

ϕ on kosketuskulma eli reunakulma vesipinnan meniskuksen ja putken seinämän välillä ($^{\circ}$)

Kaavasta 2.42 voidaan havaita, että huokosessa vallitseva alipaine p_c (Pa) on sitä suurempi mitä pienempi on huokosen säde. Kaavassa esiintyvä kosketuskulma riippuu materiaalin ominaisuuksista ja pinnassa olevista epäpuhtauksista (Absetz & Viljanen

1985). Tavallisilla rakennusmateriaaleilla se on kuitenkin likimain nolla, jolloin yhtälö voidaan esittää muodossa (Nevander & Elmarsson 1994)

$$p_c = \frac{2\sigma}{r} \quad (2.43)$$

Huokosilman suhteellisen kosteuden φ ja huokosalipaineen p_c välille voidaan muodostaa yhteys Thomsonin kaavalla (Hagentoft 2001)

$$\varphi = \exp\left(-p_c \frac{M_v}{p_v R(T + 273,15)}\right) \quad (2.44)$$

Kaava 2.44 ilmaisee suhteellisen kosteuden, jolla huokosessa tapahtuu kapillaarikondenssi. Thomsonin kaavasta voidaan havaita, että pienissä huokosissa vesihöyryn enimmäiskonsentraatio on alhaisempi ja niissä tiivistyminen tapahtuu jo alle 100 % huokosilman suhteellisessa kosteudessa. Huokoskoon vaikutus kapillaarikondenssiin voidaan havaita selvästi, kun verrataan kahta huokossäteeltään pieniläpimittaista huokosta, makro- ja mikrohuokosta, keskenään. Makrohuokosessa, jonka säde on 10^{-9} m, tapahtuu kapillaarikondenssi jo 34 % suhteellisessa kosteudessa. Kun taas säteeltään 10^{-7} m oleva mikrohuokonen vaatii 99 % huokosilman suhteellisen kosteuden, jotta tiivistyminen voi huokosen sisäpuolella tapahtua. (Bomberg 1974)

Pyöreällä vakiosäteisellä kapillaarihuokosella veden virtausvastus kasvaa enemmän kuin imevä voima, kun materiaalin huokossäde pienenee. Tämä tarkoittaa sitä, että suuriläpimittaisessa huokosessa veden nousunopeus aikayksikössä on suurempi, vaikka maksiminousukorkeus onkin alhaisempi kuin pienemmällä huokosella. Virtausvastuksen vaikutus aikayksikössä nousukorkeuteen voidaan havaita Poiseuillen yhtälöstä (Absetz & Viljanen 1985):

$$g_{cap} = -\frac{r^2 \rho_v}{8\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{1}{M} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.45)$$

missä,

ρ_v	on	veden tiheys, $\rho_v = 1000$ (kg/m ³)
η	on	veden viskositeetti (Ns/m ²)
M	on	veden virtausvastus, $M = 8\eta/(r^2 \rho_v)$

Rakennusmateriaaleissa kapillaarisen kosteusvirran tiheys g_{cap} (kg/(m²s)) määritetään yleensä käyttämällä potentiaalina kosteuspitoisuutta eli (Hagentoft 2001)

$$g_{cap} = -D_w \frac{\partial w}{\partial x} \quad (2.46)$$

missä,

D_w on kosteusdiffusiviteetti (m^2/s)

Kosteusdiffusiviteetti kuvaa materiaalin kosteuspitoisuudessa tapahtuvaa muutosnopeutta, jolla materiaali saavuttaa tasapainokosteuden ympäröivän ilman kosteuden muuttuessa. Näin ollen suuremman kosteusdiffusiviteetin omaava materiaali saavuttaa kosteusmuutoksissa tasapainokosteuden nopeammin kuin alhaisemman D_w -arvon omaava materiaali. Kosteusdiffusiviteetti on vastaavanlainen materiaaliominaisuus kuin termien diffusiviteetti (ks. kaava 2.3). D_w :n arvossa otetaan huomioon kaikki kosteudensiirtymismuodot. Näin ollen se voidaan määrittää myös hygroskooppisella alueella, jossa kosteusdiffusiviteetti, D_w (m^2/s) saadaan kaavasta

$$D_w = \frac{\delta_v v_{sat}}{\xi_\varphi} = \delta_v v_{sat} \frac{\partial \varphi}{\partial w} \quad (2.47)$$

missä,

δ_v on vesihöyrynläpäisevyys (m^2/s)

ξ_φ on materiaalin kosteuskapasiteetti hygroskooppisella alueella (kg/m^3)

Kaavasta 2.47 voidaan havaita, että materiaalin kosteuskapasiteetti hygroskooppisella alueella on itse asiassa hygroskooppisen tasapainokosteuskäyrän kulmakerroin. Kosteusdiffusiviteetti pelkästään nestemäisen veden siirtymiselle D_{ws} (m^2/s) saadaan kaavasta (Hagentoft 2001).

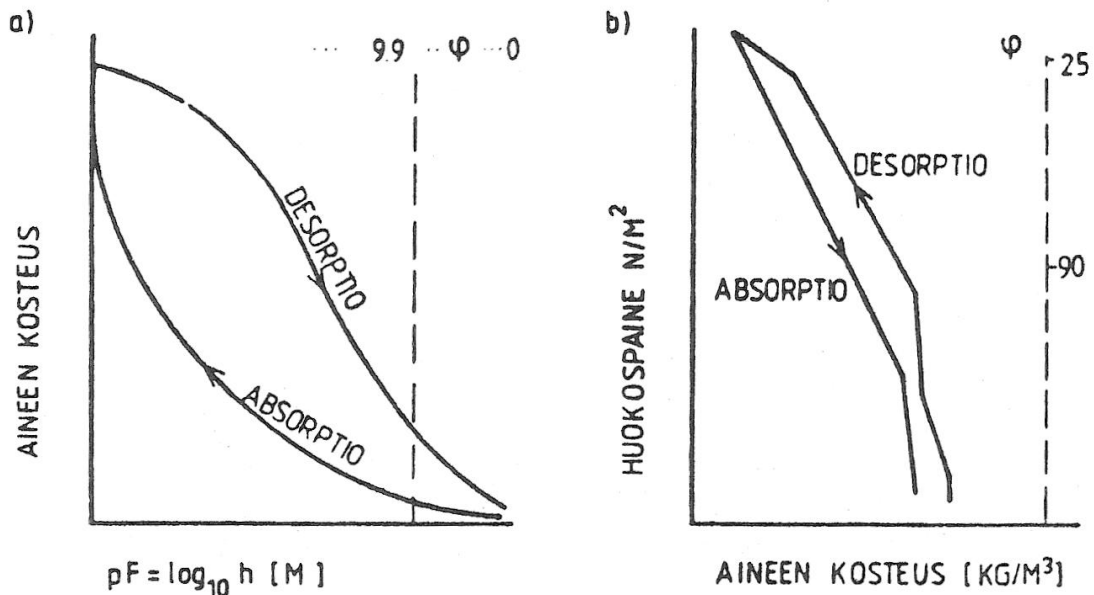
$$D_{ws} = D_w - \frac{\delta_{v,0} v_{sat}}{\xi_\varphi} = \frac{(\delta_v - \delta_{v,0}) v_{sat}}{\zeta_\varphi} \quad (2.48)$$

missä,

$\delta_{v,0}$ on materiaalin vesihöyrynläpäisevyys kuivissa olosuhteissa, $RH < 50 \%$, (m^2/s)

Kapillaarista kosteuden siirtymistä tapahtua huokoisessa materiaalissa jo alhaisissa kosteuspitoisuuksissa, mutta tällöin määräävänä kosteuden siirtymisen mekanismina on diffuusio. Nestemäinen veden siirtyminen tulee materiaalissa hallitsevaksi, kun huokoisen materiaalin kosteus ylittää kriittisen kosteuden, jolloin huokosiin muodostuu yhtenäinen ja jatkuva vesiverkosto. (Salonvaara & Kokko 1999). Huokoisen materiaalin kriittisenä kosteuspitoisuutena on tyypillisesti pidetty 98 % suhteellista kosteutta

(Björkholz 1997). Huokoisen materiaalin ollessa kosketuksissa toiseen vettä siirtävään materiaalin tai vapaaseen veteen, pyrkii se tasapainokosteuteen ympäristönsä kanssa. Tätä tasapainokosteutta kutsutaan kapillaariseksi tasapainokosteudeksi. Kapillaariseen tasapainokosteuskäyrään liittyy voimakas hystereesi-ilmiö (ks. kuva 2.10), joka on seurausta monimutkaisesta kapillaariverkostosta ja kapillaarihuokoskäytävissä olevista säteiden muutoksista (Absetz & Viljanen 1985).



Kuva 2.10. Materiaalin tasapainokosteus kapillaarisella alueella (periaatepiirros),
a) kapillaarisen nousukorkeuden funktiona ja *b)* huokosalipaineen funktiona.
 (Absetz & Viljanen 1985)

Kosteuspotentiaalın tasaantuessa materiaalin sisällä huokosverkostossa voi olla ilmaa, joka hidastaa veden poistumista. Ilman liukeneminen veteen on sitä hitaampaa, mitä suurempia ilmarakkuloita huokosverkosto sisältää. Ilman hidas poistuminen materiaalin kuivuessa näkyy hystereesinä aineen tasapainokosteuskäyrässä. (Bomberg 1974) Tässä tutkimuksessa kapillaarisen virtauksen potentiaalına käytetään suhteellista kosteutta. Huokosalipaineen riippuvuus suhteellisesta kosteudesta on esitetty Thomsonin kaavalla (ks. kaava 2.44). Kosteusvirran tiheys g_{cap} ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$) voidaan näin ollen määrittellä yhtälöstä (Künzel 1995)

$$g_{cap} = -D_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (2.49)$$

missä,

D_{φ} on materiaalin vedenjohtavuuskerroin ($\text{kg}/(\text{ms})$)

Kosteusdiffusiviteetin ja vedenjohtavuuskertoimen välillä on voimassa seuraava yhteys (Künzel 1995)

$$D_{\varphi} = D_w \frac{\partial w}{\partial \varphi} \quad (2.50)$$

Nestemäisen veden kosteusdiffusiviteetti D_{ws} (m^2/s) voidaan määrittää materiaalin kapillaariteettikertoimen A_w avulla seuraavasti (Künzel 1995):

$$D_{ws} \approx 3,8 \left(\frac{A_w}{w_{cap}} \right)^2 1000^{\frac{w}{w_{cap}} - 1} \quad (2.51)$$

missä,

w	on	materiaalin kosteuspitoisuus (kg/m^3)
w_{cap}	on	materiaalin kapillaarinen kyllästyskosteus (kg/m^3)
A_w	on	materiaalin kapillariteettikerroin ($kg/(m^2s^{1/2})$)

Kerrointa A_w kutsutaan usein myös adsorptio- tai imeytymiskertoimeksi (Künzel 1995; RIL 155 1984) ja se on pysyvä vain määrätyllä aikavälillä. Kapillariteettikerroin on materiaalikohtainen ominaisuus ja se voidaan määrittellä standardin DIN 52617 (1987) mukaisesti. Materiaalin kosteustasapaino isotermisessä tilanteessa ($\Delta T = 0$) saadaan termodynamiikan säilymislaista (Hagentoft 2001)

$$\frac{\partial w}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left(- \kappa_w \frac{\partial p_c}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa_w \frac{\partial p_c}{\partial x} \right) \quad (2.52)$$

missä,

κ_w	on	materiaalin kosteudenjohtavuus ($kg/(msPa)$)
------------	----	--

Lämpötilan vaikutusta materiaalin kosteuden johtavuuteen on vaikea määrittää tarkasti, joten se jätetään yleensä huomioimatta myös ei-isotermisissä prosesseissa. (Künzel 1995).

2.5 Ilmavirtaus tuuletusraossa

2.5.1 Ilmaraon vaikutus rakenteen toimivuuteen

Tuuletusrako toimii seinärakenteessa ylimääräisen kosteuden poistajana ja tasaa rakenteessa vallitsevia paine-eroja. Ilmaraon kosteudenpoistokykyyn vaikuttavat tuuletusraossa olevan ilmavirran nopeus, rakoon tulevan ilman kosteuspitoisuus ja ilman lämpeneminen raossa (Lehtinen & Viljanen 1989). Auringon vaikutus tuuletusraossa tapahtuvaan ilmavirtaukseen on merkittävä, koska se lämmittää tuuletusraossa olevaa ilmamassaa ja lisää näin termistä konvektiovirtausta (Vinha et al. 2003). Ilmavirran nopeus riippuu voimakkaasti ilmaraon rakenteesta, sen yhtenäisyydestä, dimensioista ja sisä- ja poistoaukkojen määrästä. Rakenteissa, joissa ilma-aukkoja on harvassa tai tulo- ja poistoilmakanavat ovat pieniä, on ilmavirtaus rajoitettua ja ilmatilan ilmanvaihtuvuus selvästi pienempi kuin täysin avoimilla rakenteilla (Lehtinen et al. 1997).

Tiilen huokosrakenteesta johtuen, sen kapillaarinen vedellä täyttymisaste on noin 15 paino-% (Björkholtz 1987). Ohut kuorimuuraus voikin viistosateella olla lähes täydellisesti vedellä kyllästynyt. Kuorimuriin imeytynyt vesi siirtyy vesihöyryinä tuuletusraon ilmatilaan ja nostaa sen suhteellista kosteutta. Lisäksi pystysaumoista sateella tuuletustilaan valuva vesi on hyvin merkittävää (Lehtinen & Viljanen 1989). Tuuletusrako pystyy poistamaan kosteutta rakenteen pinnalta vain, jos tuuletusraossa virtaavan ilman vesihöyrynpitoisuus on pienempi kuin vesihöyrypitoisuus rakenteen haihduttavalla pinnalla (Iivonen 1987). Tuuletusraon lämpötila vaikuttaa merkittävästi siihen toimiiko tuuletusrako rakennetta kuivattavasti vai tuleeko tuuletusraon kautta lisää kosteutta seinärakenteeseen.

Ilmavirtaus tuuletusraossa kasvaa lämpötilan noustessa. Tuuletusraon lämpötila pysyy talviaikana puuverhotussa rakennuksessa noin 1 °C lämpimämpänä kuin ulkoilma, riippumatta tarkasteltavasta ilmansuunnasta. Tiiliverhoillussa seinässä tuuletusraon lämpötila on pakkaskautena noin astetta korkeampi kuin puuverhotussa seinässä. Tämä johtuu pääasiassa tiiliseinän suuremmasta lämpökapasiteetista, mutta osittain myös ilmaraon pienemmästä ilman virtausnopeudesta, jolloin ilmavirran jäähdytysvaikutus on pienempi. Tiiliseinä luovuttaa päivällä varaamaansa lämpöä hitaasti tuuletusrakoon, jolloin se pysyy pitkään lämpimänä myös yöaikana. Kesällä lämpötilaero ulkoilman ja tuuletusraon välillä on oleellisesti suurempi: eteläseinustalla keskimäärin 10 astetta ja pohjoisella seinälläkin 2-3 astetta lämpimämpi kuin ulkoilma, johtuen auringonsäteilyn lämmittävästä vaikutuksesta. (Vinha 2007) Lämpötilan nousu alentaa ilman suhteellista kosteutta tuuletusraossa pienentäen siten homehtumisriskiä ja vähentäen kosteuden kondensoitumista rakenteeseen.

Tuuletusvälin ilman vaihtuvuuteen vaikuttavat virtauksen synnyttämät potentiaalit ja virtausta vastustavat kitka- ja kertahäviöt. Virtauksen aikaansaamat voimat syntyvät ulkoilman ja tuuletusvälin lämpötilaerosta aiheutuvasta nostevirtauksesta ja tuulen aiheuttamasta painevaihtelusta. Lämpötilaerosta johtuva paine-ero Δp_T (Pa) saadaan kaavasta (Iivonen 1987)

$$\Delta p_T = (\rho_e - \rho_{vc})gh \quad (2.53)$$

missä,

ρ_e	on	ulkoilman tiheys (kg/m^3)
ρ_{vc}	on	tuuletusraossa olevan ilman tiheys (kg/m^3)
g	on	maan vetovoiman kiihtyvyys, 9,81 (m/s^2)
h	on	tuuletusraon korkeus (m)

Ilman tiheys ρ_a (kg/m^3) voidaan määrittää kaasujen yleisestä tilanyhtälöstä, kaavalla 2.26, käyttämällä ilman keskimääräisenä molekyylipainona $M_a = 28,96$ kg/kmol tai likiarvokaavalla (Iivonen 1987)

$$\rho_a = \frac{353}{(273,15 + \theta)} \quad (2.54)$$

missä,

θ	on	lämpötila ($^{\circ}\text{C}$)
----------	----	----------------------------------

Ilman lämpötila tuuletusraossa riippuu pintaan kohdistuvasta auringonsäteilystä ja rakennuksen vaipan läpi tapahtuvista lämpöhäviöistä. Lämmön oletetaan siirtyvän tuuletusrakoon yksiulotteisesti johtumalla. Tuuletusraossa virtaavan ilman lämpötila saadaan ratkaistua energiataseyhtälöstä (Hagentoft 2001)

$$T(x) = T_0 + (T_e - T_0) \cdot e^{\left(\frac{-x}{l_c}\right)} \quad (2.55)$$

missä,

T_0	on	Ilman lämpötila vastaavassa tuulettamattomassa ilmaraossa ($^{\circ}\text{C}$)
		$T_0 = \frac{\alpha_1 T_1 + \alpha_2 T_2}{\alpha_1 + \alpha_2}$
T_e	on	tuuletusrakoon tulevan ilman lämpötila ($^{\circ}\text{C}$)
x	on	etäisyys tuuletusraon sisäänvirtausaukosta (m)
l_c	on	karakteristinen pituus (m)

$$l_c = \frac{\rho_a c_{p,a} R_a}{\alpha_1 + \alpha_2}$$

$\alpha_{1,2}$	on	tuuletusraossa olevien pintojen lämmönsiirtokertoimet (W/(m ² K))
$T_{1,2}$	on	tuuletusraossa olevien pintojen lämpötilat (°C)
R_a	on	ilman tilavuusvirta (m ³ /s)
ρ_a	on	ilman tiheys ilmaraossa (kg/m ³)
$c_{p,a}$	on	ilman ominaislämpökapasiteetti ilmaraossa, 1,0 (kJ/(kgK))

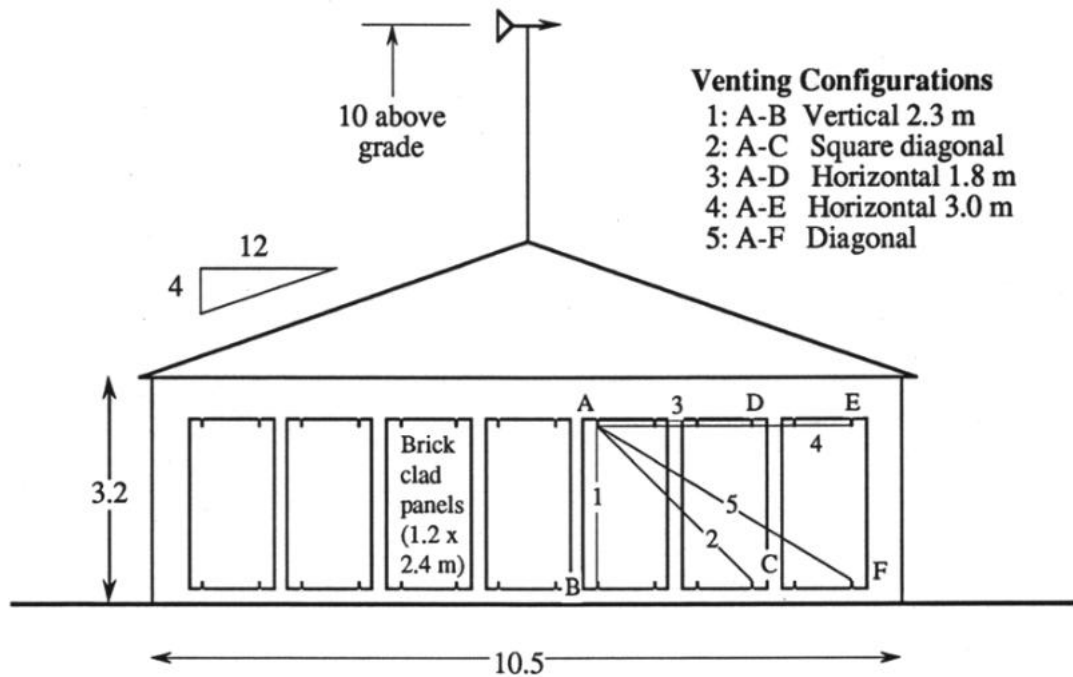
Tuuletusraon lämpötilan laskeminen johtaa iterointiin, koska lämmönsiirtokertoimet riippuvat tuntemattomista pinta- lämpötiloista ja tuuletusraossa virtaavasta ilman virtausnopeudesta. Tuulen aiheuttama paine-ero ilmaraossa Δp_{wind} (Pa) riippuu sisään- ja ulosvirtausaukon muotokertoimien erotuksesta ja tuulen nopeudesta ja se voidaan ratkaista kaavasta (Straaten 2003)

$$\Delta p_{wind} = 0,5(c_{p,1} - c_{p,2})\bar{\rho} \cdot v^2 = 0,5C_{pv} \cdot \bar{\rho} \cdot v^2 \quad (2.56)$$

missä,

C_{pv}	on	sisään- ja ulosvirtausaukon muotokertoimien erotus (-)
$\bar{\rho}$	on	ulkoilman ja ilmaraossa olevan ilman keskimääräinen tiheys (kg/m ³)
v	on	tuulen nopeus kohtisuoraan julkisivupintaa vasten (m/s)

Muotokertoimet riippuvat useista tekijöistä, kuten esimerkiksi rakennuksen muodosta ja tuulen suunnasta ja vaihtelevat huomattavasti rakenteen pinnan eri kohdissa. Rakenteen muotokertoimien tarkka määrittäminen edellyttää tuulitunnelikokeita tai kenttämittauksia (Iivonen 1987). Straube ja Burnett (1995) ovat mitanneet kuorimuurin muotokertoimia kenttätutkimuksin, kuvan 2.11 mukaisella mittausjärjestelyllä.

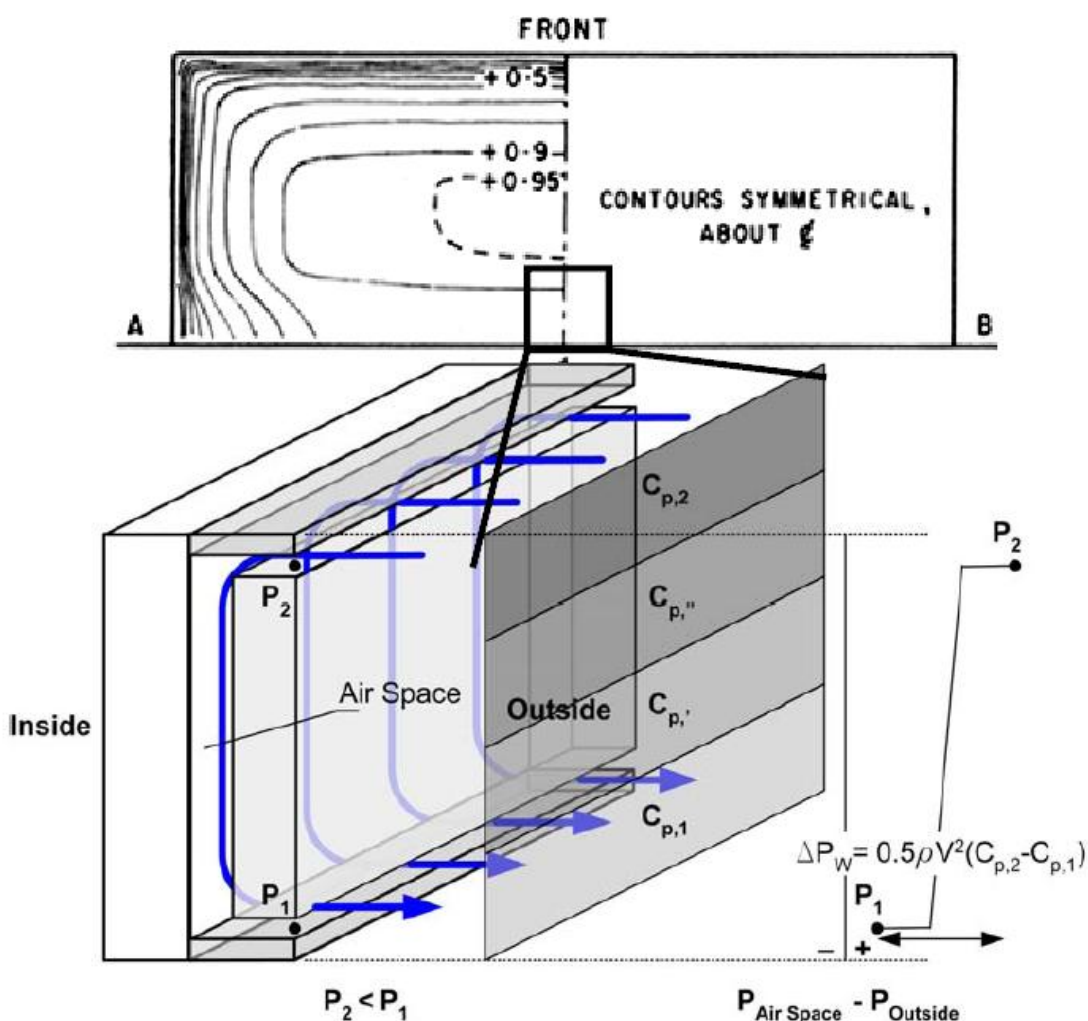


Kuva 2.11. Paine kertoimien mittaussjärjestely. (Straube & Burnett 1995)

Mittaus suoritettiin länsiseinällä, ajanjaksolla marras-joulukuu. Paine-eroa mitattiin mitausanturein sisä- ja poistoilma-aukoista. Pystysuuntaisen ilma-eräpaksuus oli 30 mm ja tulo- ja poistoilma-aukkojen koko 65x10 mm. Suurin paine-ero oli mittauspisteiden A ja B välillä, jossa havaittiin tuulenpainetta tuulen suunnasta riippumatta. Keskimääräiseksi muotokertoimeksi saatiin 0,18, ottaen huomioon kaikki mittausajankohtana vallinneet tuulen suunnat. Vaikka suomalaisessa tiilirakentamisessa muurauksen yläosaan on jätetty yleisesti yhtenäinen ilmako, voidaan edellä mainittua arvoa käyttää, koska tiilimuurauksen painehäviöt johtuvat pääasiassa sisääntuloaukon kitkahäviöistä (Iivonen 1987).

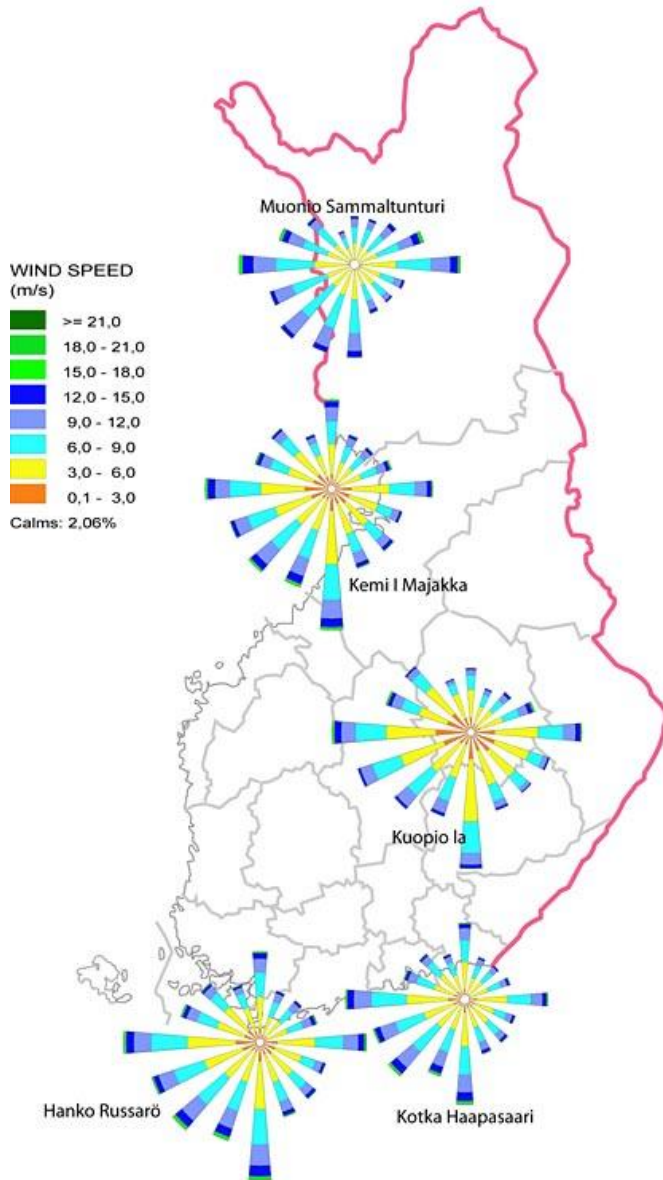
Puu- ja paneelijulkisivuissa poisto- ja tuloilma-aukot ovat yleisesti Suomessa ylä- ja alaosaan avoimia. Straaten (2003) on esittänyt tutkimuksessaan tällaisen seinärakenteen muotokertoimet. Kuvassa 2.12 on näytetty rakennuksen julkisivupinnan eri osiin tuulesta muodostuvat painekertoimet. Ulos- ja sisäänvirtausaukon painekertoimet vastaavat arvoja 0,8 ja 0,7, tässä järjestyksessä, jolloin paneelijulkisivuisten seinärakenteen muotokertoimien erotus on 0,1.

Kirjallisuusselvityksen mukaisesti tähän tutkimukseen on valittu sisä- ja poistoilma-aukkojen väliseksi muotokertoimeksi tiilijulkisivuissa arvo 0,2 ja paneeli- ja puuverhoissa julkisivuissa on käytetty arvoa 0,1.



Kuva 2.12. Tuulen aiheuttamat C_p -arvot paneelijulkisivussa. (Straaten 2003)

Tuulen vaikutus ilmaan ilmanvaihtuvuuteen on merkittävä. Kuvassa 2.13 on esitetty tuulen nopeuksia mitattuna 10 metrin korkeudelta maanpinnasta. Rakennuksen ympäristössä vallitsevat tuulen nopeudet voivat kuitenkin poiketa selvästi näistä arvoista. Metsän suojaamalla pientaloalueella tuulen nopeus saattaa olla vain noin 35 % ja väljällä pientaloalueellakin vain 50 % aukealla maalla, säähavaintoasemalla mitatusta arvosta. Metsän, kumpuilevan maaston ja rakennusten muodostamien solien kohdalla tuulen nopeus saattaa paikoin kasvaa 2-3 kertaiseksi. (Siikanen 1996) Maasto ja rakennukset voivat myös kääntää tuulen suuntaa mittausasemalla vallitsevaan tuulen suuntaan nähdessä. Yleisesti on kuitenkin havaittavissa, että etelän ja lounaan puoleiset tuulet ovat Suomessa hallitsevia (ks. kuva 2.13).



Kuva 2.13. Tuulen suunnan ja nopeuden jakauma eräillä sääasemilla tuuliruusulla mitattuna. Tarkastelujakso 1999-2008. (Suomen Tuuliatlas 2011)

Ilmaraon ilmvirtaus sisältyy laskennassa lähde- tai nielutermiin, joka ottaa huomioon ilmvirtauksen lisäksi vesihöyryn diffuusioliikkeessä samanaikaisesti esiintyvän faasimuutoksen vaikutuksen. Lämmönlähde- tai lämpönielutermi, S_h ($\text{J}/\text{m}^3\text{s}$) ratkaistaan yhtälöstä (Karagiozis & Kuenzel 2009; Wufi Pro 5.0 Online help):

$$S_h = h_v \nabla g_v + \rho_{out} dc_{p,air} (T_{out} - T_{vent}) \frac{n}{3600} \quad (2.57)$$

missä,

h_v	on	veden höyrystymislämpö, $h_v = 2500 \times 10^3$ (J/kg)
g_v	on	diffuusiolla siirtyvän kosteusvirran tiheys ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)
ρ_{out}	on	ulkoilman tiheys (kg/m^3)
d	on	pystysuuntaisen ilma-vaon paksuus (m)

$c_{p,air}$	on	kuivan ilman ominaislämpökapasiteetti (J/(Kkg))
T_{out}	on	ulkoilman lämpötila (K)
T_{vent}	on	lämpötila ilmaraossa (K)
n	on	ilmanvaihtuvuus ilmaraossa (1/h)

Kosteuslähde- tai kosteusnielutermissä, S_w (J/m³s) otetaan huomioon ilmavirtauksen sitoma tai virtauksen kuljettama kosteusmäärä kaavalla:

$$S_w = d \frac{n}{3600} (\rho_{exit} - \rho_{ent}) \quad (2.58)$$

missä,

ρ_{exit}	on	vesihöyryn tiheys ilmaraosta ulos tullessa, (kg/m ³)
ρ_{ent}	on	vesihöyryn tiheys tuloaukossa, ulkoilmassa (kg/m ³)

Seinärakenteen läpi siirtyvä kosteus- ja lämpövirta voidaan ratkaista energian säilymislaista. Kosteustasapainoyhtälössä otetaan huomioon sekä nestemäinen että höyrymäinen veden liike. Tutkimuksessa käytetään seuraavia tasapainoyhtälöitä (Karagiozis & Kuenzel 2009):

$$\frac{\partial H}{\partial v} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla v) + h_v \nabla(\delta_p (\varphi p_{sat})) + S_h \quad (2.59)$$

$$\frac{\partial w}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla(D_\varphi \nabla \varphi) + \delta_p \nabla(\varphi p_{sat}) + S_w \quad (2.60)$$

missä,

δ_p	on	vesihöyrynläpäisevyys (kg/(msPa))
D_φ	on	materiaalin vedenjohtavuuskerroin (kg/(ms))
φ	on	suhteellinen kosteus (-)
p_{sat}	on	vesihöyryn kyllästyspaine vallitsevassa lämpötilassa (Pa)
λ	on	lämmönjohtavuus (W/mK)

Vesihöyryn kyllästyspaine, $p_{v,sat}$ määritetään tässä tutkimuksessa käytettävässä Wufi-ohjelmassa kaavalla 2.30.

2.5.2 Painehäviö muuratussa julkisivussa

Kuorimuuraus on eriytetty, itsensä kantava julkisivurakenne, joka muodostaa kantavan seinärakenteen ulkopuolelle rakennuksen ulkonäön antavan ja säältä suojaavan julkisivuvaipan. Kuorimuurin takana on tyypillisesti avoin tuuletusrako, jonka paksuus vaihtelee välillä 0-50 mm ja saattaa paikoin olla laastin tai eristeen tukkima. Tiilimuurin alaosassa tuuletus on yleensä varmistettu jättämällä joka kolmas pystysauma auki alimassa tiilikerroksessa. Yläosastaan muuraus on joko täysin avoin tai suojattu pellityksellä siten, että yläosan virtausaukko on jatkuva ja yhtenäinen. Kuorimuuratuissa puurankaisissa seinissä on yleisemmin käytetty moduliitiiltä, kooltaan 285x85x85 (Wienerberger [viitattu 10.8.2011]). Tällöin alapään tuuletusaukkojen jako on noin 900 mm. Suomessa ilma-aukoissa ei ole yleensä käytetty suojana ritiloita tai verkkoja, jotka pienentävät aukon tehollista pinta-alaa.

Tuuletusraossa tapahtuvat painehäviöt on seurausta tuuletusraossa tapahtuvista kitkahäviöistä ja raon poikkileikkauksen muutoksissa tapahtuvista kertahäviöistä. Koko tuuletusraossa tapahtuva painehäviö Δp_{tot} (Pa) saadaan näiden häviöiden summana ja sen suuruus tiilimuuratuissa julkisivuissa on (Straaten 2003):

$$\Delta p_{tot} = \left(\frac{R_a}{0,6 \cdot h_{v1} \cdot b_{v1}} \right)^2 + \frac{32k_f \cdot R_a \cdot \eta \cdot h}{\gamma_c \cdot 4d^3 w_c} + C_{exit} \cdot 0,5 \cdot \rho_{vc} \left(\frac{R_a}{d \cdot b_c} \right)^2 \quad (2.61)$$

missä,

R_a	on	ilman tilavuusvirta tuuletusraossa (m^3/s)
b_{v1}	on	sisääntuloaukon leveys (m)
h_{v1}	on	sisääntuloaukon korkeus (m)
k_f	on	pystysuuntaisen ilmaraon korkeudesta ja leveydestä riippuva korjaustekijä (-), $k_f = 1,5$ seinässä
η	on	ilman dynaaminen viskositeetti (Ns/m^2)
h	on	pystysuuntaisen ilmaraon korkeus (m)
d	on	pystysuuntaisen ilmaraon paksuus (m)
b_c	on	pystysuuntaisen ilmaraon leveys (m)
γ_c	on	ilmaraon tukkeumatekijä (-), $\gamma_c = 0,8$
C_{exit}	on	ulosvirtauskerroin (-)
ρ_{vc}	on	tuuletusraossa olevan ilman tiheys (kg/m^3)

Kaavassa ensimmäinen termi edustaa kertahäviötä ilman sisäänvirtausaukossa, toinen kitkahäviötä pystysuuntaisessa ilmaraossa ja kolmas kertahäviötä ulosvirtausaukossa. Tiilimuri tehdään tyypillisesti työntö- ja nokkalaastitekniikalla, jolloin saumasta työn-tyy laastipurseita pitkälle ulos tuuletusrakoon (Lehtinen & Viljanen 1989). Nämä muu-

raustyön yhteydessä syntyneet purseet ja laastisillat lisäävät ilmavirtauksen kitkaa kasvattaen samalla virtausta vastustavaa painehäviötä. Tätä tukkeumavaikutusta kuvataan yhtälössä 2.61 tukkeumatekijällä, γ_c , jonka arvoksi suositellaan huolellisesti tehdyille muurauksille arvoa 0,8. Ulosvirtauskerroin, C_{exit} , on riippuvainen ilmaraosta poistuvasta ilmavirtauksesta siten, että se on 1,0 turbulenttisella ja 1,55 laminaarisella ilmavirtauksella. (Straaten 2003) Tuuletusrako on yläosastaan yleensä täysin avoin, jolloin kertahäviö ulosvirtausaukossa on minimaalisen pieni ja se voidaan jättää ottamatta huomioon. Tällöin kaava 2.61 sievenee muotoon

$$\Delta p_{tot} = \left(\frac{R_a}{0,6 \cdot h_{v1} \cdot b_{v1}} \right)^2 + \frac{32k_f \cdot R_a \cdot \eta \cdot h}{\gamma_c \cdot 4d^3 b_c} \quad (2.62)$$

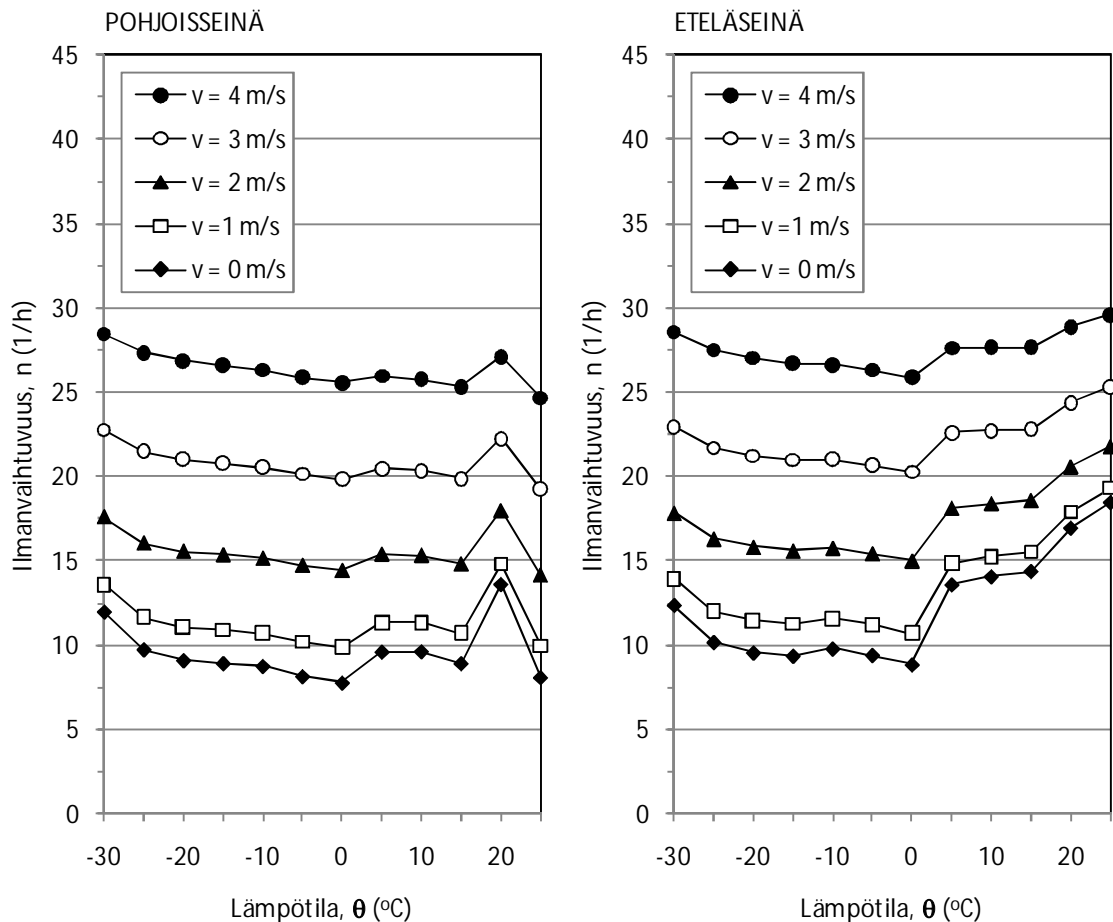
Straube et al. (2004) ovat todenneet tutkimuksissaan, että kuorimuuratun rakenteen kokonaispainehäviö muodostuu pääasiassa sisääntuloaukon kitkahäviöstä. Tiilimuuratun rakenteen ilmaraossa tapahtuvia kokonaisuuhäviöitä voitaisiinkin riittävällä tarkkuudella tarkastella vain sisäänvirtausaukosta johtuvina. Asettamalla lämpötilaerosta ja tuulenpaineesta syntyvät paine-erot yhtäsuuriksi kuin ilmaraossa syntyvät kitka- ja paikallishäviöt, voidaan ilman tilavuusvirta R_a (m³/s) ratkaista toisen asteen yhtälöstä:

$$\frac{1}{(0,6 \cdot h_{v1} \cdot b_{v1})^2} R_a^2 + \frac{32k_f \eta \cdot h}{\gamma_c \cdot 4d^3 b_c} R_a - (0,5c_{pv} \bar{\rho} \cdot v^2 + (\rho_e - \rho_{vc})gh) = 0 \quad (2.63)$$

Ilmanvaihtuvuus n (1/h) ilmaraossa saadaan kaavasta:

$$n = \frac{3600}{b_c \cdot d \cdot h} R_a \quad (2.64)$$

Tampereen teknillisellä yliopistolla on mitattu ulkoilman ja tuuletusraon lämpötiloja tiili- ja puujulkisivuisista koerakennuksista ajanjaksolla 8.2.2002-28.2.2003 (Vinha 2007). Näitä mittaustietoja käytetään tässä tutkimuksessa hyväksi määrittettäessä ilma- raon ilmanvaihtuvuutta. Kuvassa 2.14 on esitetty ilmanvaihtuvuus ilmaraossa (1/h) lämpötilan ja kohtisuoraan rakennusta vasten puhaltavan tuulen nopeuden funktiona tiilimuuratussa julkisivussa. Ilmaraon paksuudeksi on oletettu 30 mm. Laskelmien mukaisesti ilmanvaihtuvuus kesäkautena on eteläseinällä 14-30 ja pohjoisseinustalla 10-25 vaihtoa tunnissa tuulen voimakkuudesta riippuen (ks. kuva 2.14). Pakkaskautena ilmanvaihtuvuus vaihtelee välillä 8-28 1/h.



Kuva 2.14. Ilmanvaihtuvuus kuorimuuratussa seinässä pohjois- ja eteläjulkisivulla eri tuulen nopeuksilla v .

Tampereen teknillisellä yliopistolla tutkittiin ilmapvirtausta tiiliverhotussa, puurankaisessa seinässä, pohjoisjulkisivulla noin vuoden ajan (Vinha 2007). Tutkimusten mukaan ilmapvirtaus oli alle 10 °C:n lämpötilassa hyvin hidasta ja rakenne näytti toimivan alhaisissa lämpötiloissa pääasiassa suljetun ilmapälin tavoin. Straaten (2003) on havainnut tiilijulkisivulle tekemissään mittauksissa, että ilman virtausnopeus tuloaukkojen linjalla on likimain nolla ja nolasta poikkeava vasta tulo- ja poistoaukkojen välisellä osuudella. Lundin yliopistossa, Ruotsissa on tehty laajoja kenttämittauksia, joissa ilmanvaihtuvuudeksi normaalien sääolosuhteiden aikana on saatu tiilijulkisivuissa 0,3-8 vaihtoa tunnissa (Straube et al. 2004). Mitatuissa rakenteissa ilma-avaruus vaihteli välillä 20-50 mm.

Kuten edellä todettiin muuratuissa rakenteissa tuloilma-aukot voivat paikoin olla laastin tukkimat. Muurauslaastista on syntynyt kasautumia, jotka muodostavat laajoja kontaktipintoja sisemmän seinäosan kanssa. Pystysuuntaisen ilma-avaruuden nimellisleveys vaihtelee myös huomattavasti tutkituissa rakennuskohteissa (Lehtinen & Viljanen 1989). Ikkunan alapuolisissa seinän osissa rakenteen tuulettavuus on lisäksi heikompaa kuin muualla

seinärakenteessa. Näin ollen ilman virtausnopeus voi vaihdella paljonkin rakennuskoh- teesta riippuen. Tässä tutkimuksessa muuratulle julkisivulle on valittu seuraavat ilman- vaihtuvuuden arvot: pohjoisjulkisivulla 5 ja eteläsivulla 10 vaihtoa tunnissa. Nämä arvot korreloivat hyvin myös edellä kirjallisuudesta saatujen tulosten kanssa. Auringonsätei- lyn teho on eteläseinustalla pohjoisjulkisivua suurempi. Säteily kasvattaa ilma- raon läm- pötilaa ja lisää raon ilmavirtausta. Näin ollen on perusteltua käyttää eteläsivulla suu- rempaa ilmanvaihtuvuuden arvoa.

2.5.3 Painehäviö puu- ja paneelijulkisivuissa

Puujulkisivun takana on yhtenäinen tuuletusrako, jonka paksuus vaihtelee välillä 19-25 mm. Tuuletusraon ala- ja yläpää on yleensä kauttaaltaan avoin ympäröivään ulkoilmaan, jolloin tuuletusraossa virtausta vastustavat kokonaispainehäviöt Δp_{tot} (Pa) voidaan las- kea kaavasta (Straaten 2003)

$$\Delta p_{tot} = C_{ent} \cdot 0,5 \cdot \frac{\rho_e}{\gamma_{v1}} r_a^2 + \frac{32k_f \cdot r_a \cdot \eta \cdot h}{4d^2} + C_{exit} \cdot 0,5 \cdot \frac{\rho_{ve}}{\gamma_{v2}} r_a^2 \quad (2.65)$$

missä,

r_a	on	ilmavirran nopeus tuuletusraossa (m/s)
$\gamma_{v1..2}$	on	tulo- ja poistoaukon tukkeumatekijä (-)
C_{ent}	on	sisäänvirtauskerroin (-)
C_{exit}	on	ulosvirtauskerroin (-)

Jos tuloilma-aukossa käytetään hyönteisverkkoa suojana, on tuuletusaukon tukkeumate- kijän arvo 0,5. Avoimessa ilma-aukossa, jossa ei ole esteitä, on ilma- raon tukkeumate- roin 1,0. (Finch & Straube 2007) Kitkahäviökertoimet sisään- ja ulostuloaukoissa saa- daan kaavoista (Ge & Ye 2007):

$$C_{ent} = 6,5 Re^{-0,4} + 0,5 \cdot (0,066 \ln(Re) + 0,16) \quad (2.66)$$

$$C_{exit} = 6,5 Re^{-0,4} + 0,066 \ln(Re) + 0,16 \quad (2.67)$$

missä,

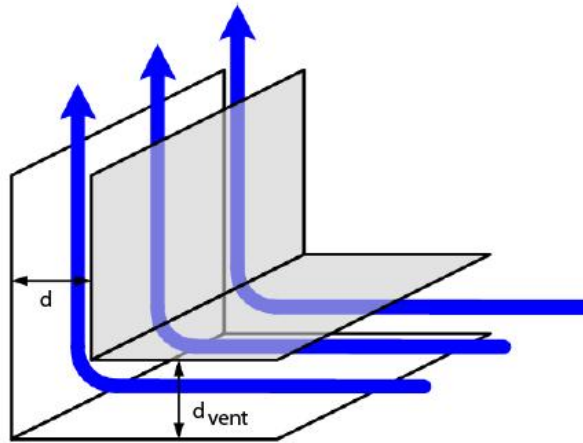
Re	on	Reynoldsin luku (-)
------	----	---------------------

Rakennuksissa, joissa julkisivupinta on samassa tasossa tai syvemmillä kuin rakennuksen sokkelin ulkopinta, muodostuu ilmakehän sisääntuloaikaan taitekohta, joka lisää ilmavirtauksen kitkavaikutusta (ks. kuva 2.15). Tämä taitekohdassa syntyvä kitkahäviö on summattava sisääntuloaukon kertahäviöön (ks. kaavat 2.66 ja 2.67). Kulmakohdassa syntyvä paikallinen kitkahäviö C määritetään kaavasta (Straaten 2003):

$$C = 0,885 \left(\frac{d_{vent}}{d} \right)^{-0,86} \quad (2.68)$$

missä,

d_{vent} on sisääntuloaukon korkeus (m)
 d on pystysuuntaisen ilmaraon paksuus (m)



Kuva 2.15. Sokkelin muodostama kulma sisäänvirtausaukossa. (Straaten 2003)

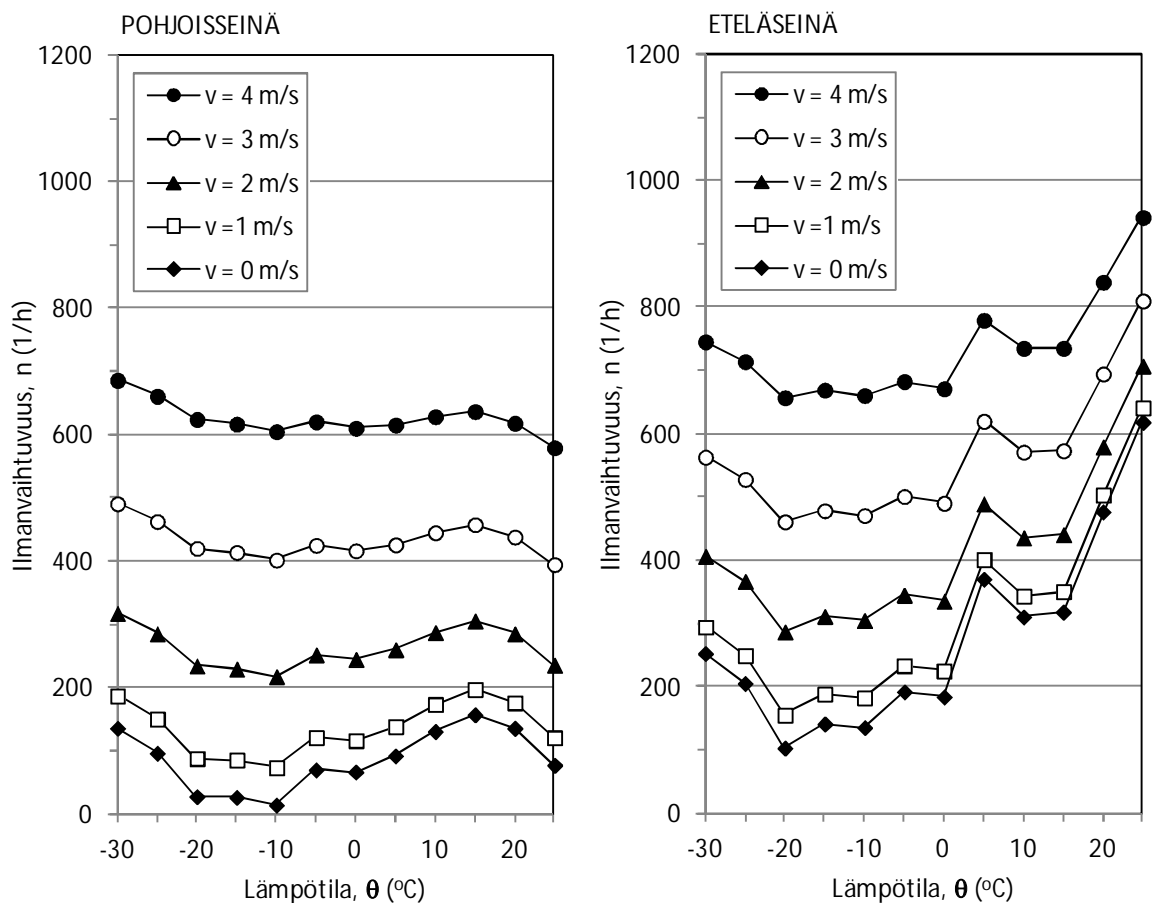
Kaavoissa 2.66 ja 2.67 esiintyvä Reynoldsin luku on dimensioton suhdeluku, joka kuvaa virtauksen luonnetta ja siten virtauksen muodonmuutosta vastustavien voimien suuruutta. Reynoldsin luvun ollessa pienempi kuin 2000, on raossa virtaava ilmavirtaus laminaarista ja vastaavasti tätä suuremmilla arvoilla turbulentsista (Straaten 2003). Laminaarisessa virtauksessa partikkelien liikeradat ovat rinnakkaisia, eivätkä ne sekoitu keskenään. Turbulenssivirtauksessa partikkelien välillä tapahtuu makroskooppista sekoittumista ja virtaukseen liittyy selvä pyörteisyys. (Iivonen & Viljanen 1984)

Leveässä ilmaraossa virtaus on tyypillisesti laminaarista (Straaten 2003). Aikaisemmassa tutkimuksessa (Ge & Ye 2007) on ilmaraoliselle ($d = 19$ mm), ala- ja yläpäästään avoimelle seinärakenteelle päädytty käyttämään Reynoldsin lukua 100. Tässä tutkimuksessa käytetään samaa Re -arvoa. Virtaushäviöt sisääntulo ja ulosvirtauskohdissa laskeaan käyttämällä kaavoja 2.66 ja 2.67, jolloin seinärakenteen kertahäviökertoimet $C_{ent} = 1,26$ ja $C_{exit} = 1,49$ ja häviökertoimien summa 2,75. Strauben ja Burnettin (1995) mu-

kaan sisään- ja ulostuloaukkojen kertahäviökertoimien summana voidaan käyttää arvoa 2,26, kun sokkeli ei muodosta virtausta hidastavaa taitekohtaa. Vertaamalla tätä tulosta tässä tutkimuksessa käytettävään kertahäviökertoimien summaan voidaan havaita, että valittu Reynoldsin luku on yhtenevä aikaisempien tutkimuksien kanssa ja näin ollen sopiva valinta ilmanvaihtuvuuden laskentatarkasteluja varten. Kun ilmaraon ylä- ja alapäässä ei käytetä verkkoja tai muita ilmavirtausta hidastavia esteitä voidaan painehäviöt määrittää kaavasta:

$$\Delta p_{tot} = (0,63\rho_e + 0,745\rho_{vc}) \cdot r_a^2 + \frac{32k_f\eta \cdot h}{4d^2} r_a \quad (2.69)$$

Ilman virtausnopeus r_a (m/s) voidaan ratkaista vastaavalla tavalla kuin muuratun julkisivun tapauksessa (vrt. kaava 2.63). Lasketut ilmanvaihtuvuuden arvot on esitetty kuvassa 2.16. Ilmaraon paksuudeksi on laskennassa oletettu 22 mm ja seinärakenteen korkeudeksi 3 m.



Kuva 2.16. Ilmanvaihtuvuus puujulkisivuisessa seinässä eri tuulen nopeuksilla v .

Terminen eli pelkkä lämpötilaeroista johtuva ilmavirtaus on laskelmien mukaisesti pohjoisseinällä 80-160 ja eteläseinällä 90-560 vaihtoa tunnissa. Vastaavat ilman virtausno-

peudet ovat eteläseinällä 0,1-0,5 m/s ja pohjoisseinällä 0,02-0,1 m/s. TTY:llä tehdyssä kenttämittauksessa (Vinha 2007) puujulkisivun takana olevan ilmaraon virtausnopeudeksi saatiin pohjoisseinällä 0,02-0,20 m/s. Eteläseinällä olevia virtausnopeuksia ei silloin tutkittu. Saksassa on mitattu ala- ja yläpäästään avonaisten tuuletusrakojen ilman virtausnopeuksia paneelijulkisivuisissa asuinrakennuksissa kenttätutkimuksin (Kargiozis & Kuenzel 2009). Tutkimuksessa on ilmavirran nopeudeksi tuuletusraossa saatu 0,2-0,6 m/s tuulen nopeuden ollessa välillä 0-8 m/s. Vastaavilla tuulen nopeuksilla lasketut ilman virtausnopeudet vaihtelevat välillä 0,02-1,4 m/s. Havaitaan, että laskentatulokset ovat hyvin lähellä edellä mainittuja kenttämittaustuloksia. Koska tuulen nopeus riippuu suuresti rakennuksen sijainnista ja puuston suojaavasta vaikutuksesta, on tässä tutkimuksessa valittu pohjoisseinälle ilmanvaihtuvuudeksi 100 vaihtoa tunnissa ja eteläseinälle 250 vaihtoa tunnissa.

Taivaan efektiivisen lämpötilan huomioon ottaminen laskennassa

Kevytrakenteisissa puu- ja paneelijulkisivuissa ulkopinnasta lähtevän lämpösäteilyn jäädyttävä vaikutus on merkittävä kirkkaina öinä. Lämpöä varaavilla verhouksilla, esimerkiksi tiilimuurauksella, sen vaikutus ilmaraon lämpötilaan on huomattavasti pienempi, rakenteen suuremmasta lämpökapasiteetista johtuen. Tässä tutkimuksessa käytettävä modifioitu ilmavirtaus puu- ja paneelijulkisivuissa on määritetty siten, että sisäpuolisen seinäosan tuuletusrakoon rajoittuvan ulkopinnan pintavastus vastaa RakMk C4 (2003) mukaista sisäpinnan pintavastuksen suunnittelu-arvoa, 0,13 m²K/W. Tuulensuojan ulkopinnan pintavastuksen arvo $R_{sh,se}$ (m²K/W) on määritetty kaavalla (Vinha 2007)

$$R_{sh,se} = R_{wall} \frac{T_{sh,se} - T_e}{T_{si} - T_{sh,se}} \quad (2.70)$$

missä,

R_{wall}	on	materiaalikerrosten lämmönjohtavuus (m ² K/W)
$T_{sh,se}$	on	tuulensuojan ulkopinnan lämpötila (°C)
T_{si}	on	seinän sisäpinnan lämpötila (°C)

Modifioitu ilmanvaihtuvuus on määritetty kokeellisesti, lisäämällä laskentamallissa ilmaraon ilman

vaihtuvuutta tasolle, jossa ilman virtausnopeudella on ollut riittävä jäädyttävä vaikutus. Tällä kriteerillä on päädytty laskennassa käyttämään puu- ja paneeliverhotuissa ranskaseinissä pohjoissivulla ilmanvaihtuvuutta 500 vaihtoa tunnissa, joka ottaa huomioon ulkopinnasta lähtevän tuuletusrakoa viilentävän vaikutuksen kirkkaina öinä.

3 HOME SEINÄRAKENTEES- S- S-

Homeet tarvitsevat kasvaakseen ja lisääntyäkseen otollisen lämpötilan ja kosteuden sekä riittävästi happea ja ravintoa. Mikrobin lisääntymistä voi rajoittaa taistelu elintilasta muiden mikrobin ja eliöiden kanssa (Puhakka et al. 1996). Mikrobikasvuston vaatimaa ravintoa on rakenteiden pinnoilla ja ympäröivässä ilmassa yleensä riittävästi tarjolla. Tämän takia homeen kasvu onkin mahdollista minkä tahansa materiaalin pinnalla, jos vain kosteutta on riittävästi tarjolla. Homeet vaativat kasvaakseen vähintään 80 % RH:ta vastaavan ilman suhteellisen kosteuden. Homekasvusto on selvästi havaittavaa kuitenkin vasta, kun ilman suhteellinen kosteus pysyy pitkään yli 90 % RH. (Kokko et al. 1999) Kriittisintä homeen kasvu on olosuhteissa, jossa ilmassa vallitsee yli 97 % suhteellinen kosteus samanaikaisesti vallitsevan lämpimän ($T \geq 20 \text{ }^\circ\text{C}$) ilman kanssa. Tässä olosuhteissa homeen kasvua havaitaan kaikissa materiaaleissa. Homeen kasvu on erityisen nopeaa puuta ja paperia sisältävissä rakennusmateriaaleissa (Vinha et al. 2012). Taulukossa 3.1 on esitetty homeen kasvun riski eri kosteuksissa, kun lämpötila on homeen kasvuille otollinen.

Taulukko 3.1 Homeen kasvun riski, kun lämpötila on homeen kasvuille otollinen.

u_k on materiaalin kosteuspitoisuus (paino-%) ja RH on ilman suhteellinen kosteus (%). (Nevander & Elmarsson 1994)

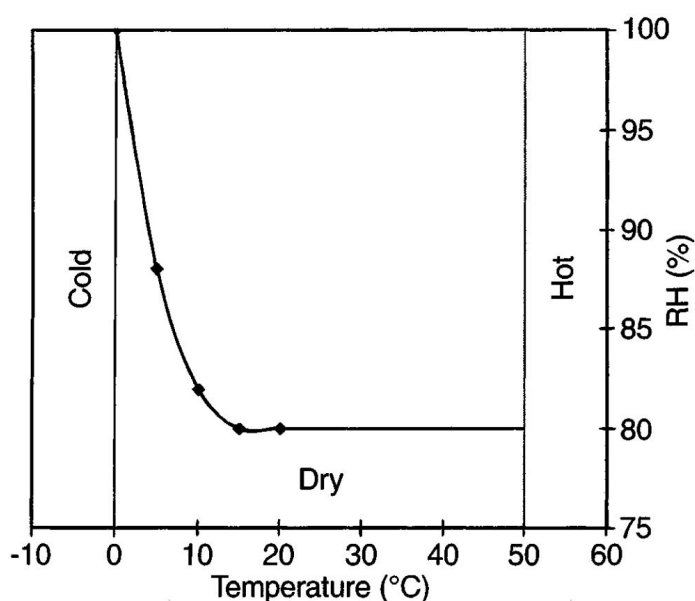
Kriteeri	Homeen kasvun riski		
	Ei riskiä	Pieni	Suuri
u_k [paino-%]	< 15	15...20	> 20
RH [%]	< 70	70...85	> 85

Bakteereita ja sieni-itiöitä on luonnostaan monissa rakennusmateriaaleissa ja ulkoilmassa. Ulkoilman mikrobilähteitä ovat maaperä, kasvit, vesi, kaukokulkeumat ja erilaiset pistemäiset lähteet kuten viljapellot ja teollisuuslaitokset (Leivo 1998). Sisäilman mikrobit ovat pääasiassa peräisin korvausilman kautta ulkoilmasta, jonka takia kostuneen rakenteen lajisto onkin sisäilmassa hyvin samankaltainen kuin ulkoilmassa (Viljanen et al. 1997). Mikrobit aktivoituvat ja levittäytyvät, kun materiaalin kosteuspitoisuus ylittää rakenteen sietokyvyn. Niiden kasvu voi käynnistyä suotuisissa olosuhteissa jo muutamassa päivässä. Kosteus ja lämpötila sekä niiden vaikutusaika ovat kriittisiä mahdollisen homekasvun kehittymiselle. Kostuneen rakenteen väliaikainen kuivuminen ei yleensä tuhoa mikrobikasvustoa (Rantamäki et al. 2000). Rakennuskosteus tai satunnainen kertaluonteinen kastuminen voi aiheuttaa tilanteen, jonka aikana home lähtee kasva-

maan. Kosteuden poistuttua kasvu taantuu ja home jää rakenteeseen. Hoitamattomat kosteusvauriot voivat näin johtaa materiaalien homeongelmiin ja mahdollisiin lahovaurioihin.

Kasvupaikan ollessa kuiva, home tuottaa runsaasti itiöitä ilmaan löytääkseen uuden kasvupaikan (Husman et al. 2002). Sieni- ja sädesieni-itiöt voivat säilyttää elinkykynsä useiden kuukausien ja jopa vuosien ajan, vaikka kasvualusta kuivuisikin täysin kosteusvaurion jälkeen (Rautiala et al. 1997). Ympäröivän ilman korkea suhteellinen kosteus voi saada aikaan kosteuden tiivistymistä pinnoille ja näin käynnistää mikrobikasvun uudelleen. Mikrobien, erityisesti sienien kasvu käynnistyy muutamassa päivässä, jos materiaali joutuu suoraan kosketukseen veden kanssa. (Pasanen et al. 1998) Kestävimmissä materiaaleissa mikrobit joutuvat taistelemaan elintilasta, jolloin ne kehittävät antagonismin vaikutuksesta kaasumaisia kemikaaleja (MVOC-yhdisteitä), jotka saattavat olla haitallisia myös ihmisille (Puhakka et al. 1996; Seppänen et al. 1997). Näitä aktinomykkeetteihin kuuluvia bakteereja on havaittu ainakin kipsilevyissä (Pasanen et al. 1998).

Mikrobien kasvu ei ole stabiilia, vaan luonteenomaista niille on kasvunopeuden vaihtelu ja mikrobilajien toisiaan seuraava esiintyminen. Tätä ilmiötä kutsutaan sukkessioksi. (Seppänen et al. 1997) Nopeasti toistuvat vaihtelut heikentävät homeiden kasvua vähemmän kuin harvaan toistuvat pitkäaikaisemmat kuiva-ajat (Kokko et al. 1999). Mikrobit säilyvät elinkykyisinä laajalla, 0...+50 °C lämpötila-alueella (Hukka & Viitanen 1999). Kuvassa 3.1 on esitetty suotuisat lämpötila- ja kosteusolosuhteet männyn pintapuussa. Kuvasta voidaan havaita, että mitä alhaisempi on ympäristön lämpötila, sitä suurempi suhteellinen kosteus vaaditaan, jotta homeelle olisi kasvamisen kannalta otolliset olosuhteet.



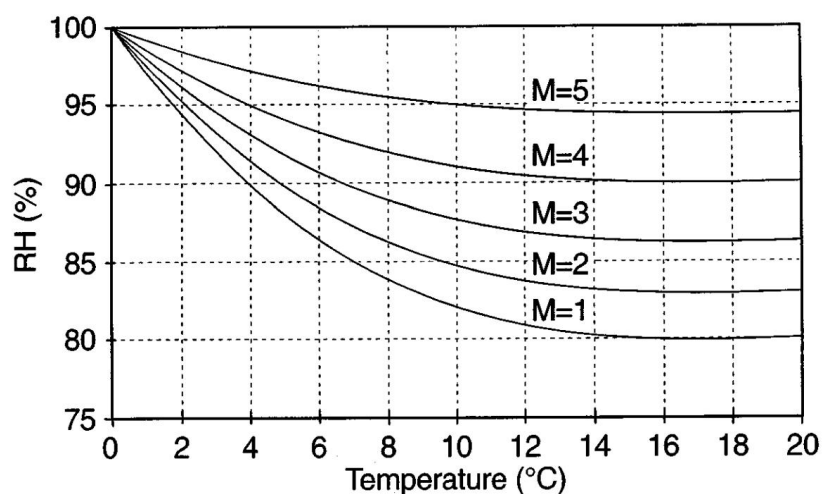
Kuva 3.1. Homeen kasvun kannalta suotuisat kosteus- ja lämpötilaolosuhteet männyn pintapuussa. (Hukka & Viitanen 1999)

Homeen kasvua tarkastellaan tässä tutkimuksessa VTT:n alun perin männyn ja kuusen pintapuulle kehitetyllä homeen kasvun laskentamallilla (Hukka & Viitanen 1999), jota on laajennettu yhteistyössä TTY:n kanssa kuvaamaan myös muiden rakennusmateriaalien homehtumista (Vinha et al. 2012). Homeinmallin matemaattiset yhtälöt perustuvat laajoihin vakioituissa ja vaihtelevissa kosteus- ja lämpötilaoloissa tehtyihin kenttä- ja laboratorio tutkimuksiin. Laskentamallissa otetaan huomioon pohjamateriaalin lämpö- ja kosteuskapasiteetti. Laskentamalli perustuu homeindeksiluokitukseen ($M = 0-6$), jonka mukaan homeen kasvu alkaa, kun saavutetaan homehtumisaste 1 (Viitanen 2000). Homeindeksi on määritetty pinnan visuaalisen ilmeen perusteella taulukon 3.2 mukaisesti.

Taulukko 3.2. Homeindeksin luokitusperusteet. (Vinha et al. 2012)

Homeindeksi	Luokitusperusteet
0	Ei kasvua, pinta puhdas
1	Mikroskoopilla havaittava kasvu, paikoin alkavaa kasvua, muutama rihma
2	Mikroskoopilla havaittava kasvu, useita rihmastopesäkkeitä muodostunut
3	Silmin havaittava kasvu, rihmaston peitto alle 10 % alasta (itiöitä alkaa muodostua) TAI mikroskoopilla havaittava kasvu, peitto alle 50 %
4	Silmin havaittava kasvu, rihmaston peitto noin 10-50 % alasta TAI mikroskoopilla havaittava kasvu, peitto yli 50 %
5	Silmin havaittava runsas kasvu, rihmaston peitto yli 50 % alasta
6	Erittäin runsas kasvu, rihmaston peitto lähes 100 %

Homeen kasvulle suosiolliset kosteusolot riippuvat vallitsevasta lämpötilasta. Alhaisempi lämpötila vaatii suuremman suhteellisen kosteuden, jotta homeen kasvu voi alkaa. Kuvassa 3.2 on esitetty olosuhteet, joilla saavutetaan eri luokitustasojen mukaiset homeindeksin maksimiarvot.



Kuva 3.2. Homeen kasvulle suotuisat olosuhteet, joilla saavutetaan homeindeksien mukaiset maksimiarvot. (Hukka & Viitanen 1999)

Tutkittavat materiaalit on jaettu homehtumisen kannalta taulukon 3.3 mukaisiin herkkyysluokkiin: 1. hyvin herkästi homehtuva, 2. herkästi homehtuva, 3. kohtalaisen kestävä ja 4. kestävä.

Taulukko 3.3. Rakennusmateriaalien homehtumisherkkyysluokat (HHL). (Vinha et al. 2012)

Homehtumis-herkkyysluokka	Rakennusmateriaalit
1	Sahattu ja mitallistettu puutavara (mänty ja kuusi), höylätty mänty
2	Höylätty kuusi, paperipintaiset tuotteet, puupohjaiset levyt, kipsilevy
3	Tiilet, sementti- ja muovipohjaiset materiaalit, kevytbetoni, kevytsorabetoni, karbonatisoitunut vanha betoni, mineraalivillat
4	Lasi ja metalli, tehokkaita suoja-aineita sisältävät tuotteet, alkalinen uusi betoni

Ympäriöivän ilman suhteellisen kosteuden ollessa alle kriittisen rajan, RH_{crit} , homeen kasvu selvästi hidastuu tai pysähtyy. Homeen kasvu ei ole mahdollista pakkasessa tai yli $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa (Kokko et al. 1999). Homeen kriittistä rajakäyrää voidaan kuvata näin ollen yhtälöillä:

$$RH_{crit} = \begin{cases} -0,00267T^3 + 0,16T^2 - 3,13T + 100, & \text{kun } 0^{\circ}\text{C} < T \leq 20^{\circ}\text{C} \\ 100\%, & \text{kun } 0^{\circ}\text{C} \geq T \geq 50^{\circ}\text{C} \\ RH_{min}, & \text{kun } 20^{\circ}\text{C} < T < 50^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (3.1)$$

missä,

T on lämpötila ($^{\circ}\text{C}$)

RH_{min} on suhteellisen kosteuden minimiarvo (%), joka vaaditaan homekasvun alkamiseen, taulukon 3.3 mukaan

Kahden materiaalin välisessä rajapinnassa suhteellisen kosteuden minimiarvo määräytyy herkemmin homehtuvan materiaalin mukaan (Vinha et al. 2012). Puurunkoisessa seinärakenteessa määrääväenä tekijänä on yleensä puurakenteen suhteellinen kosteus (80 % RH), jos se on rajapinnan toisena materiaalina. Vakio-olosuhteissa homeen kasvun alkamiseen tarvittavaa aikaa, t_m , kuvataan homemallissa regressiomallilla (Hukka & Viitanen 1999):

$$t_m = \exp(-0,68 \ln T - 13,9 \ln RH + 0,14W - 0,3SQ + 66,02) \quad (3.2)$$

missä,

T	on	lämpötila ($^{\circ}\text{C}$)
RH	on	suhteellisen kosteus (%)
W	on	puulaji (0 = mänty, 1 = kuusi)
SQ	on	pinnan ravinteikkuus (0 = kuivauksen jälkeen uudelleen sahattu pinta, 1 = alkuperäinen, kuivaamosta suoraan tullut pinta)

Tässä tutkimuksessa käytetään lähtöoletusta, jonka mukaan seinärakenteena käytetään sahattua tai mitallistettua mäntypuuta. Tällöin rakenteen homehtumisaste voidaan määrittää ajan suhteen differentiaaliyhtälöllä (Hukka & Viitanen 1999):

$$\frac{dM_0}{dt_0} = \frac{1}{7 \cdot \exp(-0,68 \ln T - 13,9 \ln RH + 66,02)} k_1 k_2 \quad (3.3)$$

Yhtälö 3.3 kuvaa kerran vuorokaudessa (24 h) esiintyvää keskimääräistä homeindeksin arvoa. Se ottaa huomioon homeen kehitysasteen, suhteellisen kosteuden ja lämpötilan vaikutukset homeen kasvun muutoksille. Tekijä k_1 on pinnan homehtumisnopeutta ja k_2 homeindeksin kasvun hidastumista kuvaava tekijä alueella $4 < M < 6$. Taulukossa 3.4 on esitetty apusuureen k_1 arvot homehtumisherkkyysluokittain (ks. myös taulukko 3.3). Homeindeksiä tarkastellaan tunnin laskentajaksoissa, jolloin tekijä k_2 riippuu edeltävän tunnin homeindeksin arvosta M ja materiaalin pinnalla saavutettavasta suurimmasta homeindeksistä M_{\max} kaavan 3.4 mukaisesti (Kokko et al. 1999).

$$k_2 = \max[1 - \exp(2,3 \cdot (M - M_{\max})), 0] \quad (3.4)$$

Taulukko 3.4. Homehtumisherkkyysluokkien kertoimet ja suhteellisen kosteuden minimiarvot. (Vinha et al. 2012)

Homehtumisherkkyysluokka	k_1		A	B	C	RH_{\min}
	$M < 1$	$M > 1$				
Hyvin herkkä	1	2	1	7	2	80
Herkkä	0,578	0,368	0,3	6	1	80
Kohtalaisen kestävä	0,072	0,097	0	5	1,5	85
Kestävä	0,033	0,014	0	3	1	85

Yhtälössä 3.4 esiintyvä homeen maksimiarvo on riippuvainen olosuhteesta ja materiaalista yhtälön 3.5 mukaisesti (Vinha et al. 2012).

$$M_{\max} = A + B \cdot \frac{RH_{\text{crit}} - RH}{RH_{\text{crit}} - 100} - C \cdot \left(\frac{RH_{\text{crit}} - RH}{RH_{\text{crit}} - 100} \right)^2 \quad (3.5)$$

Kertoimet A, B ja C saadaan pohjamateriaalin mukaisesti taulukosta 3.4. Seinärakenteen puurungossa käytetään seuraavia arvoja: A = 1, B = 7 ja C = 2. Pohjamateriaalina tarkoitetaan kahden materiaalin välisessä rajapinnassa homehtumisen kannalta tutkittavaa materiaalia. Kuivissa ja kylmissä olosuhteissa, niin sanotun kuivan kauden aikana homeen kasvu on hyvin hidasta ja homeindeksi jää tänä aikana yleensä alle yhden (Vinha et al. 2010). Kuivan kauden vaikutus huomioidaan laskennassa korjauskertoimilla kaavan 3.6 mukaisesti.

$$\frac{dM}{dt} = C_{mat} \cdot \begin{cases} -0,032 \cdot \left(\frac{t-t_1}{24}\right), & \text{kun } 0h < t \leq 6h \\ 0, & \text{kun } 6h \leq t \leq 24h \\ -0,016 \cdot \left(\frac{t-t_1}{24}\right), & \text{kun } t > 24h \end{cases} \quad (3.6)$$

missä,

t	on	laskenta-aika alkuhetkestä t_1 (h)
t_1	on	alkuhetki (h)
C_{mat}	on	materiaalikohtainen taantumakerroin homeen taantumisnopeudelle

Yhtälö 3.6 kuvaa rakenteen homeindeksiä tunnin laskentaintervalleissa, jolloin t_1 on tuntia edeltävä aika laskennan alkuhetkestä. Differentiaaliyhtälössä olevat vakiokertoimet pohjautuvat alun perin männyn pintapuulle määritettyyn taantumiaan. Yhtälö on suhteutettu kattamaan muut rakenteissa yleisesti käytettävät rakennusmateriaalit käyttämällä yhtälössä materiaalin taantumaluokasta riippuvaa taantumakertoimen arvoa C_{mat} (ks. taulukko 3.5). TTY:n ja VTT:n tekemässä yhteistutkimuksessa havaittiin, että alkuperäiseen homemalliin pohjautuvat kertoimet yliarvioivat taantumaa myös sahatussa männyn pintapuussa. Tämän takia tässä tutkimuksessa on päädytty käyttämään myös männyn pintapuulle taantumakertoimen arvoa 0,5.

Taulukko 3.5. Eri homeherkkyysluokkiin kuuluvien materiaalien taantumaluokat ja taantumakertoimet C_{mat} . (Vinha et al. 2012)

Taantumakerroin C_{mat}	Taantumaluokka	Homehtumisherkkyysluokka
0,50	Voimakas taantuma	Hyvin herkkä (HHL 1)
0,25	Kohtalainen taantuma	Herkkä (HHL 2)
0,10	Vähäinen taantuma	Kohtalaisen kestävä (HHL 3)
0,10	Vähäinen taantuma	Kestävä (HHL 4)

Taulukosta 3.5 voidaan havaita, että mitä voimakkaampaa on homeen kasvu materiaa-
lissa suotuisissa olosuhteissa, niin sitä voimakkaampaa on myös sen taantuma epäsuo-
tuisten olosuhteiden aikana. Taantumakertoimen määrittelyssä on kuitenkin vielä tällä
hetkellä epävarmuustekijöitä, joka voi johtaa useiden vuosien tarkastelujaksojen aikana
virheelliseen ennusteeseen homeenkasvun tasosta (Vinha et al. 2012). Tätä tutkimusta
käsittelevässä lyhyessä aikajaksossa (1 vuotta) se on kuitenkin riittävän tarkka kuvaaa-
maan materiaalin taantumisenopeuden suuruutta.

Kahden materiaalin välisessä rajapinnassa homehtuminen määräytyy pääsääntöisesti
herkemman materiaalin mukaisesti. Poikkeuksen tässä muodostaa homehtumisher-
kkyysluokan 3 mukainen kevytbetoni, jossa kasvunopeus määräytyy homehtumisher-
kkyysluokan 2 ja homeindeksin maksimiarvo homehtumisherkkyysluokan 3 mukaan
(Vinha et al. 2012).

Homemikrobien tuottamat MVOC-yhdisteet voivat pieninäkin pitoisuuksina aiheuttaa
ihmiselle terveyshaittoja ja olla hengitysteitä ärsyttäviä (Seppänen et al. 1997). Terve-
delliseltä kannalta jo homeindeksi 2 eli selvästi mikroskoopilla havaittava homeen kas-
vu saattaa olla ongelmallinen (Kokko et al. 1999). Vakavamman kosteusvaurion ja ho-
mekasvun indeksit ovat välillä 4-6, jolloin suurin osa rakenteen pinnasta on homerih-
maston peitossa. Sosiaali- ja terveystieteiden ohjeiden mukaan materiaali voidaan
tulkita homekasvustojen kontaminoimaksi, kun materiaalin sieni-itiöpitoisuus on vähin-
tään 10^4 cfu/g (STM 1997). Homeindeksiluokittelun mukaisesti uusia itiöitä alkaa muo-
dostua, kun homeindeksi saavuttaa arvon 3. Toksisia aineenvaihduntatuotteita voi kui-
tenkin esiintyä jo homeindeksiarvoilla 1-2 (Viitanen 2011).

Ulkoseinärakenteissa olevat kosteus- ja lämpötilaolot ylittävät yleensä ainakin paikalli-
sesti homeen kasvun riskirajan. Homeen kasvun täydellinen estäminen rakenteen
uloimmissa osissa on vaikeaa, koska pelkkä ulkoilman kosteus aiheuttaa rakenteeseen
homeriskin ylittävän kosteusrasituksen. (Kokko et al. 1999) Ulkoilmaan rajoittuviin
rakenteisiin, kuten esimerkiksi tuuletusraossa oleviin pintoihin voikin muodostua Suo-
men ilmastossa luonnollista homeen kasvua (Meklin et al. 1997). Myös tuulensuojan
sisäpinta on alttiina ulkoilman kosteudesta johtuvalle homehtumiselle. Homeen kasvu
rungon kylmissä osissa on seurausta ulkoilman korkeasta suhteellisesta kosteudesta syk-
syisin ja kesällä siitä, että rakenteisiin sitoutunut hygroskooppinen kosteus siirtyy ilman
jäähtyessä rakenteen kylmiin osiin nostaan samalla näissä huokosilman suhteellista kos-
teutta. Erityisesti sisäilman vuodot lisäävät eristeen ulkopinnan homehtumisriskiä. Ho-
mepartikkelien pääsyä sisäilmaan ehkäisee tiivis sisäpinta ja eristemateriaalin suodatta-
va vaikutus. Homeen kasvu seinärakenteen ulkopinnassa ei saa kuitenkaan ylittää vallit-
sevaa riskiä ulkoilmassa (Kokko et al. 1999). Rakenteen sisäosissa homeen kasvun ris-
kikriteerinä käytetään tässä tutkimuksessa nollassa ($M_{\max} < 1$).

Homeindeksin maksimiarvo esiintyy ajanjaksolla, jossa lämpötila pysyy nollan yläpuolella suurimman osan ajasta. Kriittisiä kausia homeen kasvulle ovat erityisesti syksyn kosteat olosuhteet, jonka aikana lämpötila on yli 0 °C ja suhteellinen kosteus samanaikaisesti korkea (> 80 % RH). Laskennassa ei oteta huomioon usean peräkkäisen vuoden ja eristeiden homeenestoaineiden vaikutusta homeen kasvuun, koska riittävän luotettavaa tutkimustietoa ei näiden vaikutuksesta ole saatavilla. Joka tapauksessa selluvillaeristeiden sisältämät homeenestoaineet (booriyhdisteet) estävät lahottajasienten kasvua eristeessä ja siihen kosketuksessa olevassa puussa ja muodostavat näin ylimääräisen home suojan seinärakenteelle (Paajanen et al. 1994).

4 ULKOSEINÄRAKENTEEN KOSTEUSTEKNI- NEN TOIMINTA

4.1 Kosteusliikkeet ulkoseinässä

Vesihöyrypitoisuusero seinärakenteen eri puolilla pyrkii tasoittumaan diffuusion vaikutuksesta, jolloin vesihöyry siirtyy korkeammasta pitoisuudesta matalampaa kohden. Talvella kosteus määrä ulkoilmassa on alhainen, jolloin vesihöyrypitoisuusero pyrkii tasoittumaan siirtymällä sisältä ulospäin. Diffuusiovirta on sitä suurempaa mitä suurempi on sisäilman kosteuslisä.

Suomalaisessa ilmastossa suhteellinen kosteus on luonnostaan korkea ulkoilmassa syksyllä ja talvella. Näin ollen sisäilman kosteus lisää ulkoseinärakenteen suhteellista kosteutta tasolle, joka edistää homeenkasvua tai aiheuttaa vesihöyryn tiivistymistä ulkorakenteen pintaosiin. Kriittisin piste ulkoseinässä on yleensä tuulensuojan sisäpinta, jossa vesihöyry kohtaa tiheämmän pinnan siirtyessään ulospäin. Kosteuden saavuttaessa tuulensuojan sisäpinnassa kyllästyspisteen, kosteus kondensoituu rakenteen pintaan. Tiivistyminen tapahtuu silloin, kun materiaalin huokosten suhteellinen kosteus saavuttaa 100 % RH. Liian suuri kosteusvirta on seurausta liian matalasta sisäpinnan vesihöyrynvastuksesta, jolloin kosteus määrä ei voi laskea riittävästi siirtyessään rakenteen kylmälle puolelle. Rakenteen sisäpinnan oikea vesihöyrynvastus on tärkeä, jotta rakenne voi toimia vallitsevissa olosuhteissa kosteusteknisesti oikein.

Seinärakenteessa höyrynsulku estää kosteuden tiivistymistä rakenteeseen. Tällöin suhteellinen kosteus tuulensuojan sisäpinnassa riippuu ainoastaan ulkoilman olosuhteista ja kosteusvajesta. Kesäaikana seinä saa enemmän auringonsäteilyä ja ulkoilman lämpötila on korkeampi, jolloin kosteuden siirtyminen rakenteen sisäosiin on merkittävämpää kuin muina vuodenaikoina. Lämmittämättömissä rakennuksissa kosteus saattaa tiivistyä höyrynsulun ulkopintaan, jos ulkoilman lämpötila ja suhteellinen kosteus nousevat nopeasti. Ilmiö on kuitenkin lyhytaikainen ja tapahtuu vain silloin kun sisäilman lämpötila jää hieman jälkeen ulkoilman lämpötilasta. Tiivistymistä voidaan ehkäistä lämmittämällä rakennusta myös talviaikana.

Ilman-/höyrynsulku on asennettu usein 50 mm syvyyteen seinärakenteen sisäpinnasta sähköasennusten takia, jolloin ilmansulusta on saatu helpommin yhtenäinen ja ilmatiivis ilman, että sitä on tarvinnut puhkoa sähköläpiviennillä. Tällaisissa ulkoseinissä, joissa

höyrinsulku on asennettu 50 mm syvyyteen, voi suhteellinen kosteus nousta korkeaksi myös höyrinsulun sisäpinnassa pystyrungon kohdalla, kun höyrinsulun sisäpuolella käytetään vaakasuuntaista ristikoolausta. Tämä johtuu siitä, että höyrinsulun takana oleva kantava pystyrunko toimii rakenteessa kylmäsilta.

4.2 Ulkoseinärakenteiden höyry- ja ilmatiiviyttä säätelevät ohjeet ja määräykset

4.2.1 RakMk C2:ssa annetut ohjeet

Suomen rakennusmääräyskokoelman osan C2 (1998) mukaan ulkoseinän vesihöyrinvastuksen ja ilmatiiviyden on oltava sellainen, että seinän kosteuspitoisuus ei muodostu haitalliseksi vesihöyrin diffuusion tai konvektion vaikutuksesta. Rakennekosteuden ja seinään satunnaisesti tunkeutuvan veden on voitava poistua rakenteesta haitta aiheuttamatta. Jos rakenne voi haitallisessa määrin läpäistä ilmaa tai vesihöyryä, on seinärakenteen tarkoituksenmukaisesti kohtiin asennettava ilmanpitävät, vesihöyrytiivit ja tuulensuojana toimivat kerrokset.

”Avohuokoisen lämmöneristyksen lämpimällä puolella olevan rakennekerroksen vesihöyrinvastuksen tulee olla vähintään viisinkertainen kylmällä puolella olevan rakennekerroksen vesihöyrinvastukseen verrattuna.” (RakMk C2 1998) Muussa tapauksessa seinään on lisättävä erillinen höyrinsulku. Tästä voidaan poiketa, jos osoitetaan, että rakenne on kosteusteknisesti toimintavarma kokemuseräiseen tietoon tai tutkimuksiin pohjautuen.

4.2.2 RIL 107:ssa annetut ohjeet

Puu- ja teräsrunkoisissa ulkoseinissä pyritään vähentämään seinärakenteeseen kulkeutuvaa sisäilman kosteutta tekemällä sisäpinnasta höyry- ja ilmatiivis. Höyry- ja ilmatiiviyys varmistetaan asentamalla avohuokoisen lämmöneristekerroksen sisäpintaan ilmansulku ja ulkopintaan hyvin vesihöyryä läpäisevä tuulensuoja. RIL 107-2000 (2009) mukaan ilmansulkuna tulee yleensä käyttää höyrinsulkua. Lämmöneristeen lämpimällä puolella olevan rakennekerroksen vesihöyrinvastuksen tulee olla vähintään viisikertainen ulkopintaan (tuulensuojaan) verrattuna.

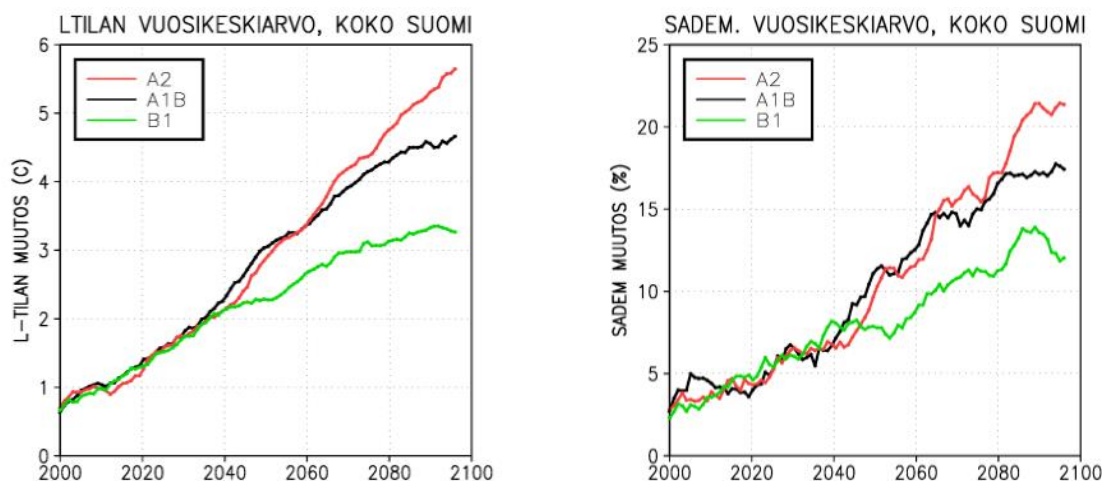
Seinärakenne voidaan tehdä ilman höyrinsulkua, mikäli kosteustekninen toimivuus varmistetaan luotettavan selvityksen avulla. Tarkastelu on tehtävä rakenteen käyttöään eri olosuhteille. Mikäli sisäilman kosteus on ajoittain tai pitkäaikaisesti korkea (esim. märkätila, sisäilman kostutus), on rakenteessa käytettävä höyrinsulkua tai sisäpintaan on tehtävä muu höyrytiivis kerros.

4.2.3 Yhteenveto

Rakennusmääräyskokoelman C2 (1998) mukaan rakenne on hyväksyttävissä, mikäli sisäpinnan vesihöyrynvastus on vähintään viisinkertainen ulkopintaan nähden. Lisäselvityksillä jopa matalampi vesihöyrynvastussuhde on mahdollinen. RIL 107-2000 (2009) mukaan seinärakenteessa on yleensä oltava höyrynsulku ja muussa tapauksessa vaaditaan tarkempi selvitys. RIL:n suosituksena on, että sisä- ja ulkopinnan välinen vesihöyrynvastuksen suhde täytyy aina olla vähintään 5:1. Kummassakaan julkaisussa ei rajoiteta kosteuden määrää seinärakenteessa, eikä mainita täsmällisiä minimi- ja maksimiarvoja sisä- ja ulkopinnan väliselle vesihöyrynvastussuhteille tai vesihöyrynvastuksen maksimiarvoa tuulensuojalle. Ainoastaan puisten kattorakenteiden vesihöyrynvastukselle annetaan RIL 107-2000:ssa (2009) selvä raja-arvo. Puisen kattorakenteen sisäpinnan vesihöyrynvastuksen on oltava vähintään $15 \times 10^9 \text{ m}^2 \text{ sPa/kg}$ olosuhteissa, joissa lämpötila on 20°C ja suhteellinen kosteus talvella $< 40 \%$.

4.3 Ilmastonmuutoksen vaikutukset

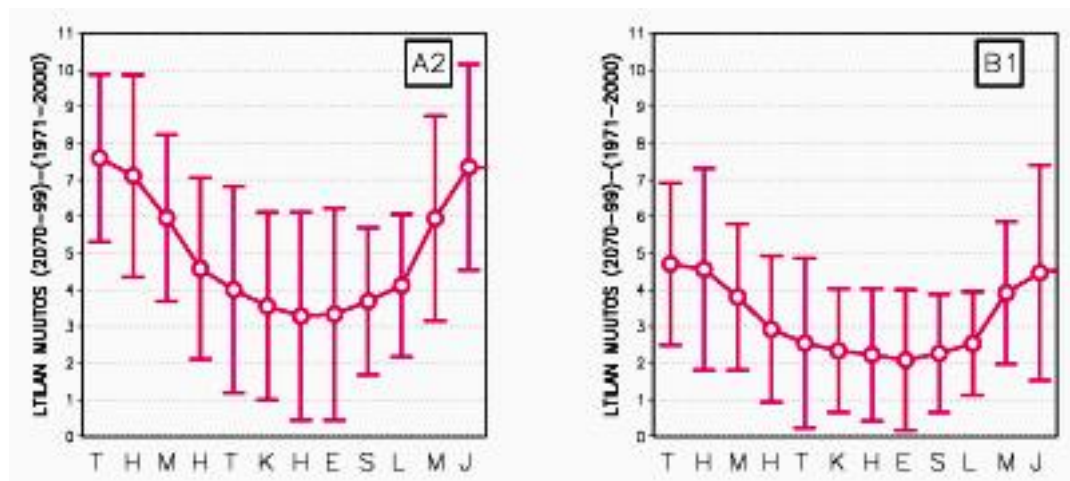
On arvioitu, että ilmaston lämpötila nousee kasvihuoneilmiön vaikutuksesta kolmesta kuuteen asteeseen vuosisadan loppuun mennessä. Ilmastoennusteet perustuvat 19 maailmanlaajuisella ilmastomallilla tehtyihin kokeisiin, joissa arvioidaan kasvihuonekaasujen kehittymistä. (Ilmatieteen laitos 2010) Kuvassa 4.1 on esitetty Suomen vuotuisen keskilämpötilan ja sademäärän muuttuminen aikavälillä 2000-2100 verrattuna ilmastollisen normaalijakson 1971-2000 keskiarvoon.



Kuva 4.1. Suomen vuotuisen keskilämpötilan ja sademäärän muuttuminen v. 2000-2100 verrattuna ilmastollisen normaalijakson 1971-2000 keskiarvoon. Ennusteet ovat 19 mallin tulosten keskiarvoja, ja ne on esitetty erikseen kolmelle kasvihuonekaasuskenaariolle (B1, A1B ja A2). (ilmatieteen laitos 2010)

A2-skenaariossa päästöjen oletetaan tulevaisuudessa lisääntyvän ja B1-skenaariossa selvästi vähentyvän. Kuvassa 4.1 esitetty A1B-käyrä kuvaa näiden kahden ääri vaihtoehdon välimuotoa. Päästöskenaariot ovat oletuksia ilmakehän kasvihuonekaasujen määrän kehittymisestä ja niiden kehitys riippuu oleellisesti maapallon väkimäärästä, talouden ja tekniikan kehittymisestä ja päästöjenhillintätoimista, joiden ennakointi on vaikeaa (Veijalainen et al. 2010). Kuvasta 4.1 havaitaan, että ilmastonmuutos on kaikilla skenaarioilla lähes sama vuoteen 2050 saakka. Tämän jälkeen ennustaminen oleellisesti vaikeutuu, mikä näkyy selvästi eri skenaarioiden erilaisessa muodossa. Rakennusten käyttöikäsuunnittelu on tyypillisesti 50-100 vuotta, jonka takia ilmastonmuutoksen vaikutuksia tulee myös tarkastella samalla aikajänteellä.

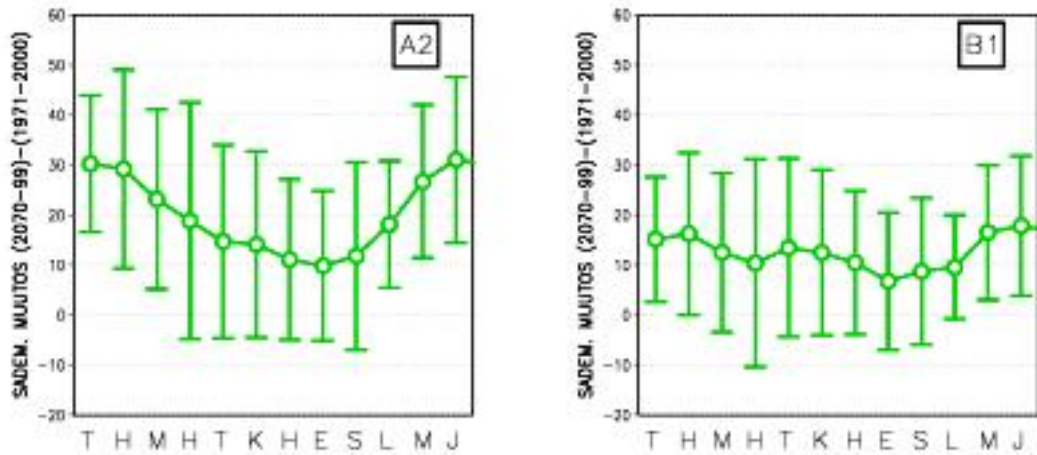
Tämän hetkisten ilmastoennusteiden mukaisesti lämpötila nousee eniten talvella, jolloin myös sadanta kasvaa (ks. kuvat 4.2 ja 4.3). Talven tilalle tulisi Etelä-Suomessa pitenevä syksy, joka on rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta kriittisintä aikaa. Etelä-Suomen ilmasto tulisi muistuttamaan nykyistä Keski-Euroopan ilmasto ja Pohjois-Suomen ilmasto nykyistä Etelä-Suomen ilmasto.



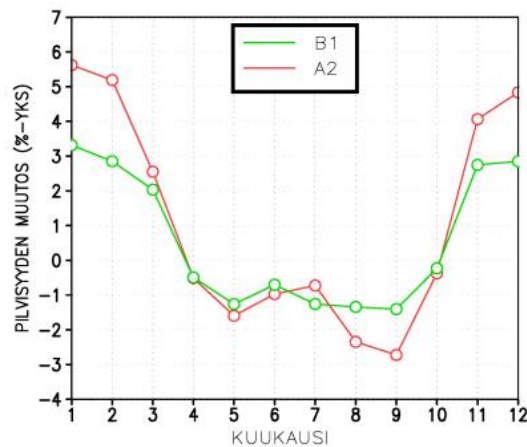
Kuva 4.2. Keskilämpötilojen muutos Suomessa vuoden eri kuukausina, kun verrataan jaksoa 1971-2000 jaksoon 2070-2099. Käyrä esittää 19 eri ilmastomallin ennustamien muutosten keskiarvoa, pystypalkit muutoksen 90 % todennäköisyysväliä. Vasemmanpuoleisessa kuvassa on annettu pessimististä A2- ja oikeanpuoleisessa optimistista B1-skenaariota vastaavat muutokset. Kaikki luvut ovat koko Suomen alueen yli laskettuja keskiarvoja. (Ilmatieteen laitos 2010)

Sademäärän oletetaan lisääntyvän kaikkina vuodenaikoina, kesällä kuitenkin vähemmän kuin talvella (ks. kuva 4.3). Sateet kastelevat enemmän rakennusten julkisivupintoja, jolloin kosteuspitäisyys, erityisesti kuorimuurattujen rankarakenteisten seinien tuuletusraossa kasvaa. Ulkoilman olosuhteet ovat runsaista sateista johtuen myös suuremman osan vuotta homeen kasvun kannalta suotuisalla alueella. Pilvisyyden oletetaan selvästi lisääntyvän talvisin (ks. kuva 4.4). Lisääntyvän pilvisyyden seurauksena myös auringsäteily vähenee talviaikana, joka entisestään heikentää rakenteiden kuivumista. Ke-

säisin auringonsäteily saattaa puolestaan lisääntyä, mikä lisää rakennusten sisäilman jäähtytystarvetta. Pitkään jatkuva korkea ulkoilman lämpötila ja jäähdytetty sisäilma aikaansaa kosteusvirran suunnan muuttumisen ajoittain ulkoa sisälle päin. Tästä saattaa olla seurauksena kosteuden kondensoitumista ilmansulun/höyrynsulun ulkopintaan.



Kuva 4.3. Sademäärän %-muutos Suomessa 1900-luvun loppuvuosikymmenistä alkaneen vuosisadan loppuun (ks. edellä olevan kuvan selitystekstiä). (Ilmatieteen laitos 2010)



Kuva 4.4. Kokonaispilvisyyden muutos prosenttiyksikköinä Keski-Suomessa vuoden eri kuukausina, kun verrataan jaksoa 2070-2099 jaksoon 1971-2000. Punaiset käyrät ilmaisevat A2-skenaariota ja vihreät B1-skenaariota vastaavia muutoksia. (Ilmatieteen laitos 2010)

Tuulisuuden osalta eri ilmastomalleihin pohjautuvat arviot poikkeavat toisistaan. Joidenkin ilmastomallien mukaan merijään väheneminen ja matalapaineiden reittien muuttuminen voi lisätä tuulisuutta etenkin talvisin rannikkoalueilla. Tuulen suunnan oletetaan muuttuvan lännenpuoleiseksi. Joka tapauksessa nykyiset tuulen mitoitusarvot ovat riittäviä myös seuraavan sadan vuoden aikavälillä tarkasteltuna.

5 KRIITTISTEN OLOSUHDETEKIJÖIDEN VALINTA

Rakennuksen ulkoseinää rasittavat lämpötilan vaihtelut, auringonsäteily, tuuli, sade ja ilman sisältämä kosteus, joiden osuus vaihtelee jatkuvasti ympäröivien olosuhteiden muutoksissa. Rakennetta ympäröivä ilman kosteus vaikuttaa rakenteen ja sen ainekerrosten tasapainokosteuteen ja siten suuresti rakenteen kosteustekniseen toimivuuteen. Seinärakenteen kosteusrasitus riippuu voimakkaimmin viistosateen, auringonsäteilyn ja sisäilman kosteuslisän määrästä. Auringonsäteilyn ja viistosateen osuudella on jopa suurempi merkitys referenssivuosien valinnassa kuin ulkoilman kyllästysvajauksella.

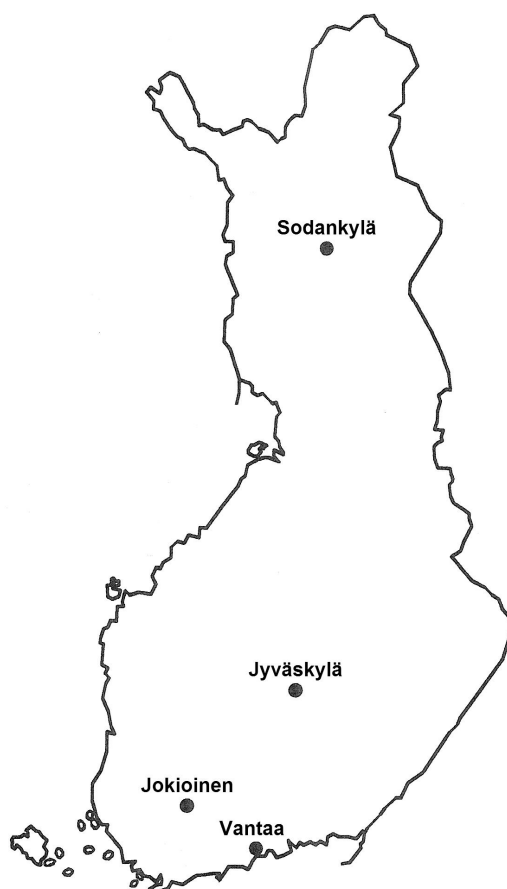
Tässä tutkimuksessa oletetaan, että seinärakenne ja siihen käytetyt rakennusmateriaalit on suojattu rakentamisen aikana niin, että niihin ei kohdistu normaalista poikkeavaa kosteusrasitusta. Laskentatarkastelut on suoritettu käyttämällä 2 vuoden laskentajaksoa ja rakenteen toiminnan tutkiminen on kohdistettu viimeiseen vuoteen, jona aikana rakenteessa oleva kosteus on jo kokonaisuudessaan poistunut. Materiaalien alkukosteutena on käytetty laskennassa 65 % RH:ta vastaavaa tasapainokosteutta.

5.1 Ulkoilman mitoitusolosuhteiden määrittäminen

Suomessa kosteuden kondensoitumisen kannalta kriittiset kosteusolosuhteet esiintyvät syys- tai talviaikana, jolloin ilman lämpötila on alhainen ja suhteellinen kosteus korkea. Homeen kannalta kriittisiä ovat taas olosuhteet, jolloin ilman lämpötila ja suhteellinen kosteus ovat korkeita. Tällaiset olosuhteet esiintyvät Suomessa yleensä kesällä ja syksyllä. Laskentaa varten on ulkoilman mitoitusolosuhteiksi valittu kokonainen vuosi, joka kattaa kylmän talvikauden ja kosteat kesä- ja syysolosuhteet.

Mitoitusvuoden valinnan kriteerinä on standardin EN ISO 15927-1 (2003) ja IEA Annex 24 (1996) mukaisesti kerran kymmenessä vuodessa toistuva kriittinen ilmasto-olosuhde. Kriteerin mukaisesti ulkoilman olosuhteet ovat tarkasteltavan toimintakriteerin suhteen kriittisempiä keskimäärin enintään kymmenessä vuodessa. Samaa mitoituskriteeriä on käytetty myös aikaisemmissa tutkimuksissa, esimerkiksi Vinha 2007 ja Salonvaara et al. 2001. Tiukemman mitoituskriteerin käyttö ei ole perusteltua, koska lämpö- ja kosteusteknisten ongelmien aiheuttamat vauriot ovat harvoin katastrofaalisia, toisin kuin kantavien rakenteiden mitoituksessa, jossa kyseessä on usein ihmishenkien menettäminen.

Mitoitusvuosien valinta on tehty tässä samassa FRAME-tutkimuksessa omassa tutkimusosiossa. Tässä yhteydessä mitoitusvuosien valinnasta esitetään lyhyesti ainoastaan pääperiaatteet. Mitoitusvuosien valinnan lähtötietoina käytettiin neljän paikkakunnan säätietokantoja. Vantaa, Jokioinen, Jyväskylä ja Sodankylä edustivat tutkimuksessa koko Suomen ilmastoa (kuva 5.1). Paikkakuntien valinta oli painottunut etelään, jossa myös rakentamisen ja rakennuskannan määrä on Suomessa suurin. Käytössä oli kultakin neljältä paikkakunnalta 30 vuoden ilmastodata, jolloin tarkasteluissa oli mukana yhteensä 120 vuotta. Tästä joukosta pyrittiin valitsemaan mitoitusvuodet siten, että 90 % vuosisista oli vähemmän kriittisiä tarkasteltavan toimintakriteerin kannalta.

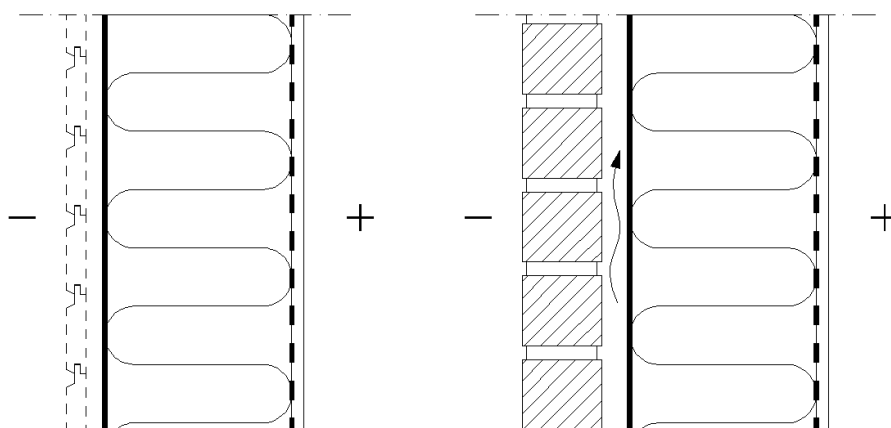


Kuva 5.1. Tutkimukseen valitut paikkakunnat.

Vinha (2007) havaitsi aiemmassa tutkimuksessaan, että seinärakenne on alttiimpi kosteuden kondensoitumiselle, jos tuulensuojalevyn lämmönvastus on pieni. Näin ollen mitoitusvuosien valinnassa käytettiin seinärakennetta, jossa lämmöneristeen ulkopinnassa oli ohut säänsuojakalvo. Mitoitusvuosien valinnassa ei otettu huomioon puuverhotussa seinässä julkisivuverhousta ja sadeveden adsorptiokerroin asetettiin tässä laskeutuvissa nollaksi. Näin voitiin menetellä, koska olosuhteet puuverhoillun seinärakenteen tuuletusraossa ovat melko samanlaiset kuin ulkoilmassa (ks. kappale 2.5.1). Tämän lisäksi puuverhottu seinärakenne on tiivis ja huonosti vettä kapillaarisesti imevä,

jolloin viistosade ei vaikuta rakenteen kosteustekniseen toimivuuteen merkittävästi. Puuverhouksen poisjättäminen nopeutti laskentaa, koska laskentamallia voitiin yksinkertaistaa. Tässä tutkimuksessa tehdyissä laskentatarkasteluissa julkisivu ja ilmaraossa tapahtuva ilmavirtaus otettiin kuitenkin huomioon kappaleen 2.5 mukaisesti.

Tuulensuojan ulkopinnan pintavastuksella on suuri merkitys rakenteessa, jossa tuulensuojan lämmönvastus on pieni (sääsuojakalvo). Tämän takia mitoitusvuosien määrittämiseen käytetyillä puuverhotuilla ulkoseinillä tuulensuojan ulkopinnan pintavastukseksi valittiin $0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$. Mitoitusvuosien määrittämisessä käytetyt seinärakenteet on esitetty kuvassa 5.2. Molemmissa käytetyissä rakenteissa oli sisäverhouslevyn takana tiivis höyrynsulkumuovi (C11, ks. liite 2) ja ulkopinnassa ohut, lämpöä eristämätön sääsuojakalvo, jonka vesihöyrynvastus oli $5 \times 10^3 \text{ s/m}$. Seinärakenteiden vesihöyrytiivistä sisäpinnasta johtuen sisäilman vesihöyrypitoisuudella ei ollut mitoitusvuositarkasteluissa vaikutusta rakenteen toimintaan. Tällöin mitoitusvuosi voitiin määrittää pelkästään ulkoilman olosuhteiden perusteella. Vaipparakenteiden toimintakriteereiksi valittiin kosteuden kondensoituminen ja homeen kasvu. Homeen kasvua ja kosteuden kondensoitumista tarkasteltiin lämmöneristeen ulko- ja sisäpinnoissa, joissa esiintyi rakenteen toiminnan kannalta kriittisimmät lämpötila- ja kosteusolosuhteet.

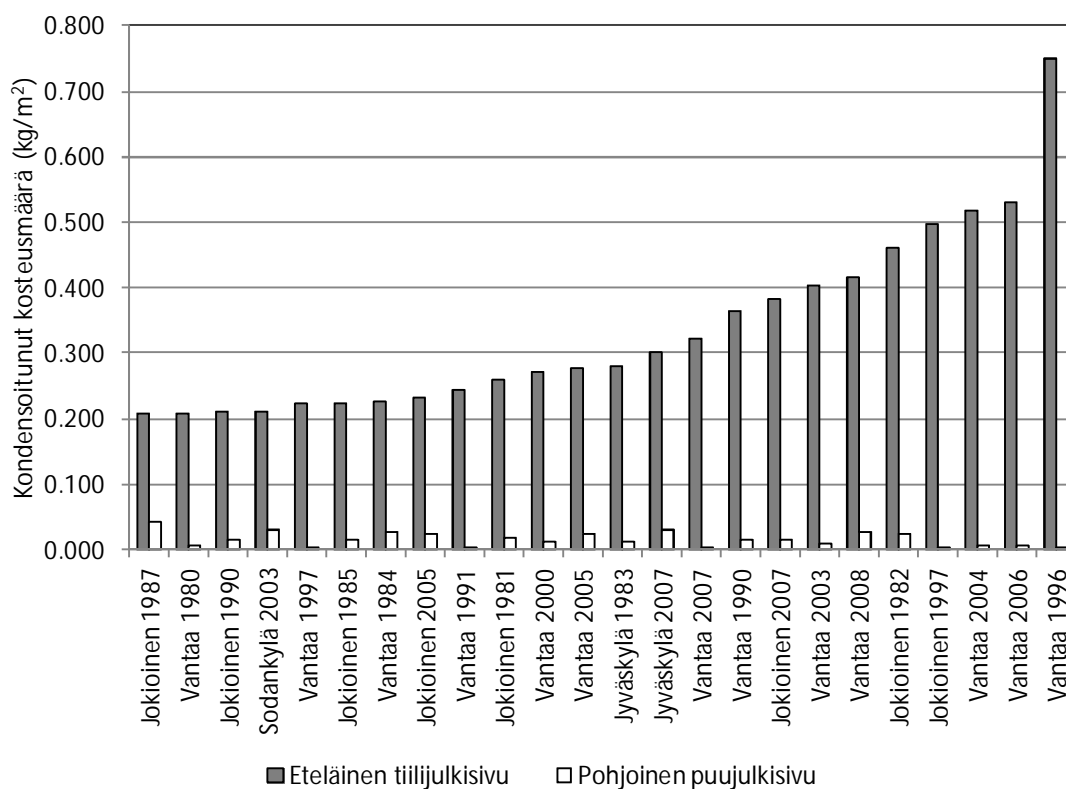


Kuva 5.2. Puurunkoiset ulkoseinärakenteet, joita käytettiin kriittisten mitoitusvuosien valinnassa.

Sateelta suojatulla seinärakenteella kriittisin ilmansuunta oli pohjoinen, jossa auringonsäteilyn kuivattava vaikutus oli pienin ja sateen vaikutuksen alaisella seinärakenteella etelä, jossa sademäärä ja auringonsäteily olivat suurimmillaan. Tiiliverhotussa rankaseinässä auringonsäteily siirtää sateella tiilirakenteeseen imeytynyttä kosteutta rakenteen takana olevaan tuuletusrakoon nostaten samalla sisemmän seinäosan suhteellista kosteutta. Pohjoissivulla rakenteen kuivuminen perustuu lähes yksinomaan ilman kyllästysvajaukseen. Kuvassa 5.3 on esitetty tiiliverhotun ulkoseinän 24 kriittisintä vuotta kosteuden kondensoitumisen kannalta. Kuvasta voidaan havaita, että samat vuodet eivät ole kriittisiä puuverhotuissa ulkoseinissä. Vuosien kriittisyystaso on siis seinärakenteesta riippuvainen. Rakenne ja siinä käytettyjen materiaalien ominaisuudet kuten materiaalien

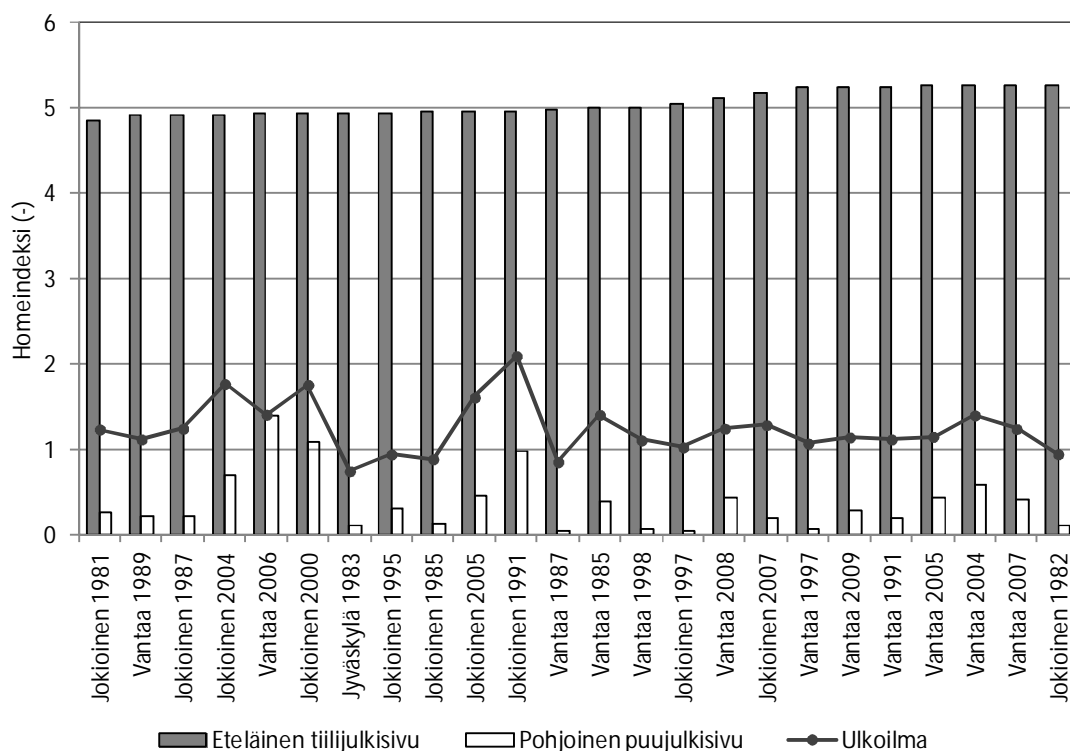
kosteudensitomiskyky, vesihöyrynläpäisevyys ja kapillaarisuus vaikuttavat merkittävästi tarkastelukohtien kosteus- ja lämpöolosuhteisiin. Tästä syystä laskelmia tehtiin myös muille ulkoseinä- ja yläpohjarakenteille.

Kondensoituvan kosteuden maksimimäärä nykyilmastossa, lämmöneristeen ulkopinnassa oli tiiliseinällä 749 g/m^2 ja puuseinällä 43 g/m^2 käytettäessä tuulensuojana sääsuojakalvoa. DIN 4108-3 (1981) standardin mukaan kapillaariselle rakennusmateriaalille sallittu tiivistyvä kosteusmäärä on 1000 g/m^2 ja ei-kapillaarisella 500 g/m^2 , ennen kuin kosteudesta on haittaa rakenteelle. Tässä tutkimuksessa esitetyt ulkoseinät alittavat nämä arvot. Kosteusmäärät ovat rakenteissa kuitenkin liian suuria, jos otetaan huomioon homeen kasvulle suotuisat kasvuolosuhteet (ks. kappale 3). DIN-standardin ohje ei siis näin ollen sovellu sellaisenaan käytettäväksi puurunkoisissa ulkoseinissä ja niiden toimivuuden arvioinnissa.



Kuva 5.3. Kondensoituneen kosteuden maksimimäärä lämmöneristeen ulkopinnassa seinä- m^2 kohden käytettäessä tuulensuojana paperipohjaista tuulensuojakalvoa.

Tarkasteltaessa vuosien kriittisyystasoa homeutumisen kannalta, voidaan havaita, että auringonsäteily ja viistosade vaikuttavat vuosien kriittisyysjärjestykseen. Viistosadetta läpäisevässä kuorimuurissa homeindeksi pysyy korkealla, vaikka ulkoilman homeindeksi laskee, kun taas puuverhotussa seinässä eristeen ulkopinnan homeindeksi seuraa paremmin ulkoilman homeindeksiä (ks. kuva 5.4). Kuvasta 5.4 voidaan havaita, että paperipohjaisen tuulensuojan käyttö kuorimuuratuissa rakenteissa on kriittinen paikkakunnasta riippumatta.



Kuva 5.4. Homeindeksin maksimiarvot lämmöneristeen ulkopinnassa kriittisten laskentavuosien aikana.

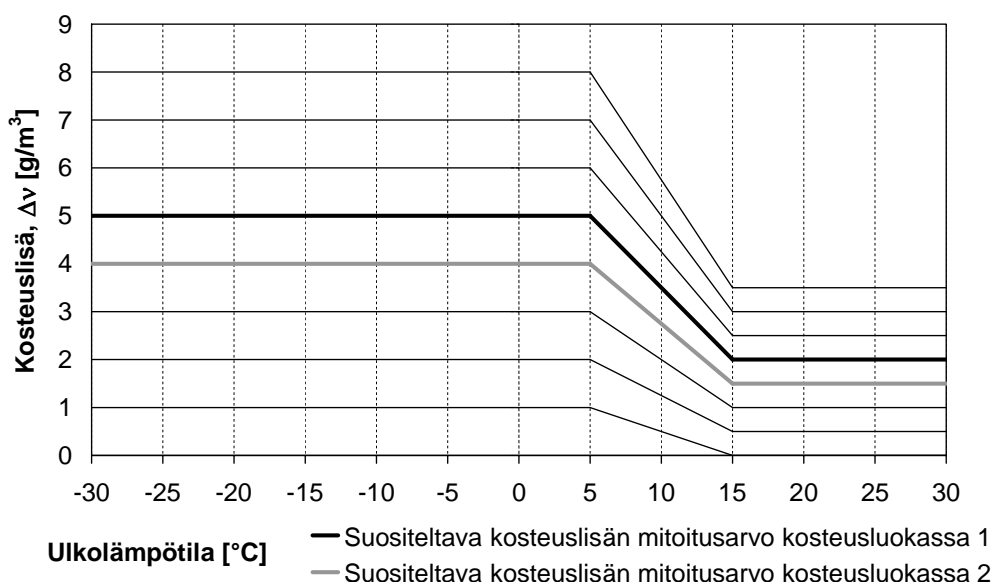
Tätä tutkimusta varten tehty säätietokanta sisälsi havaintoarvoja Ilmatieteen laitokselta kolmen tunnin välein. Aineisto täydennettiin tuntikohtaiseksi laskentatiedostoksi interpoloimalla väleihin puuttuvat säähavaintoarvot. Säätietokannan sisältämiä muuttujia olivat ilman lämpötila, suhteellinen kosteus, tuulen nopeus ja suunta, sademäärä sekä auringonsäteily. Viistosateen intensiteetti seinäpinnalle laskettiin kappaleen 2.2.2 mukaisesti. Laskennat suoritettiin nykyilmaston lisäksi myös vuoden 2050 sekä 2100 ilmastoissa pessimistisen, A2-luokan kasvihuonekaasuskenaarion perusteella. A2-skenaariossa oletetaan, että päästöjen kasvu jatkuu tulevaisuudessakin nopeana.

Rakennusfysikaaliset mitoitusvuodet valittiin siten, että samat vuodet olivat yleispäteviä monien erityyppisten vaipparakenteiden tarkasteluissa. Testirakenteilla tehtyjen laskentatarkastelujen perusteella kriittisiksi vuosiksi ulkoseinärakenteissa osoittautui Jokioinen 2004 ja Vantaa 2007. Jokioinen 2004 oli kriittinen rakenteissa, jotka olivat suojattu sateen vaikutuksilta (esimerkiksi puuverhottu seinä) ja Vantaa 2007 puolestaan osoittautui kriittiseksi rakenteille, joiden kosteustekniseen toimintaan sateella oli vaikutusta (esimerkiksi tiiliverhottu seinä). Eri rakenteissa näiden vuosien kriittisyysaste vaihteli jonkin verran, mutta tyypillisesti se oli lähellä 90 %:ia tai jopa sen yli. Tulevaisuuden ilmastossa mitoitusvuosiksi saatiin vastaavat vuodet, jotka oli valittu nykyilmastossa eli Jokioinen 2064 ja 2094 sekä Vantaa 2067 ja 2097.

5.2 Sisäilman olosuhteet

5.2.1 Sisäilman lisäkosteus

Sisäilman kosteuslisää ja kosteustuottoa on mitattu Suomessa puurunkoisista pientaloista (Vinha et al. 2005b) ja kivi- ja hirsirunkoisista asunnoista (Vinha et al. 2009) kenttä-tutkimuksin. Tutkimuksissa havaittiin, että kosteuslisän arvot poikkeavat huomattavasti standardissa EN ISO 13788 (2001) esitetystä arvoista. Sisäilman kosteuslisä määritettiin makuu- ja olohuoneista käyttämällä mitoituskriteerinä 90 % kriittisyystasoa, jonka mukaan enintään 10 % tapauksista oli valittua tasoa kriittisempiä. Olo- ja makuuhuoneiden välillä kosteuslisän mittaustulokset eivät eronneet merkittävästi toisistaan.



Kuva 5.5. Sisäilman kosteuslisän mitoituskäyrästä pientaloille ja kerrostaloille Suomen ulkoilman olosuhteissa. (Vinha et al. 2009)

Kuvan 5.5 mukaisesti sisäilman kosteuslisä pienenee ulkoilman lämpötilan kasvaessa. Kesällä pienempi kosteustuotto on todennäköisesti seurausta siitä, että ihmiset tuulettavat huoneita enemmän, käyttävät ilmastointia suuremmalla käyttönopeudella ja oleskelevat ulkona enemmän kuin talviaikana. Pyykkiä kuivatetaan lämpimänä kautena myös enemmän ulkona, jolloin kosteustuotto vähenee rakennuksen sisällä. Kenttämittauksissa (Vinha et al. 2005b) olleiden puurunkoisten pientalokohteiden keskimääräinen asumistiheys oli 43 m²/asukas. Talvella 90 % kriittisyystasoa vastaava kosteuslisä oli noin 4,0 g/m³ ja kesällä noin 1,5 g/m³. Tutkittujen rakennusten asumistiheyttä vertailemalla voitiin arvioida, että rakennuksissa, joissa asumispinta-ala on pienempi kuin 30 m²/asukas, tulisi kosteuslisän mitoitusarvon olla vähintään 5,0 g/m³ talviaikana. Tämä vastaa kosteuslisän mitoitusarvoa kosteusluokassa 1 (ks. kuva 5.5).

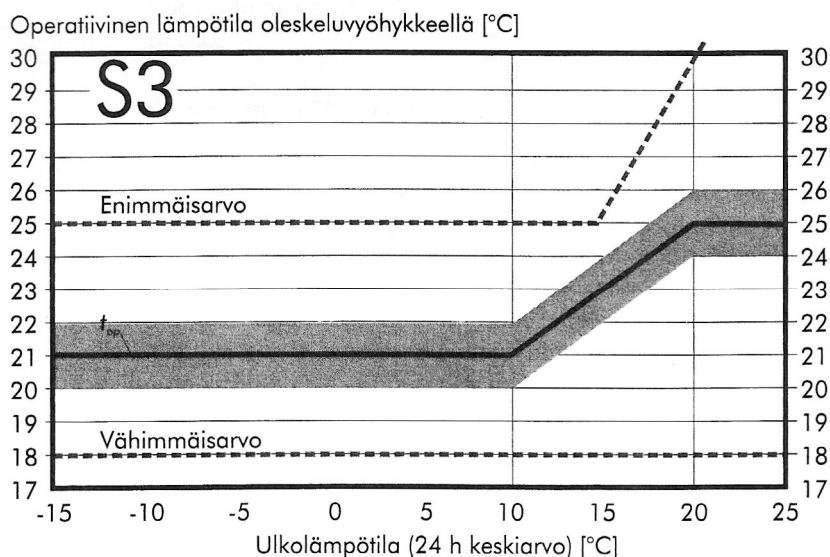
Tilastokeskuksen (2009) mukaan keskimääräinen asuinpinta-ala henkilöä kohden on 38,9 m². Omistusasunnoissa asutaan väljemmin kuin vuokra-asunnoissa. Omistusasunnossa asuvalla on käytössä keskimäärin 41 m² ja vastaavasti vuokra-asunnossa asuvalla vain 32 m² henkilöä kohden. Henkilöä kohti laskettu pinta-ala pienenee merkittävästi asutokunnan koon kasvaessa. Neljän henkilön asutokunnalla on käytössä keskimäärin 28 m², mutta kuuden henkilön asutokunnalla enää vain 21 neliometriä asukasta kohden.

Tässä tutkimuksessa käytetään kosteuslisän mitoitusarvona kuvassa 5.5 esitettyjä kosteusluokan 1 arvoja. Tämä kosteusluokka vastaa tapausta, jossa asumistiheys on noin 30 m²/henkilö, ilmanvaihto on tyydyttävä ($\geq 0,3$ l/h) ja/tai huoneistossa käytetään lisäkostutusta talvella siten, että suhteellinen kosteus on vähintään 25 % (Vinha et al. 2009).

5.2.2 Sisäilman lämpötila

Kenttätutkimuksessa (Vinha et al. 2005b; Vinha et al. 2009) sisäilman lämpötila vaihteli kesäkautena puurunkoisissa pientaloissa 18 ja 32 °C välillä ja kerrostaloissa 21 ja 29 °C välillä. Vastaavat lämpötilan vaihtelualueet olivat talviaikana pientaloissa 17-27 ja kerrostaloissa 18-27 °C välillä. Puurunkoisissa pientaloissa kesäajan lämpötilavaihtelut olivat suuria, johtuen rakennusten pienemmästä termisestä massasta verrattuna kivi- ja hirsirunkoisiin rakennuksiin.

Sisäilmastoluokitus 2008:ssa (2008) sisäilman tavoitetasot on jaettu kolmeen laatuluokkaan S1, S2 ja S3. Suomen ilmastossa sisäilmastoluokan S1 saavuttaminen edellyttää käytännössä koneellista jäähdytystä ja huonekohtaista lämpötilan säätöä. Sisäilmastoluokkaan S2 päästään vain taitavalla rakennesuunnittelulla ilman koneellista jäähdytystä. Luokassa S3 (ks. kuva 5.6) sallitaan kesäaikaan ajoittain korkea sisäilman lämpötila auringonsäteilyn ja muiden lämpökuormien vaikutuksesta. Tässä luokassa lämpöolot täyttävät rakentamismääräysten vähimmäisvaatimukset.



Kuva 5.6. Operatiivisen lämpötilan tavoitearvo laatuluokassa S3. Tummennettu alue kuvaa tavoitelämpötilan sallittua poikkeamaa. (Sisäilmastoluokitus 2008)

Kuvassa 5.6 esitetty operatiivinen lämpötila ottaa huomioon pintojen säteilylämpötilat ja se kuvaa paremmin ihmisen aistimaa lämpötilaa. Sisäolosuhteissa, joissa ilman ja pintojen lämpötilaero ei ole yli 10 °C ja ilman virtausnopeus on pieni (alle 0,2 m/s), on operatiivinen lämpötila ilman ja ympäröivien pintojen keskilämpötila (Harsia 2009). Operatiivinen lämpötila rinnastetaan usein suunnittelussa huoneen lämpötilaan. Rakennuksissa, joissa pintojen lämpötilat poikkeavat selvästi ilman lämpötilasta, rakennuksessa on suuret tai huonosti lämpöä eristävät ikkunat tai huonosti eristetty vaippa, tulee operatiivinen lämpötila määrittää sisäilman ja pintojen lämpötiloista. (Sisäilmastoluokitus 2008) Kuten kuvasta 5.6 havaitaan, sallitaan sisäilmastoluokassa S3 lämpötilan nousu kesäaikana. Kenttämittauksissa (Vinha et al. 2005b) sisäilmastoluokan S3 alueella oltiin 95 % kesäjakson ja 63 % talvijakson ajasta. Sisäilman laatuluokka S3 kuvaa näin ollen tyypillistä lämpötila-aluetta suomalaisissa puurunkoisissa asuinrakennuksissa.

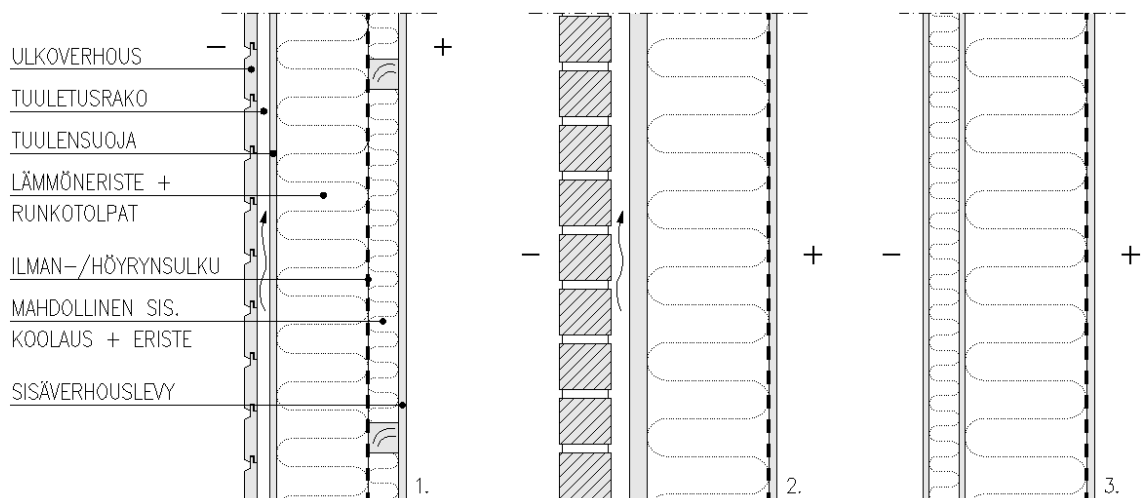
Tässä tutkimuksessa käytetään laskelmissa sisäilman lämpötilana 21 °C kaikkina vuodenaikoina. Arvo edustaa talvikauden kenttämittausten keskiarvoa (Vinha et al. 2005b; Vinha et al. 2009) ja täyttää optimiarvon sisäilmastoluokassa S3 talviaikana. Aikaisempien laskentatarkastelujen perusteella matala sisälämpötila on rakenteen kannalta kriittinen (Vinha 2007). Kenttämittaustuloksia vertailemalla voidaan havaita, että vain noin 5 % mittaustuloksista alittaa valitun lämpötilan. Valittu mitoitusarvo täyttää näin ollen 90 % kriittisyystason, jonka mukaan laskenta-arvoa mitoittavampia on enintään 10 % kokonaisotannasta. Kosteustarkasteluissa 21 °C on kriittisempi kuin sisäilmastoluokan S3 mukainen optimilämpötila, 25 °C, kesäkautena. Mitoitus on jonkin verran varmallalla puolella, mutta kuitenkin perusteltua, koska koneellisella ilmanvaihdolla varustetuissa rakennuksissa käyttäjät voivat helposti hallita huoneen lämpötilaa. Sisäilman lämpötila on usein vielä tätä matalampi rakennuksissa, joissa asukkaat oleskelevat harvoin.

5.3 Seinärakenne ja käytetyt materiaalit

Seinärakenne

Tässä tutkimuksessa tarkasteltava ulkoseinä koostui runkotolpista, niiden väliin asennettavasta lämmöneristeestä sekä ulko- ja sisäverhouksesta. Tämän tyyppinen ulkoseinä on käytetyin pien- ja rivitaloissa Suomessa. Vuonna 2011 puurunkoisen ulkoseinän osuus oli 75 % kaikista käytetyistä runkorakenteista (Rakennustutkimus 2011). Puurunkoisella ulkoseinällä saadaan muodostettua tehokas lämmöneristys kohtuullisella rakennepaksuudella.

Tutkimuksessa käytettiin ulkoeristyksen ja sisemmän seinärakenteen välissä tuuletusrakoa. Poikkeuksena oli eristerapattu rankeseinä, jossa ulkoeristyksen ei oltu erotettu sisemmästä seinärakenteesta tuuletuksen mahdollistavalla ilmaraolla. Ulkoseinän runkona käytettiin pääsääntöisesti lämmöneristeen vahvuista viilupuusta (LVL) tai sahata-varasta tehtyä puurunkoa, jonka jako oli 600 mm. Seinä oletettiin ilmatiiviiksi ja konvektion vaikutusta ei rakenteen toiminnassa otettu huomioon. Kuvassa 5.7 on esitetty tutkimuksessa käytetyt seinärakenteet.



Kuva 5.7. Tutkimuksessa käytetyt seinärakenteet: 1. puuverhottu ulkoseinä, 2. tiiliverhottu ulkoseinä ja 3. eristerapattu ulkoseinä.

Eristerapatussa ulkoseinässä oli pystyrungon/lämmöneristeen ulkopinnassa 9 mm paksu tuulensuojakipsilevy (A1, ks. Liite 2) ja sen ulkopuolella 50 mm paksu rappauseriste. Rapattava eriste on tyypillisesti kiinnitetty joko liimalaastilla ja/tai mekaanisesti eristeen läpi runkokoolaukseen. Tässä tutkimuksessa rappauseristeenä käytettiin pääasiassa kivi-villaa (D2, ks. liite 2), joka vastasi rappauseristeenä yleisesti käytetyn kivivillalevyn ominaisuuksia. Eristerapattun rankeseinän kuivumistarkasteluissa tarkasteltiin myös EPS 60 S seinäeristeen toimivuutta. Vertailurakenteena oli levyrapattu rankeseinä, joka oli varustettu kuivumisen mahdollistavalla ilmaraolla.

Ulkoerohous

Ulkoerohouksena käytettiin tässä tutkimuksessa puuta, tiiltä ja rapattua erohousta. Näistä puujulkisivu on Suomessa yleisin 72 % osuudella. Tiiliverhouksen osuus on 6 %. Puupinnat ovat suosituimpia Pohjois-Suomessa, kun taas tiilipinta valitaan Etelä-Suomessa pohjoisia alueita useammin. Ympäristöllä on vaikutusta alueellisesti julkisivumateriaalin valintaan. Maalaismaisemaan ja taajamaan valitaan puujulkisivu helpommin kuin tiiliverhous. Kivipinnat ovat suhteellisesti suosituimpia kaupunkiympäristössä. (Rakennustutkimus 2011) Eristerapatuissa rankaseinissä käytettiin seuraavia rapausjärjestelmiä:

Perinteinen paksurappaus (1)

- Jaloaasti KS 50/50/600, 2 mm
- Täyttölaasti KS 35/65/500, 10 mm
- Pohjalaasti KS 20/80/500, 13 mm

Paksurappaus (2)

- Silikonihartsipinnoite, 2 mm
- Silikonihartsimaali, 0,3 mm
- Oikaisu- ja täyttölaasti KS 25/75/500, 20 mm

Ohutrappaus (3)

- Silikonihartsipinnoite, 2 mm
- Silikonihartsimaali, 0,3 mm
- Ohutrappauslaasti S, 6 mm

Ohutrappaus (4)

- Hiertopinnoite S, 3 mm
- Ohutrappauslaasti S, 10 mm

Levyrapatussa rankaseinässä käytettiin ohutrappausta, tyyppiä (3) mukaista järjestelmää.

Laskentatarkasteluissa tiilimuurauksen värinä oli punertavan ruskea. Tumma värisävy lämpenee auringonsäteilyn vaikutuksesta enemmän kuin vaaleat sävyt. Lämmitessään tiiliverhouksesta haihtuva kosteus siirtyy diffuusiolla seinän sisempiin osiin ja lisää näin sisemmän seinäosan kosteuskuormitusta. Rapatun julkisivun väriksi valittiin tässä tutkimuksessa vaalea sävy, jota käytetään noin 40 % osuudella kaikissa rapatuissa ulkoseinissä Suomessa (Rakennustutkimus 2003). Pohjoisen puoleisissa puujulkisivutarcasteluissa käytettiin puolestaan valkoista puuverhousta. Valkoiseen julkisivupintaan imeytynyt auringonsäteilyn määrä on vain 25 % pintaan tulevasta kokonaissäteilystä (Hagantoft 2001), jolloin rakenteen ulko-osat kuivuvat auringonsäteilyn vaikutuksesta

vähemmän kuin tummempia värejä käytettäessä. Puuverhotuissa ulkoseinissä ei otettu huomioon pinnoitteiden vaikutusta kosteuden siirtymisessä. Taulukossa 5.1 on esitetty laskennassa käytetyt pintojen absorptiokertoimet α_{sol} ja emissiviteetit ε .

Taulukko 5.1. Tutkimuksessa käytetyt julkisivupintojen absorptiokertoimet (α_{sol}) ja emissiviteetit (ε). (Hagentoft 2001; Wufi Pro 5.1)

Julkisivu	α_{sol} [-]	ε [-]	Pinta/värisävy
Tiiliverhous	0,67	0,90	Poltettu savitiili, punainen
Rappaus	0,40	0,90	Vaalea rappaus
Puuverhous	0,25	0,85	Valkoinen maali

Julkisivupinnasta ja -väristä riippuvia pintojen absorptiokertoimia ja emissiviteettejä on esitetty enemmän liitteessä 1.

Tuuletusrako

Tuuletusraon paksuudeksi valittiin puu- ja levyverhotuissa julkisivuissa 20 mm ja tiili-julkisivuissa 30 mm, joka on Suomen rakennusmääräyskokoelman suosittelema minimiarvo tiilimuuratuille julkisivuille (RakMk C2 1998). Tuuletusraon pääasiallisena tehtävänä on estää sadeveden tunkeutumista sisempään seinäosaan ja sallia lisäkosteuden vapaa poistuminen seinärakenteesta. Ilmanvaihtuvuus tuuletusraossa määritettiin kappaleen 2.5 mukaisesti. Taivaan efektiivisen lämpötilan vaikutus ilmanvaihtuvuudessa otettiin huomioon kevytrakenteisissa julkisivuverhouksissa, joiden lämmönvastus oli pieni (puu- ja levyverhoukset).

Tuulensuoja

Tuulensuojana käytettiin laskennassa levyä tai kalvoa, jonka vesihöyrynvastus Z_v oli $\leq 9 \times 10^3$ s/m.

Lämmöneriste

Lämmöneriste oli laskentamallissa avohuokoista ja vesihöyryä läpäisevämpää kuin tuulensuoja. Tästä johtuen eristeen ulkopinta oli kriittinen homehtumiselle ja kosteuden kondensoitumiselle. Lämmöneristeinä tutkittiin hygroskooppista ja ei-hygroskooppista eristettä. Homeenestoaineiden vaikutusta homehtumisriskiin ei laskennallisissa analyyseissä otettu huomioon.

Ilman-/höyrinsulku

Tiiviystvaatumuksen takia kaikissa seinärakenteissa oli ilmasulku rakenteen sisäpinnalla. Korkean vesihöyrynvastuksen omaava ilmansulku toimi rakenteessa myös höyrinsulkuna. Ilmansulkuna käytettiin tutkituissa rakenteissa pääsääntöisesti höyrinsulkumuovia (C11, ks. liite 2), joka oli sijoitettu sisäverhouslevyn taakse.

Höyrinsulun sijaintia tutkittiin myös 50 mm syvyydessä sisäpuolisesta seinäpinnasta (ks. kappale 6.5). Tässä rakenteessa höyrinsulun sisäpinta oli homehtumisen ja kondenssin kannalta riskialttiimpi, kuin rakenteessa, jossa höyrinsulku sijaitsi sisäverhouslevyn takana.

Sisäverhouslevy

Sisäpuolisena verhouslevynä käytettiin kaikissa laskentatarkasteluissa pinnoittamatonta 13 mm paksua kipsikartonkilevyä (C1, ks. liite 2). Sisäpuolisten pinnoitteiden ja tapettien vaikutusta kosteuden ja lämmön siirtymiseen ei otettu huomioon.

Materiaalit

Suurin osa laskennassa käytetyistä materiaaliominaisuuksista oli määritetty aikaisemmin TTY:llä tehdyissä laboratoriokokeissa (Mikkilä 2001). Nämä materiaaliarvot on esitetty liitteessä 2. Materiaalien hygroskooppisen kosteuspitoisuuden maksimiarvona käytettiin 97 % RH:ta vastaavaa kosteuspitoisuutta. Hygroskooppisen kosteuspitoisuuden ylittävä kosteus otettiin huomioon kondenssitarkasteluissa nestemäiseksi tiivistyvänä kosteutena materiaalien raja-pinnoissa. Rappauslaastien ja pinnoitteiden materiaaliarvot on esitetty taulukossa 5.2 ja tasapainokosteuskäyrät liitteessä 3.

Kosteus- ja lämpöteknisissä tarkasteluissa materiaaleille käytettiin kuivan olosuhteen diffuusiovastuskerrointa μ (0/50 % RH) ja kapillarityetikertoimen A_w avulla, kaavalla 2.51, määritettyjä nestemäisen veden kosteusdiffusiviteetin D_{ws} arvoja. Kosteuden uudelleen jakautumisen D_{ww} -arvo oli laskennassa kymmenesosa kapillaari-imun arvosta. Nestemäisen veden kosteusdiffusiviteetin kaava 2.51 perustuu epäorgaanisilla materiaaleilla (kivimateriaaleilla) tehtyihin kokeisiin (Künzel 1995) ja aiemmassa tutkimuksessa havaittiin, että se ei näytä olevan sellaisenaan suoraan pätevä orgaanisilla puumateriaaleilla (Vinha 2007). Tämän takia vanerille käytettiin laskennassa muuttuvaa, suhteellisesta kosteudesta riippuvaa vesihöyrynvastusta, jolloin kapillarityetikertoimen avulla määritetty materiaalin kosteusdiffusiviteetti (D_{ws}) voitiin jättää ottamatta huomioon. Näin voitiin menetellä, koska kuppikokeella mitatut materiaalin diffuusiovastuskertoimet pitivät sisällään myös veden kapillaarisen siirtymisen (ks. luku 2.4.1) ja vanerin

ollessa tuulensuojana vesihöyryn diffuusio ja kapillaarinen kosteuden siirtyminen tapahtuvat yleensä samaan suuntaan samalla tavoin kuin kuppikokeessa.

Puukuitueristeen yhteydessä ei otettu huomioon niiden sisältämien homeenestoaineiden vaikutusta eristettä ympäröivien materiaalien homehtumiseen, koska tästä ei ollut riittävästi tutkimustietoa saatavilla. Kokemusperäisenä tietona on kuitenkin, että puukuitueristeen sisältämät homeenestoaineet estävät/hidastavat home- ja lahosienten kasvua myös siihen kosketuksessa olevissa rakenteissa ja muodostavat näin ylimääräisen homesuojan rakenteessa. Toisaalta lämmöneristeen kontakti ympäröiviin materiaaleihin voi olla puutteellinen ja rajapinnan lähellä voi esiintyä myös erilaisia halkeamia ja koloja, joissa homeen kasvu on mahdollista.

Taulukko 5.2. Rappauslaastien ja pinnoitteiden materiaaliarvot. ρ on materiaalin kuivatiheys, n huokoisuus, c_p ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa, μ diffuusiovastuskerroin, λ lämmönjohtavuus ja A_w materiaalin kapillariteettikerroin. (Manelius 2011, Alakulju 2011)

Materiaali	ρ [kg/m ³]	n [m ³ /m ³]	c_p [J/(kgK)]	μ [-]	λ [W/(mK)]	A_w [kg/(m ² h ^{0.5})]
Jalolaasti KS 50/50/600	1600	0,24	850	12	1	2
Hiertopinnoite S	2000	0,3	850	17	1,2	0,3
Täyttölaasti KS 35/65/500	1800	0,24	850	13	1	2
Pohjalaasti KS 20/80/500	1800	0,24	850	15	1	2
Oikaisu- ja täyttölaasti KS 25/75/500	1800	0,24	850	15	1	0,3
Ohutrappauslaasti S	2000	0,3	850	20	1,2	0,3
Silikonihartsimaali	2000	0,44	1000	46	0,7	0,15
Silikonihartsipinnoite	2000	0,44	1000	90	0,7	0,2

Silikonihartsimaalin tasapainokosteuskäyrä on generoitu kapillaarista kyllästyskosteuspitoisuutta (w_{cap}) ja 80 % suhteellista kosteutta vastaavista tasapainokosteuksien arvoista. EPS-eristeiden tasapainokosteuskäyränä käytettiin liitteen 3 mukaista funktiota ja taulukossa 5.3 mainittuja materiaaliarvoja.

Taulukko 5.3. Rapattavien EPS-eristeiden ja rappauksen alustana käytettävän rakennuslevyn ja savitiilimuurauksen materiaaliarvot. ρ on materiaalin kuivatiheys, n huokoisuus, c_p ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa, μ diffuusiovastuskerroin, λ lämmönjohtavuus ja A_w materiaalin kapillariteettikerroin. (Kilpeläinen 2011; Tollander 2011; Romu 2011)

Materiaali	ρ [kg/m ³]	n [m ³ /m ³]	c_p [J/(kgK)]	μ [-]	λ [W/(mK)]	A_w [kg/(m ² h ^{0.5})]
EPS 60 S seinä	15	0,4	1300	30	0,039	0
EPS harmaa seinä	17	0,4	1300	33	0,031	0
Sementtipohjainen rappauslevy	1150	0,67	850	66	0,36	-
Savitiilimuuraus	1430	0,3	900	12	0,45	12

Levyrapatussa rankaseinässä rappauksen alustana käytettiin sementtipohjaista rakennuslevyä, joka sisälsi noin 10 % sementtiä, muun osan ollessa kevytsoraa. Levyn tasapainokosteuskäyrä, huokoisuus ja kapillaarisuus arvioitiin kevytsoran ja kevytsorabetonin materiaaliarvoista (Wufi 5.1 Pro; Hagentoft 2001). Laskennassa käytetyt levyn materiaaliarvot on esitetty taulukoissa 5.3 ja 5.4 ja tasapainokosteuskäyrä liitteessä 3.

Taulukko 5.4. Rappauksen alustana käytetyn rakennuslevyn kapillaarisuusarvot. w on materiaalin kosteuspitoisuus, D_{ws} nestemäisen veden kosteusdiffusiviteetti ja D_{ww} kosteuden uudelleen jakaantumisen diffusiviteetti.

Materiaali	w [kg/m ³]	D_{ws} [m ² /s]	D_{ww} [m ² /s]
Sementtipohjainen rappauslevy	17	4,0E-11	4,0E-11
	97	6,4E-09	1,7E-07

Tiiliverhoukseen valittiin savitiili, joka on yleisin Suomessa käytetty tiilityyppi julkisivumuurauksissa (Romu 2011). Tiilen tiheytenä käytettiin MRT285x85x85-tyyppisen julkisivutiilen erään koetuloserän keskiarvoa (Romu 2011). Laskennassa käytetty savitiilimuurauksen tiheys ja lämmönjohtavuus oli laastin ja tiilien pinta-aloilla sekä materiaaliarvoilla painotettu keskiarvo. Tiilimuurauksen vesihöyrynläpäisevyys ja lämmönjohtavuus perustuvat standardiin EN 1745 (2002). Laskennassa käytetyt materiaalin perusarvot on esitetty taulukossa 5.3.

Muurauksen huokoisuutena käytettiin TKK:n talonrakennustekniikan laboratoriossa määritettyjen arvojen yläraja-arvoa (Lehtinen & Viljanen 1994). TKK:ssa tehtyjen tiilien ja laastien kapillaarisuuskokeiden perusteella päädyttiin valitsemaan WUFI-ohjelmasta, MASEA:n tietokannasta tiilijulkisivulle taulukon 5.5 mukaiset kapillaarisuusarvot.

Taulukko 5.5. Savitiilimuurauksen kapillaarisuusarvot. w on materiaalin kosteuspitoisuus, D_{ws} nestemäisen veden kosteusdiffusiviteetti ja D_{ww} kosteuden uudelleen jakaantumisen diffusiviteetti. (Wufi 5.1 Pro)

Materiaali	w [kg/m ³]	D_{ws} [m ² /s]	D_{ww} [m ² /s]
Savitiili	13	3,1E-09	2,0E-10
	262	2,2E-06	3,0E-07

Savitiilimuuraukselle käytettiin vallitsevasta lämpötilasta ja kosteudesta riippuvaa lämmönjohtavuuden arvoa taulukoiden 5.6 ja 5.7 mukaisesti

Taulukko 5.6. Savitiilimuurauksen lämmönjohtavuuden riippuvuus kosteuspitoisuudesta. w on materiaalin kosteuspitoisuus ja λ lämmönjohtavuus. (Wufi 5.1 Pro)

Materiaali	w [kg/m ³]	λ [W/(mK)]
Savitiili	0	0,450
	300	1,205

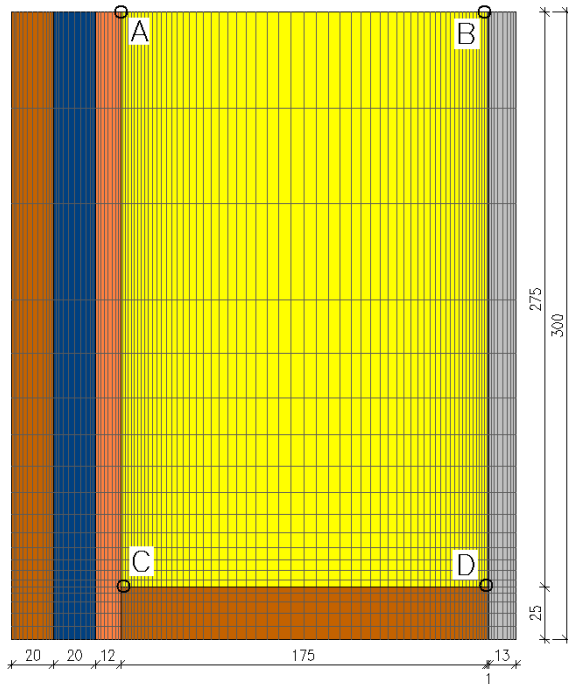
Taulukko 5.7. Savitiilimuurauksen lämmönjohtavuuden riippuvuus lämpötilasta. θ on materiaalin lämpötila ja λ lämmönjohtavuus. (Wufi 5.1 Pro)

Materiaali	T [°C]	λ [W/(mK)]
Savitiili	-20	0,444
	80	0,464

Tiilimuurauksen tasapainokosteuskäyränä käytettiin liitteen 3 mukaista funktiota.

5.4 Laskentamalli

Rakenteiden kosteus- ja lämpötekninen laskenta suoritettiin elementtimenetelmällä, WUFI-2D ja 1D-ohjelmaa käyttämällä. Rakenteen mallinnuksessa käytettiin tiheätä elementtiverkkoa, joka koostui nelisivuisista tasoelementeistä. Elementit olivat pienimmillään materiaalien rajapinnoissa, joissa kosteus- ja lämpötilamuutokset olivat suurimpia. Rajapinnoissa pienimmät elementit olivat noin 2 mm leveitä. Elementtimallissa käytettiin rakenteen symmetriaa hyväksi, jolloin laskentamalli oli 300 mm leveä. Tämä vastasi 600 mm runkotalppajaolla toteutettua ulkoseinärakennetta. Runkotalppana käytettiin laskennassa pääsääntöisesti läpimenevää viilupuu- tai sahatavarakennetta. Viilupuu oletettiin olevan samaa homeherkkyysluokkaa, kuin sahattu mänty, koska tästä materiaalista ei ollut tarkempia tutkimuksia. Peruseriaate laskennassa käytetystä elementtimallista on esitetty kuvassa 5.8.



Kuva 5.8. Peruseriaate laskennassa käytetystä elementtimallista. Kuvassa on esitetty laskennassa käytetyt tarkastelupisteet mineraalivillan ulko- ja sisäpinnassa (A, B) sekä puurungon ulko- ja sisäpinnassa (C, D).

Materiaalin kostumis- ja kuivumiskäyrä annettiin keskimääräisenä funktiota desorptio- ja adsorptiokäyristä. Jos desorptiokäyrää ei ollut saatavilla, materiaalin tasapainokosteuskäyränä käytettiin adsorptiokäyrää. Ohuet kalvot oli mallinnettu 1 mm paksuisiksi ja niiden diffuusiiovastuskertoimet (μ) oli määritetty materiaalien vesihöyrynvastuksien Z_v -arvoista siten, että ne vastasivat 1 mm paksuisina kerroksina todellisia vastusarvoja. Laskennassa käytettiin laboratoriossa mitattuja lämmönjohtavuuden λ_{10} -arvoja. Nämä arvot ovat pienempiä kuin suunnittelussa yleisesti käytetyt lämmönjohtavuusarvot (λ_n tai λ_U), jotka sisältävät asennuksen ja materiaaliarvojen hajonnan vaikutuksen.

Luotettavimpien laskentatuloksien saamiseksi pienen kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden omaavilla materiaaleilla kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus korvattiin todellista korkeammalla arvolla. Tällä menettelyllä välttyttiin laskennassa haitallisilta konvergointivirheiltä. Kapillaarisena kyllästyskosteuspitoisuutena käytettiin lasivillassa (D1, ks. liite 2) ja EPS-eristeessä arvoa 45 kg/m^3 . WUFI-2D:ssä käytettiin pysty- ja vaakasuunnassa samoja materiaaliominaisuuksia. Männyn materiaaliarvoina käytettiin kohtisuoraan syitä vastaan massiivipuulevystä mitattuja arvoja (Mikkilä 2001). Puurakenteessa merkittävin kosteuden siirtymismuoto on kapillaarinen veden siirtyminen. Kapillaari-imu ja diffuusiolla siirtyvä kosteusvirta riippuvat puuaineksen kosteudenläpäisevyydestä, joka on suurempi puun syiden suunnassa (Koponen 1991). Kosteuden siirtyminen tapahtuu seinärakenteessa kuitenkin pääasiassa kohtisuoraan syyn suuntaa vasten, jolloin syysuunnan materiaaliarvojen eroavaisuudella ei ole tätä tutkimusta koskevassa laskennassa suurta merkitystä.

6 LASKENTATARKASTELUJEN TULOKSET

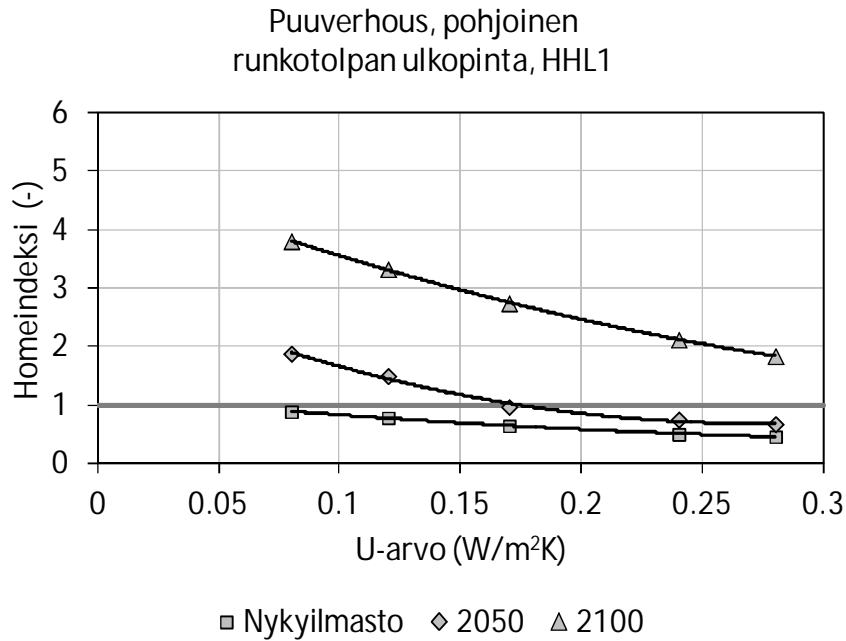
Lämmöneristeen lämpimälle puolelle asetettu höyrynsulku estää sisäilman kosteuden siirtymisen diffuusiolla vaipan kylmiin osiin, pienentäen samalla seinärakenteen ulko-osan homehtumisriskiä. Höyrynsulkua käytettäessä tuulensuojan sisäpinnan homehtumiseen vaikuttavat ulkoilman olosuhteet, rakenteen läpi tapahtuvat lämpövuodot, käytetyn tuulensuojan lämmöneristävyys ja vesihöyrynvastus. Rakenteen lämmöneristykseen lisääminen viilentää vaipan ulko-osia, jolloin homeen kasvu ja kosteuden kondensoitumisriski niissä lisääntyvät. Lämmöneristykseen lisäämisen vaikutusta tutkittiin ulkoseinillä, joissa sisäverhouslevyn takana käytettiin tiivistä höyrynsulkumuovia (kappaleet 6.1-6.4) ja seinärakenteilla, joissa höyrynsulku oli upotettu 50 mm syvyydelle rakenteen sisäpinnasta (kappale 6.5).

Puukuitueristeen hygroskooppisuudella ei ollut juuri merkitystä eristeen homehtumisriskiin. Homeindeksit pysyivät rakenteessa samalla tasolla lämmöneristeen kosteuskapasiteetista riippumatta. Tämän takia rakenteiden toimintaa tutkittiin pääsääntöisesti käyttämällä eristeenä lasivillaeristettä (D1, ks. liite 2).

Kuvissa esitetyt homeindeksit ovat mitoitusvuoden aikana esiintyneitä maksimiarvoja (M_{\max}).

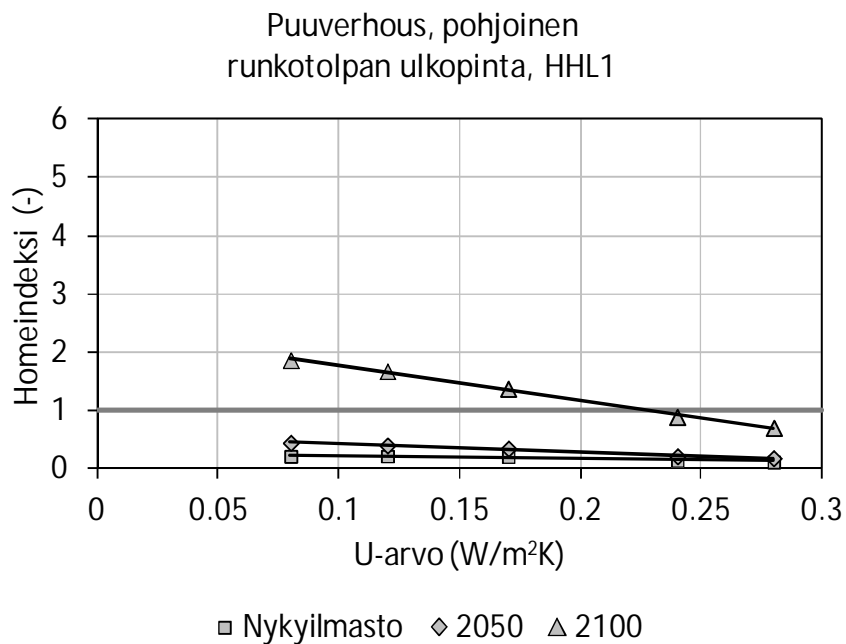
6.1 Puu- ja levyverhotut puurankaseinät

Muovipohjaisilla tuulensuojakalvoilla ei ole lämmöneristävää vaikutusta, jolloin puurungon ulkopinta seuraa suhteellisen tarkasti ulkoilman lämpötilaa. Homehtumisherkempänä materiaalina runkotolpan ulkopintaan muodostuu ensimmäisenä homeen kannalta kriittisemmät olosuhteet. Tuulensuojakalvon kriittisyys rakenteessa kasvaa entisestään tulevaisuudessa lisääntyvien sateiden ja korkeamman ulkoilman kosteuden seurauksena. Kuten kuvasta 6.1 voidaan havaita, homeen kasvua esiintyy diffuusioavoimella tuulensuojakalvolla (B2, ks. liite 2) jo vuoden 2050 ilmastossa. Diffuusioavoin tuulensuojakalvo on vesihöyryä voimakkaasti läpäisevä, jolloin ulkoilman korkea suhteellinen kosteus vaikuttaa suoraan puurungon ulkopinnan olosuhteisiin. Diffuusiotiiviimmän tuulensuojakalvon (B1, ks. liite 2) vesihöyrynvastus estää osittain ulkoilman kosteuden liikettä rakenteeseen, jolloin homeindeksi pysyy rakenteen ulkopinnassa alhaisempana (ks. liite 4, kuva 2) kuin kalvolla B2.



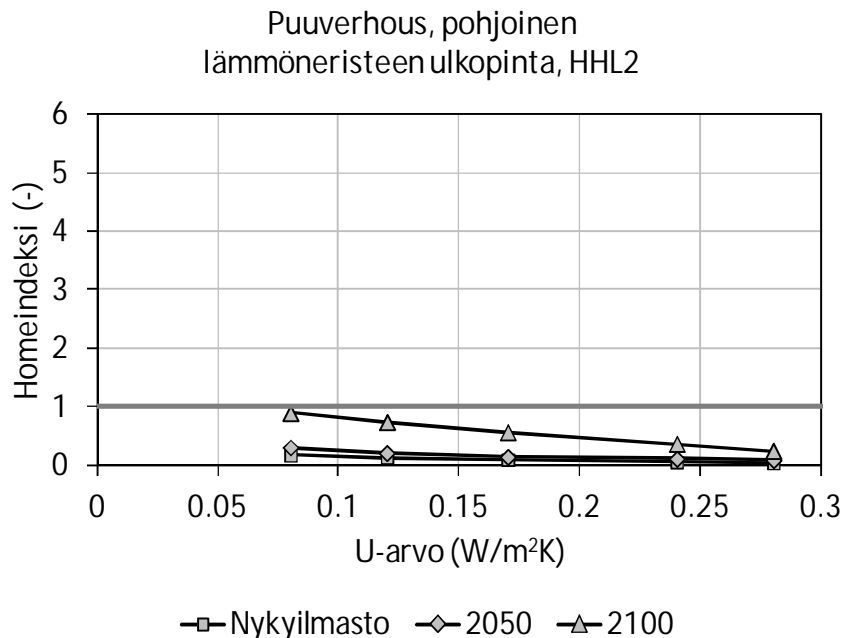
Kuva 6.1. Homeen kasvu runkotolpan ulkopinnassa puuverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään diffuusioavointa tuulensuojakalvoa (B2).

Kun tuulensuoja vaihdetaan tuulensuojakipsilevyksi, pienenee runkotolpan ulkopinnan homeindeksi jonkin verran, mutta ei poistu edelleenkään vuoden 2100 ilmastossa (ks. kuva 6.2). Mikroskoopilla havaittavaa homeenkasvua esiintyy myös tuulensuojakipsilevyn sisäpinnalla kyseisessä ilmastossa (ks. liite 4, kuva 3).



Kuva 6.2. Homeen kasvu runkotolpan ulkopinnassa puuverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään 9 mm paksua tuulensuojakipsilevyä (A1).

Käytettäessä tuulensuojana 12 mm paksua puukuitulevyä, ei rakenteen ulko-osissa esiinny homeen kasvua. Huokoista puukuitulevyä käytettäessä kriittisemmät olosuhteet muodostuvat mineraalivillan ulkopintaan, tuulensuojalevyn sisäpintaan (ks. liite 4, kuva 6 ja kuva 6.3), jossa huokosilman suhteellinen kosteus nousee korkeammaksi kuin puurungon ulkopinnassa.



Kuva 6.3. Homeen kasvu lämmöneristeen ulkopinnassa puuverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään 12 mm paksua puukuitulevyä (A13).

Kuvista 6.1-6.3 voidaan havaita, että tuulensuojan lämmönvastuksen parantamisella on merkittävä vaikutus ulkoseinärakenteen kosteustekniseen toimintaan. Lämpöä eristävä tuulensuoja nostaa lämpötilaa tuulensuojan sisäpinnassa, jolloin ilman huokosilman suhteellinen kosteus laskee materiaalien rajapinnassa ja olosuhteet muuttuvat homeille epäsuotuisiksi. Rakenteissa, joissa käytetään rungon ulkopinnassa ristikoolausta, nousee rungon ulkopinnan homeindeksi korkeammalle kuin lämmöneristeen vahvuista seinärunkoa käytettäessä (vrt. liite 4, kuva 4 ja 15). Ristikoolausta käytettäessä puurungon kylmäsilta-vaikutus poistuu, jolloin koolauksen ulkopinnan olosuhteet ovat lähempänä ulkoilman olosuhteita. Ristikoolatusta rakenteessa tulee käyttää tuulensuojaa, jonka lämmönvastus on vähintään 0,2 m²K/W, jotta hometta ei rakenteen ulko-osissa esiintyisi vuoden 2100-ilmastossa.

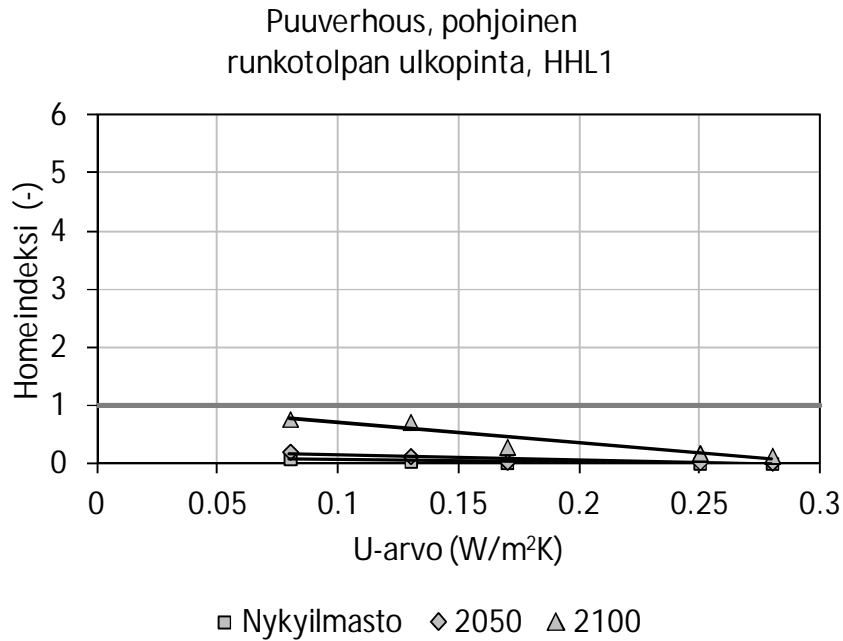
Levyjäykisteenä toimiva 9 mm:n havuvaneri on tuulensuojana kosteusteknisesti toimiva, kun sisäpinnassa käytetään höyrynsulkumuovia. Havuvanerin vesihöyrynläpäisevyys riippuu vallitsevasta kosteuspitoisuudesta (A11, ks. liite 2): materiaalin kosteuspitoisuuden kasvaessa myös sen vesihöyrynläpäisevyys kasvaa. Vanerin (A11) vesihöyrynläpäisevyys on kosteissa olosuhteissa (> 70 % RH) 2-11 kertaa suurempi kuin

kuivissa olosuhteissa (0-55 % RH). Tämä johtuu suurelta osin kapillaarisen kosteuden siirron lisääntymisestä kosteuspitoisuuden kasvaessa, mutta kuppikokeessa, jolla vesihöyrynläpäisevyys määritetään, eri kosteuden siirtomuotoja ei voida erottaa toisistaan.

Vesihöyrynläpäisevyyden kasvu parantaa vanerin toimivuutta tuulensuojana. Vanerin kosteuspitoisuuteen vaikuttavat lisäksi materiaalin hygroskooppiset ja kapillaariset ominaisuudet. Aikaisemmassa tutkimuksessa (Ojanen et al. 1997) on myös todettu, että havuvaneri-tuulensuoja on höyrynsulullisissa rakenteissa diffuusion kannalta toimiva, kun taas höyrynsuluttomissa seinärakenteissa vaaditaan vanerin ulkopintaan lisälämmöneristys.

9 mm vanerilevyn toimivuutta tuulensuojana on tutkittu aiemmin TTY:llä laboratorio-kokeissa (Vinha & Käkelä 1999). Eristeenä käytettiin tutkimuksissa puhallettavaa puukuitueristettä (paksuus 145 mm) ja rakenteen sisäpinnassa bitumipaperia ja kahden levyn yhdistelmää: havuvaneria ja kipsilevyä. Sisäilman olosuhteet olivat kokeen aikana +20 °C ja kosteus sisäilmassa vastasi 50 % RH:ta. Ulkoilman olosuhteiksi oli valittu talviolosuhteet (-10 °C ja 90 % RH), jona aikana höyrynsulun tarve seinärakenteessa on suurin. 27 vrk kokeen aikana tuulensuojalevyn (9 mm havuvaneri) taakse ei kondensoitunut vettä ja tuulensuojalevyn kosteuspitoisuus oli kokeen lopussa alhainen (noin 12 paino-%).

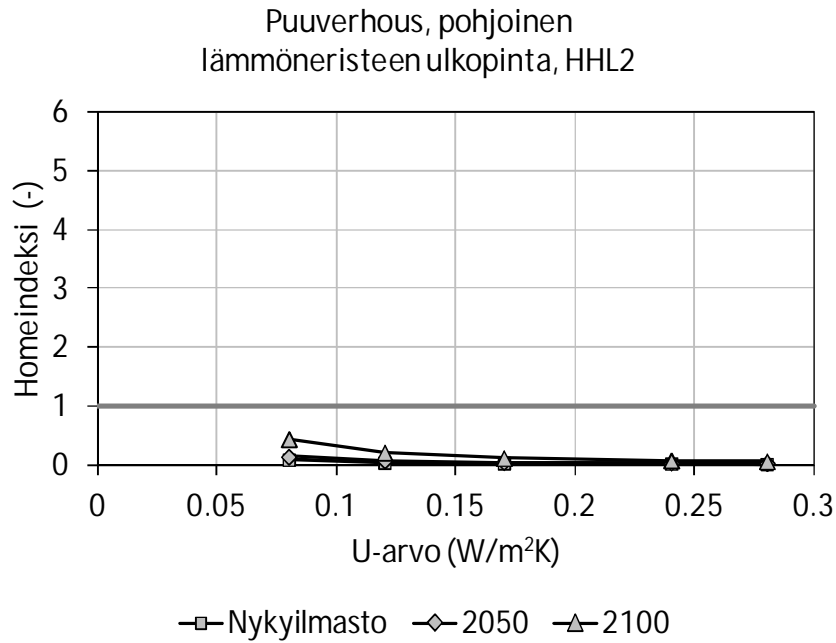
Kuvassa 6.4 on esitetty runkotolpan ulkopinnan homeindeksi käytettäessä tuulensuojana 9 mm paksua havuvaneria. Kuvasta voidaan havaita, että homeindeksi pysyy runkorakenteen ulkopinnassa alle yhden kaikilla U-arvotasoilla myös tulevaisuuden ilmastoissa. Sisäpuolisen höyrynsulun tulee kuitenkin olla tiivis, jotta sisäilmasta ei pääse virtaamaan haitallisesti kosteutta konvektiolla rakenteen ulko-osiin. Kosteuden riskitekijät korostuvat erityisesti silloin, kun ilman läpivirtaus keskittyy paikallisiin vuotokohtiin. Konvektiolla vaipan vuotokohdista virtaavat kosteusmäärät ovat huomattavasti suurempia kuin pelkässä diffuusiovirtauksessa. Rakenteen tuulensuojana ei tulisi käyttää paksumpaa kuin 9 mm havuvaneria, koska materiaalin kosteuden sitomiskyky kasvaa paksuuden kasvaessa ja lisääntyvä kosteus mahdollistaa homeen kasvun materiaalissa (Ojanen et al. 1997).



Kuva 6.4. Homeen kasvu runkotolpan ulkopinnassa puuverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään 9 mm paksua havuvaneria (A11).

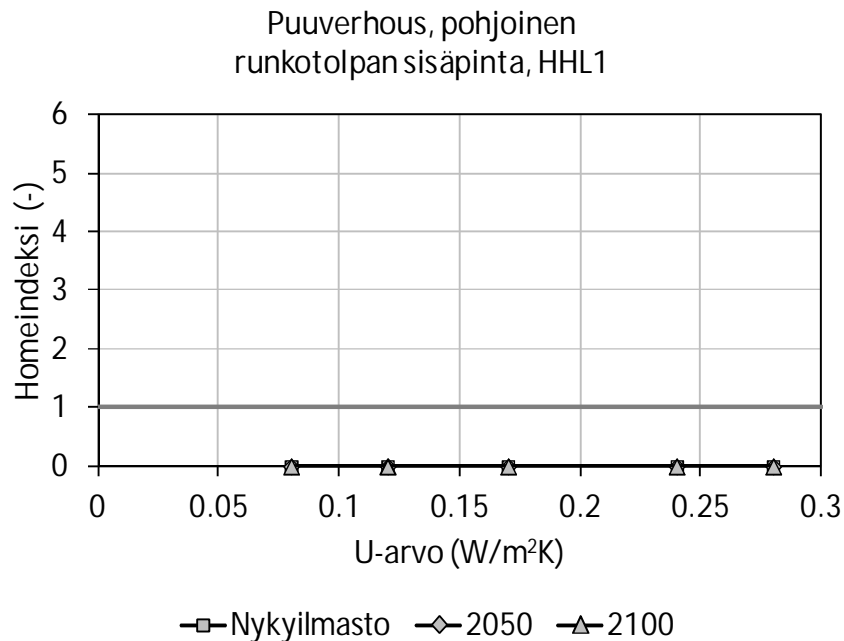
Läpäisevimmissä ulkoseinissä, jossa käytetään havuvaneria tuulensuojana, voidaan rakenteen toimivuutta parantaa ulkopuolisen lisäeristyksen avulla (ks. liite 4, kuvat 11 ja 12). Lisäeristys havuvanerituulensuojan ulkopinnalla parantaa rakenteen kuivumisnopeutta ja antaa rakenteelle lisävarmuutta ylimääräisiä kosteuskuormia vastaan. Riittävä lämmöneristys ulkopinnassa on noin 30 mm:n mineraalivilla. Paksummilla lämmöneristeillä ei saavuteta olennaisesti parempaa kuivumiskykyä.

Homeherkempien tuulensuojien käyttö on vuoden 2100 ilmastossa mahdollista jäykistystarkoituksessa, jos niiden ulkopuolelle sijoitetaan erillinen lämmöneristys. Tällöin esimerkiksi levyjäykistysnä yleisesti käytetty kipsikartonkilevy toimii kosteusteknisesti oikein, eikä homeen kasvua rakenteen ulko-osissa esiinny (ks. kuva 6.5). Lisäeristys ei ole kuitenkaan vielä tarpeellinen vuoden 2050 ilmastossa.



Kuva 6.5. Homeen kasvu lämmöneristeen ulkopinnassa puuverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään 9 mm paksua tuulensuojakipsilevyä ja 30 mm paksua mineraalivillalevyä (A1+A3).

Kuvassa 6.6 on esitetty rakenteen sisäpinnan homeeriski käytettäessä ulkoseinässä tuulensuojana huokoista puukuitulevyä. Höyrynsulku sijaitsee rakenteessa sisäverhouslevyn takana. Kuvasta nähdään, että homeindeksi pysyy vakituudessa asumiskäytössä olevissa rakennuksissa runkotolpan sisäpinnassa alle yhden ja homeen kasvun riskiä ei esiinny.

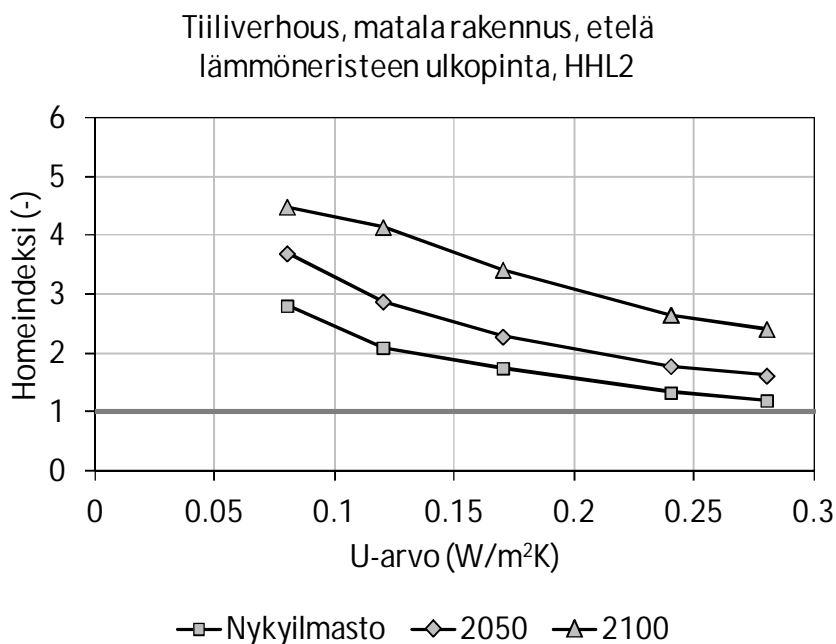


Kuva 6.6. Homeen kasvu runkotolpan sisäpinnassa puuverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään 12 mm paksua puukuitulevyä (A13).

Kosteuden siirtyminen diffuusiolla rakenteen sisäosiin on tulevaisuuden ilmastoissakin puu- ja levyverhotuissa rakenteissa niin pientä, että höyrünsulun ulkopintaan ei muodostu homeelle otollisia olosuhteita. Sama ilmiö on havaittavissa myös ulkoseinissä, joissa tuulensuojana käytetään kahden levyn yhdistelmää (ks. kuva 16, liite 4). Näin ollen muovisen höyrünsulun käyttö Suomen ilmastossa ei ole kriittinen, eikä puuverhotuissa rakenteissa edellytetä matalampaa vesihöyrynvastusta.

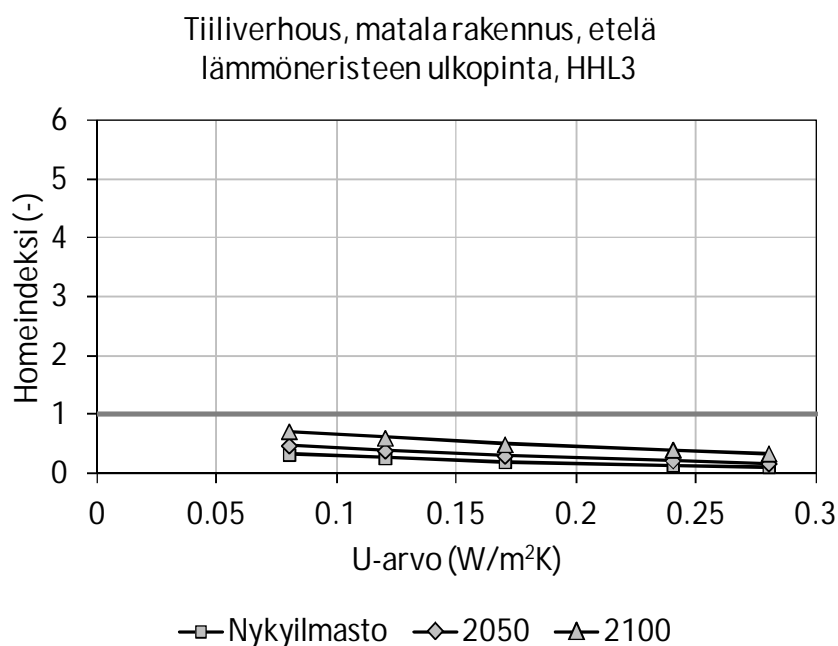
6.2 Tiiliverhottu rankaseinä

Tiilijulkisivu kastuu tehokkaasti viistosateen aikana. Sateella muuraukseen imeytynyt kosteus siirtyy auringonsäteilyn vaikutuksesta haihtumalla rakenteen takana olevaan tuuletusrakoon nostaten samalla raossa vallitsevan ilman suhteellista kosteutta. Käytettäessä verhomuurauksena normaalireikätiiltä modulireikätiilen asemesta, on kuorimuurauksen kuivuminen hitaampaa. Tämä pitempiaikainen kosteusrasitus näyttäisi laskelmien mukaisesti lisäävän sateelle alttiilla alueilla seinärakenteen homealttiutta. Molemmilla yleisesti käytetyillä julkisivutiililyypeillä, normaalireikätiilellä (NRT 130) ja modulireikätiilellä (MRT 85), muodostuu tiilirakenteen taakse olevaan tuuletusrakoon sateisena kesänä homeelle otolliset olosuhteet. Käytettäessä tiiliverhotussa rakenteessa tuulensuojana tuulensuojakalvoa (ks. liite 5, kuvat 1-4), tuulensuojakipsilevyä (ks. liite 5, kuvat 5 ja 6) tai huokoista puukuitulevyä (ks. kuva 6.7 ja liite 5, kuva 8), esiintyy tuulensuojan sisäpinnassa homeen kasvua jo nykyilmastossa sekä matalassa ($h \leq 10$ m) että korkeassa rakennuksessa ($h \leq 20$ m).



Kuva 6.7. Homeen kasvu lämmöneristeen ulkopinnassa matalassa tiiliverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään 25 mm paksua puukuitulevyä (A2).

Kuvista (ks. liite 5, 5-8) voidaan havaita, että kun tuulensuoja muutetaan paremmin lämpöä eristävämmäksi, mutta saman homeutumisherkkyyssluokan tuulensuojalevyksi, vähenee homeutumiseriski, mutta vaikutus on selvästi vähäisempi, kuin muutettaessa rakenne vähemmän homeutumisherkkäksi. Tiiliverhotussa rankaseinässä toimii parhaiten tuulensuoja, joka on hyvin lämpöä eristävä ja vähemmän homeutumiselle herkkä. Käytettäessä tuulensuojana mineraalivillalevyä, ei lämmöneristeen ulkopinnassa esiinny homeen kasvua matalassa tiiliverhotussa rakennuksessa (ks. kuva 6.8). Korkeassa rakennuksessa homeen kasvua kuitenkin esiintyy eristeen ulkopinnassa vuoden 2100-ilmastossa (ks. liite 5, kuva 10).

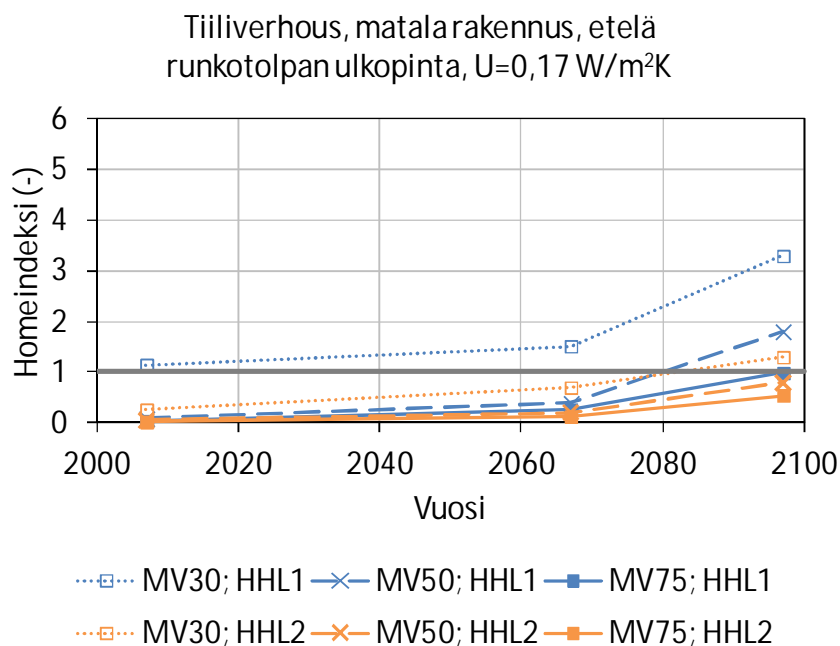


Kuva 6.8 Homeen kasvu lämmöneristeen ulkopinnassa matalassa tiiliverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään 30 mm paksua mineraalivillalevyä (A3).

Homeen kasvun kannalta mitoittavat olosuhteet ovat tiiliverhotussa rankaseinässä runkotolpan ulkopinnassa, joka on homeutumiselle herkempi kuin mineraalivillan ulkopinta. Matalassa tiiliverhotussa rakennuksessa homeen kasvu saadaan eliminoitua, kun tuulensuojana käytetään hyvin lämpöä eristävästä tuulensuojasta ja/tai runkotolppa vaihdetaan sahatusta männystä (HHL1) vähemmän homeutumisherkkäksi materiaaliksi, esimerkiksi höylätyksi kuuseksi (HHL2).

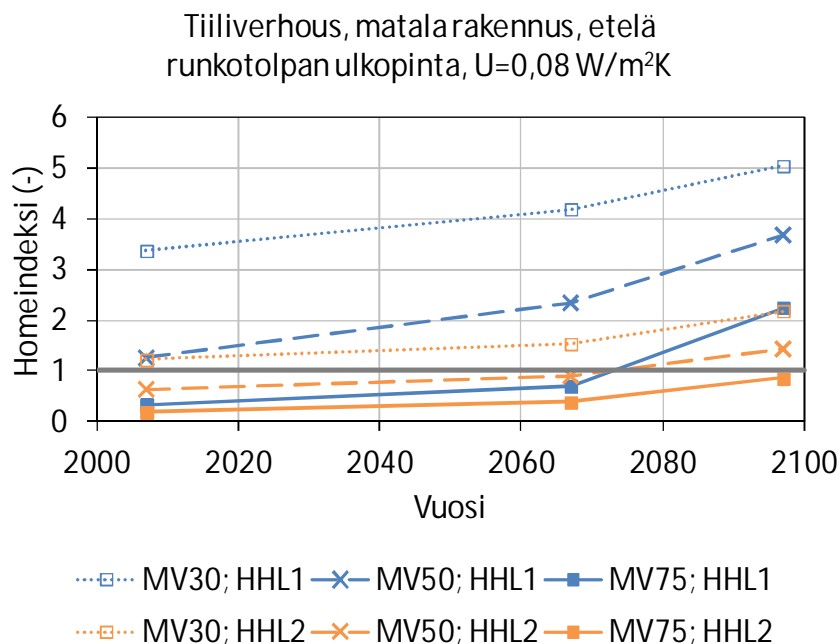
Kuvassa 6.9 on esitetty nykymääräyksen (RakMk C3 2010) mukaisen ulkoseinän, jonka U-arvo on 0,17 W/(m²K) homeutumiseriski, kun tuulensuojana käytetään mineraalivillalevyä. Kuvassa on varioitu mineraalivillalevyn lämmöneristävyys (paksuuden) ja runkotolpan homeutumisherkkyyssluokan vaikutusta runkotolpan ulkopinnan homeutumisherkkyyteen. Kuvasta 6.9 voidaan havaita, että jos runkotolppana käytetään matalas-

sa rakennuksessa sahattua mäntyä, on tuulensuojan paksuuden oltava vähintään 75 mm vuoden 2100-ilmastossa. Homehtumisherkkyysluokan 2 mukaisella puurungolla (höylätty kuusi) riittää tuulensuojaksi 50 mm paksu mineraalivillalevy, jotta hometta ei vuoden 2100-ilmastossa esiintyisi. Vuoden 2050-ilmastossa riittävä mineraalivillalevyn paksuus on noin 30 mm höylättyä kuusta käytettäessä ja mäntysahatavaralla puolestaan noin 40 mm.



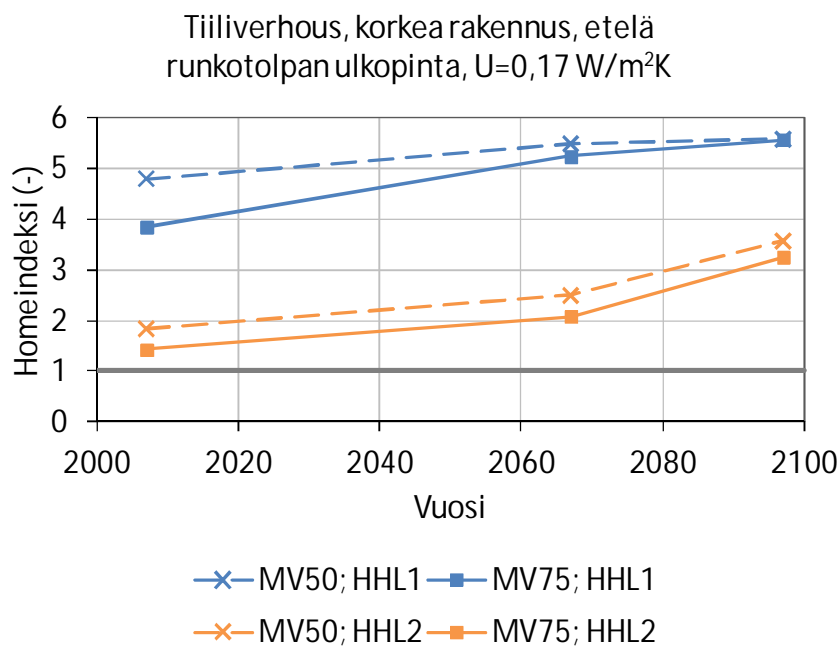
Kuva 6.9. Homeen kasvu runkotolpan ulkopinnassa matalassa tiiliverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään mineraalivillalevyä ja/tai runkotolpan homehtumisherkkyysluokkaa muutetaan.

Passiivitason matalassa tiiliverhotussa rankaseinässä, jonka U -arvo on $0,08 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ runkotolpan homehtuminen voidaan estää vain käyttämällä hyvin lämpöä eristävää tuulensuojaa ja homehtumiselle kestävämpää runkomateriaalia (ks. kuva 6.10). Tässä tapauksessa mineraalivillatuulensuojan paksuus tulee olla 75 mm mäntysahatavaralla tai 50 mm höylättyä kuusta käytettäessä jo vuoden 2050-ilmastossa.



Kuva 6.10. Homeen kasvu matalassa tiiliverhotussa rankaseinässä, jossa tuulensuojana käytetään mineraalivillalevyä ja/tai runkotolpan homehtumisherkkyysluokkaa muutetaan.

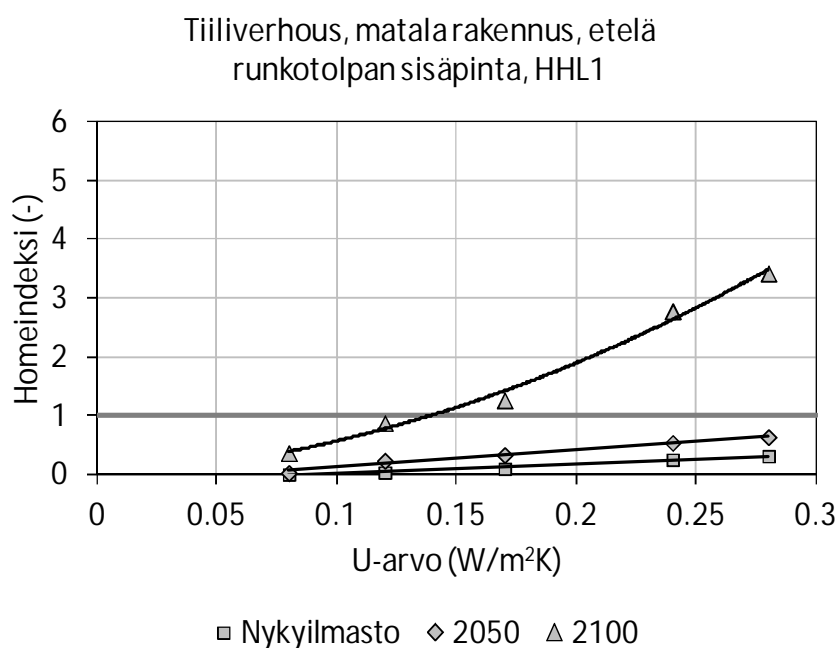
Yli 10 metriä korkeissa puurunkoisissa rakennuksissa esiintyy homeen kasvua jo nyky-määräysten mukaisilla rakenteilla. Homeen kasvua ei saada runkotolpan ulkopinnasta poistettua, vaikka tuulensuojana käytettäisiin paksua mineraalivillalevyä (ks. kuva 6.11 ja liite 5, kuva 14).



Kuva 6.11. Homeen kasvu korkeassa tiiliverhotussa rankaseinässä, jossa tuulensuojana käytetään mineraalivillalevyä ja/tai runkotolpan homehtumisherkkyysluokkaa muutetaan.

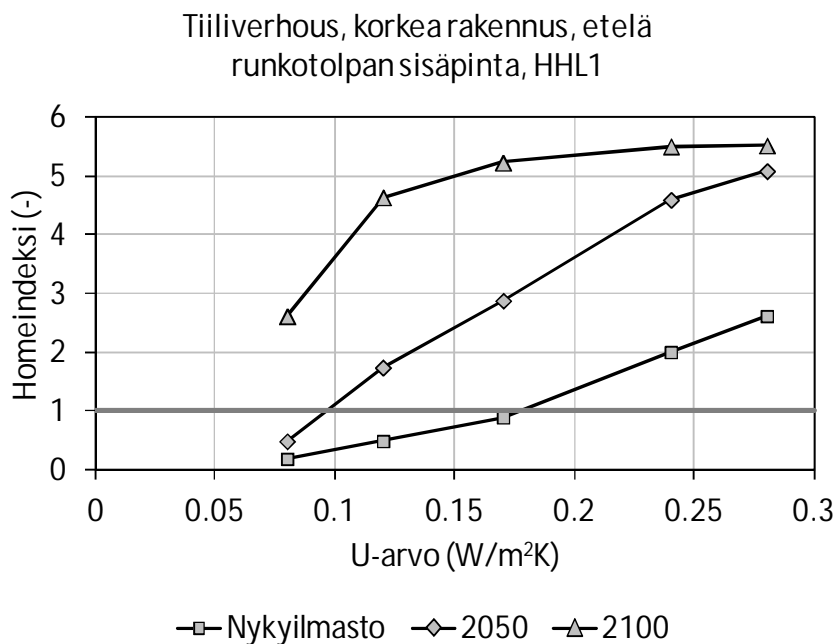
Sateella kapillaarisesti tiilimuuraukseen imeytynyt kosteus siirtyy lämpösäteilyn vaikutuksesta myös seinän sisäosiin. Kosteutta kuljettavana voimana on seinärakenteessa vesihöyryn diffuusio. Kriittinen kohta rakenteen sisäosassa on höyrynsulun ja lämmöneristeen rajapinta, missä sisäänpäin pyrkivä vesihöyry kohtaa vesihöyrytiivin pinnan. Kuvasta 6.12 voidaan havaita, että matalassa tiiliverhotussa ulkoseinässä esiintyy runkotolpan sisäpinnassa vuoden 2100-ilmastossa homeenkasvua rakenteilla, joiden U-arvo on suurempi kuin $0,14 \text{ W/m}^2\text{K}$. Nykyilmastossa ja vuoden 2050-ilmastossa rakenteen sisäosiin ei muodostu homeelle otollisia olosuhteita.

Tulokset osoittavat, että rakenteen sisäpinnan lähellä lämmöneristykseen lisäys parantaa rakenteen kosteusteknistä toimivuutta, päinvastoin kuin rakenteen ulko-osassa, jossa rakenteen homehtumisriski tyypillisesti lisääntyy. Toisaalta kuvasta 6.12 nähdään, että vanhoissa tiiliverhotuissa puurunkoseinissä homehtumisriski lisääntyy merkittävästi höyrynsulun sisäpinnassa, jos ilmastonmuutos jatkuu ennustetun kaltaisena. Lisäksi on huomattava, että vanhoissa rakenteissa tuulensuojan lämmönvastus on ollut oleellisesti pienempi, mikä lisää homehtumisriskiä entisestään.



Kuva 6.12. Homeen kasvu runkotolpan sisäpinnassa matalassa tiiliverhotussa rankaseinässä, kun rakenteessa käytetään tuulensuojana 75 mm paksua mineraalivillalevyä.

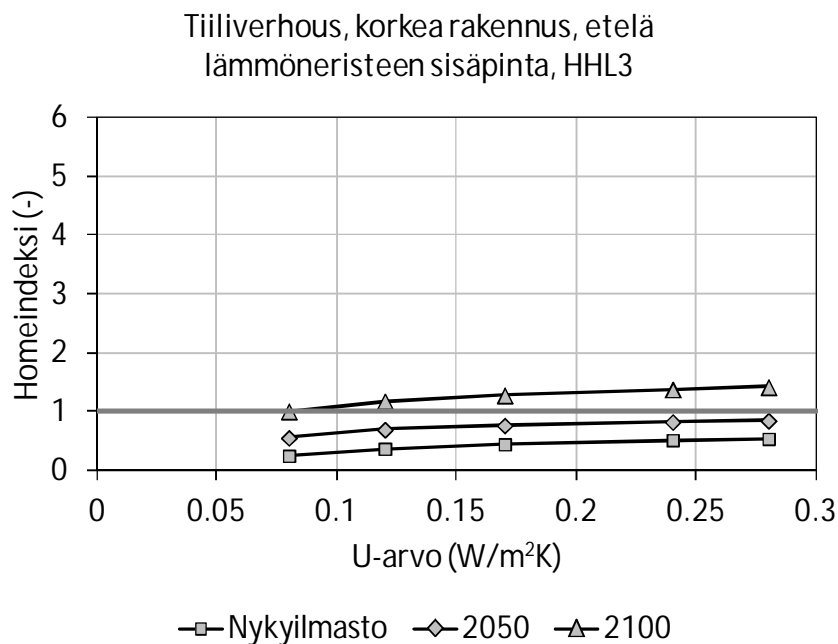
Korkeassa tiiliverhotussa rankaseinässä, runkotolpan sisäpinnassa homeindeksi nousee lähes kaikilla U-arvotasoilla korkeaksi, silmin havaittavaksi homekasvustoksi (ks. kuva 6.13). Homeen kasvu on erityisen voimakasta vuoden 2100-ilmastossa.



Kuva 6.13. Homeen kasvu runkotolpan sisäpinnassa korkeassa tiiliverhotussa rankaseinässä, kun rakenteessa käytetään tuulensuojana 75 mm paksua mineraalivillalevyä.

Viistosademäärä on korkean rakennuksen yläosassa niin suurta, että rakenteen toimintaa ei voida parantaa tuulensuojaeristeen lämmöneristävyttä parantamalla. Vaihtoehtona on käyttää runkona teräsrankaa, jolloin homeen kasvu määräytyy mineraalivillan homeutumisherkkyyden mukaisesti. Kuvassa 6.14 on esitetty homeindeksi mineraalivillan sisäpinnassa korkeassa rakennuksessa, kun ulkopinnassa käytetään tuulensuojana 75 mm paksua mineraalivillalevyä.

Kuvasta 6.14 havaitaan, että korkeassa tiiliverhotussa rankaseinässä esiintyy hyvin lämpöä eristävällä tuulensuojallakin homeen kasvua rakenteen sisäosissa vuoden 2100-ilmastossa. Homeindeksi pysyy samalla tasolla riippumatta mineraalivillatuulensuojan paksuudesta (vrt. liite 5, kuva 12). Laskentatuloksista on havaittavissa, että sateella tiiliverhouksesta haihtuva kosteus liikkuu tehokkaasti vesihöyrynä avoahuokoisessa tuulensuoja- ja mineraalivillakerroksessa. Tämä johtuu mineraalivillan suuresta vesihöyrynläpäisevyydestä. Lämmöneristeen sisäpinnan homeindeksi laskee lineaarisesti lämmöneristevahvuuden kasvaessa ja etäännyttäessä kosteudelle alttiista ulkopinnasta. Matalassa rakennuksessa lämmöneristeen sisäpinnan homeindeksi pysyy puolestaan alhaisena jo käytettäessä 30 mm paksua mineraalivillatuulensuojaa (ks. liite 5, kuva 11) ja runkona teräsrankaa.



Kuva 6.14. Homeen kasvu lämmöneristeen sisäpinnassa korkeassa tiiliverhotussa rankaseinässä, kun rakenteessa käytetään tuulensuojana 75 mm paksua mineraalivillalevyä.

Taulukkoon 6.1 on laskettu tuulensuojan vaaditut lämmönvastukset erilaisille rakenteille ulkoseinässä, jonka U-arvo on 0,12 W/(m²K). Laskentavuotena on käytetty Vantaan vuosien 2097 ja 2067 A2-skenaarioilla ennustettuja tulevaisuuden ilmastoja. Tuulensuojan lämmönvastuksen merkitystä tiiliverhotussa rakenteessa on tutkittu ristikoolatulla ja lämmöneristeen vahvuisella puurungolla sekä homehtumisherkkyyden luokan 1 (HHL 1) ja luokan 2 (HHL 2) mukaisella puurungolla. Ristikoolauksena on käytetty puurungon ulkopinnassa 50 mm paksua ja 600 mm jaolla olevaa puurimoitusta tai metallirankaa.

Homehtumista kestävämmällä runkomateriaalilla voidaan pienentää tuulensuojalta vaadittavaa lämmönvastusta. Myös ulkopuolinen, vähintään 50 mm paksu, kosteutta kestävä ristikoolaus (esimerkiksi teräsranka) parantaa rakenteen toimivuutta. Tämä johtuu siitä, että homeelle alttiimpi puurunko sijaitsee lähempänä rakenteen sisäosaa, jolloin rungon ulkopinnan olosuhteet ovat vähemmän kriittisiä homeen kasvulle. Puurungon lämpötilan nousu laskee ulkopinnan suhteellista kosteutta ja vaikuttaa merkittävästi rakenteen homeeriskitasoon. Tiiliverhotussa rankaseinässä, jossa ei käytetä rakenteellista suojausta, tulisi käytetyn tuulensuojan olla vähintään homeherkkyyden luokan 3 mukainen mineraalivillalevy, jotta homeen kasvua ei esiintyisi tuulensuojalevyn sisäpinnassa.

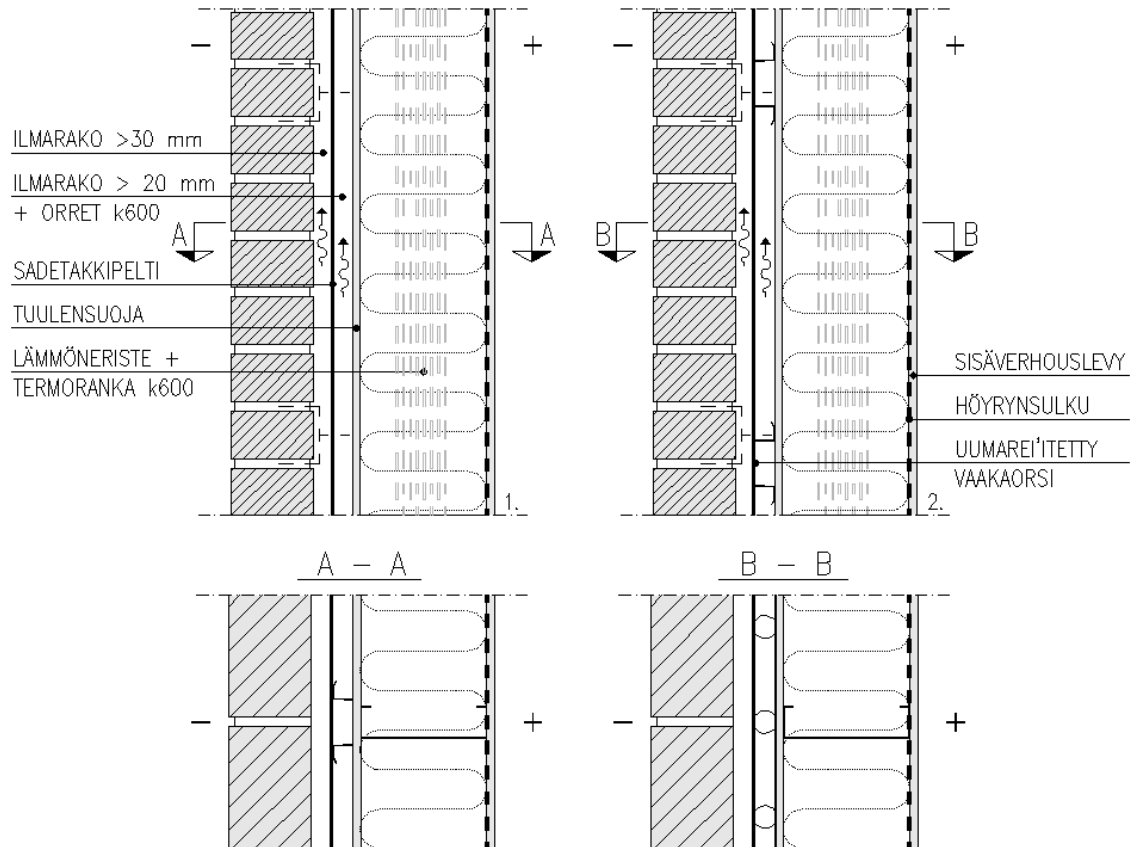
Taulukko 6.1. Tuulensuojan lämmönvastuksen minimiarvoja vuoden 2100-ilmastossa matalassa tiiliverhotussa ulkoseinässä ($U \geq 0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$; $h \leq 10 \text{ m}$), jossa vesihöyryn siirtymistä tiiliverhouksesta rakenteen sisään ei ole estetty rakenteellisella suojauksella. Suluissa on esitetty vuoden 2050-ilmastossa vaaditut minimiarvot.

Runko	Tuulensuojan lämmönvastuksen minimiarvo, R [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]		
	Lämmöneristeen vahvuinen runko	Ulkopuolella puinen ristikoolaus $\geq 50 \text{ mm}$	Ulkopuolella teräksinen ristikoolaus $\geq 50 \text{ mm}$
HHL 1 (sahattu tai mitallistettu puitavara)	2,7 (1,6)	Ei hyväksytty (2,6)	1,3 (0,2)
HHL 2 (höylätty kuusi)	1,6 (1,3)	3,2 (1,9)	0,5 (0,2)

Taulukosta 6.1 voidaan havaita, että ulkopuolelta homehtumisherkkyyssluokan 1 mukaisin puurimoin ristikoolattu rakenne ei ole vuoden 2100-ilmastossa hyväksyttävissä. Tällä rakenteella havaitaan voimakasta silmin nähtävää homeen kasvua ristikoolauksen ulkopinnassa vielä tuulensuojalla, jonka lämmönvastus on $3,2 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$. Tämä vastaa 100 mm paksun mineraalivillalevyn lämmönvastusta.

Korkean seinärakenteen kosteusteknistä toimivuutta voidaan parantaa vähentämällä seinän sisäosan kosteuskuormitusta muodostamalla julkisivun taakse sadevettä ja diffuusiolla siirtyvää kosteutta pidättävä rakennekerros siten, että rakenteen tuulettavuus ei esty (Raunama 2012). Kosteutta pidättävä suojakerros toimii rakenteessa samalla työhönaikaisena sadesuojana. Tiiviinä, vettä pidättävänä rakenteena voidaan käyttää ulkoseinässä esimerkiksi ohutlevyä siten, että levyn etu- ja takapuolelle jätetään erillinen tuuletusrako. ”Sadetakkina” toimiva suojakerros tulee toteuttaa siten, että kuorimuurauksen tuenta saadaan tehtyä tiilisiteiden avulla.

Kuvassa 6.15 on esitetty rakenne-esimerkki tiiliseinän sadetakkiratkaisusta, jolla korkean seinärakenteen ($h > 10 \text{ m}$) toimintaa voidaan parantaa. Kuvassa 6.15 on käytetty sisemmässä seinän osassa runkona uumarei’itettyä termorankaa, jonka lämmöneristävyys on samaa luokkaa kuin vastaavalla puurakenteella (Metsämäki et al. 2001). Tuulensuojan ulkopuolelle on kiinnitetty teräsranka, joka mahdollistaa sisemmän seinäosan tuulettavuuden. Rangan ulkopinnassa on ohutlevy, vähintään 30 mm paksu tuuletusrako ja tiiliverhous. Tämän tapaisessa ratkaisussa viistosateella julkisivun läpi tuleva kosteus poistuu ulkopuolisen ilmaraon kautta, eikä aiheuta lisäkosteuskuormaa sisemmälle seinän osalle. Tuuletusraon toimivuus on kuitenkin varmistettava seinärakenteen ylä- ja alaosasta.

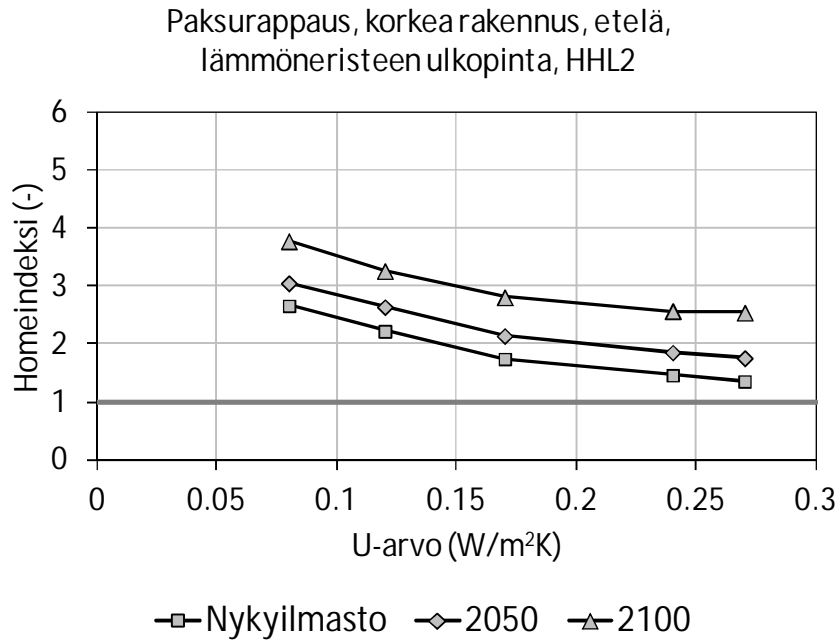


Kuva 6.15. Tiiliverhotun rankaseinän sadetakkiratkaisu, kun sisemmässä seinäosassa käytetään pystyrankaa (1) tai vaakasuuntaista tuuletusruodetta (2).

6.3 Eristerapattu rankaseinä

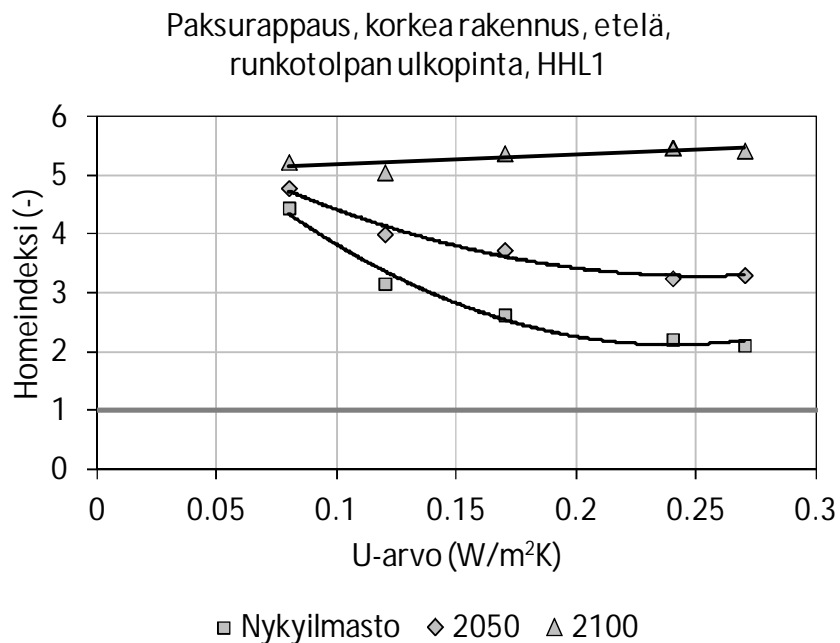
Toiminta ulkoilman olosuhteita ja viistosadetta vastaan

Eristerapatun rankaseinän toimivuutta tutkittiin jalolaastilla pinnoitetulla paksurappauksella ja uudentyyppisillä silikonihartsipinnoitteisilla rappausjärjestelmillä (ks. luku 5.3). Perinteinen paksurappaus on voimakkaasti vettä imevä ja sen kosteuskapasiteetti on suuri. Rakenteen pintaan voi muodostua tätä rappausta käytettäessä vesikalvo vasta pitkäkestoisemman sateen aikana (Pentti & Hyypöläinen 1999). Tämän tyyppisessä eristerapatussa rankaseinässä esiintyy homeen kasvua sekä nykyilmastossa että tulevaisuuden ilmastoissa. Rakenteen U-arvon parantaminen kasvattaa entisestään ulkoseinän ulkosan homeutumiskasvua. Kuvassa 6.16 on esitetty jalolaastilla päällystetyn paksurapatun ja korkean rankaseinän homeindeksi lämmöneristeen ulkopinnassa, tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa. Kuvasta havaitaan, että homeindeksi pysyy rakenteen ulko-osassa yli yhden kaikilla lasketuilla U-arvotasoilla. Matala paksurapattu rankaseinä toimii hieman paremmin, mutta siinäkin esiintyy mikroskooppilla havaittavaa homekasvua jo nykyilmastossa (ks. liite 6, kuva 1)



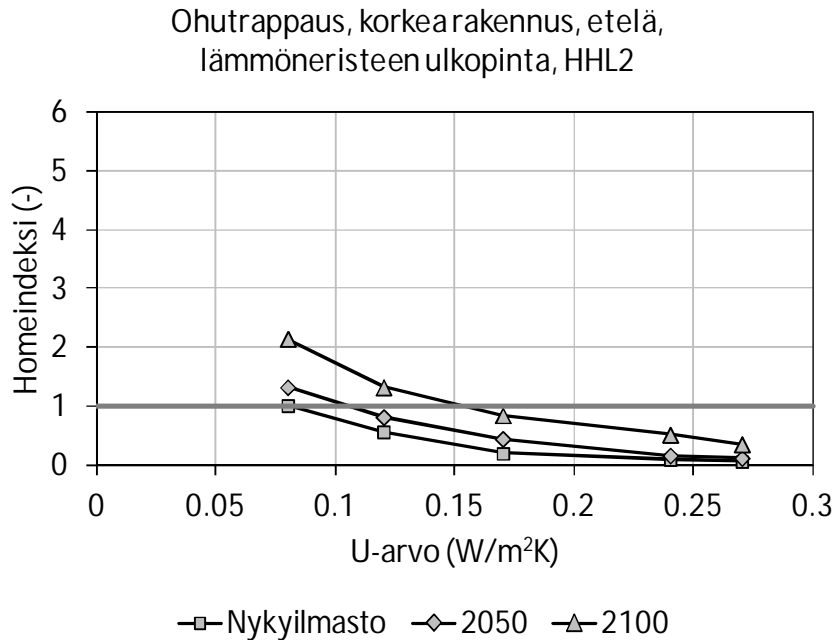
Kuva 6.16. Homeen kasvu lämmöneristeen ulkopinnassa korkeassa eristerapatussa ulkoseinässä, kun rappausena käytetään jalolaastilla päällystettyä paksurappausta (1, ks. kappale 5.3).

Paksurapatussa rankaseinässä homeindeksi nousee runkotolpan ulkopinnassa korkeammalle kuin lämmöneristeen ulkopinnassa (ks. kuva 6.17). Runkotolpan ulkopinnassa esiintyy $\geq 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ U-arvolla silminnähtävää homekasvustoa niin nykyilmastossa kuin tulevaisuuden ilmastoissakin.



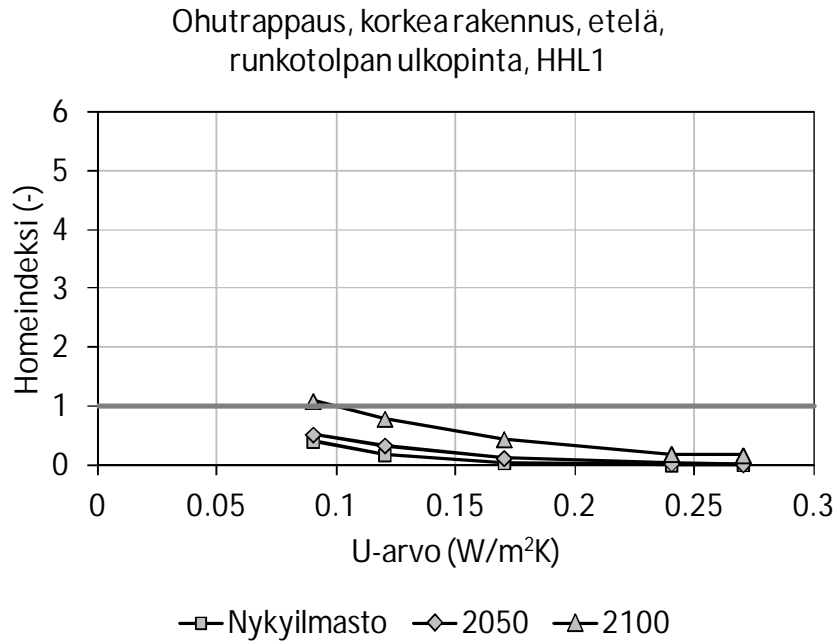
Kuva 6.17. Homeen kasvu runkotolpan ulkopinnassa korkeassa eristerapatussa ulkoseinässä, kun rappausena käytetään jalolaastilla päällystettyä paksurappausta (1).

Sementtiseideaineisella ohutrappauslaastilla on alhainen vedenimukyky ja seinä pidättää viistosadetta, jolloin homeriski rankarakenteen ulko-osissa pysyy alhaisena. Kuvassa 6.18 on esitetty korkean rankaseinän homeindeksi tuulensuojakipsilevyn takapinnassa, kun rappauksena käytetään hiertopinnoitteella päällystettyä ohutrappausta.



Kuva 6.18. Homeen kasvu lämmöneristeen ulkopinnassa korkeassa eristerapatussa ulkoseinässä, kun rappauksena käytetään hiertopinnoitteella päällystettyä ohutrappausta (4, ks. kappale 5.3).

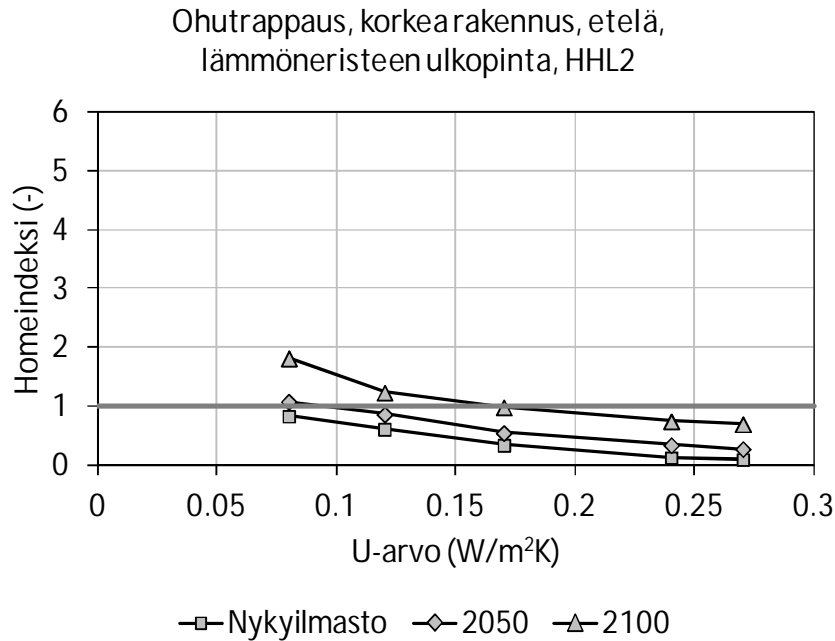
Ohutrappauksella päällystetyssä eristerapatussa rankaseinässä homeindeksi pysyy runkotolpan ulkopinnassa alhaisempana kuin tuulensuojakipsilevyn takapinnassa (ks. kuva 6.19).



Kuva 6.19. Homeen kasvu runkotolpan ulkopinnassa korkeassa eristerapatussa ulkoseinässä, kun rappauksena käytetään hiertopinnoitteella päällystettyä ohutrappausta (4).

Matalassa rakennuksessa ei esiinny homekasvustoa lämmöneristeen ulkopinnassa (ks. liite 6, kuva 3), kun ohutrappauksen ulkopinnassa käytetään hiertopinnoitetta. Kun pinnoitteeksi vaihdetaan vesitiivis silikonihartsipinnoite, homehtumisriski vähenee myös korkeassa rakennuksessa jonkin verran, mutta hometta esiintyy edelleen vuoden 2100-ilmastossa (ks. kuva 6.20).

Tiiviiden pinnoitteiden ja ohutrappauksissa käytettävien sementtiseideaineisten ohutrappauslaastien käyttö aiheuttaa sateella vesikalvon muodostumisen julkisivun pintaan, jolloin epätiivien liitosten ja halkeamien kautta vesi pääsee helposti rakenteeseen (BY 57 2011). Silikonihartsipinnoitetta käytettäessä myös rakenteen vesihöyrytiiviyys kasvaa ja näin ollen rakenteen kuivuminen heikkenee.

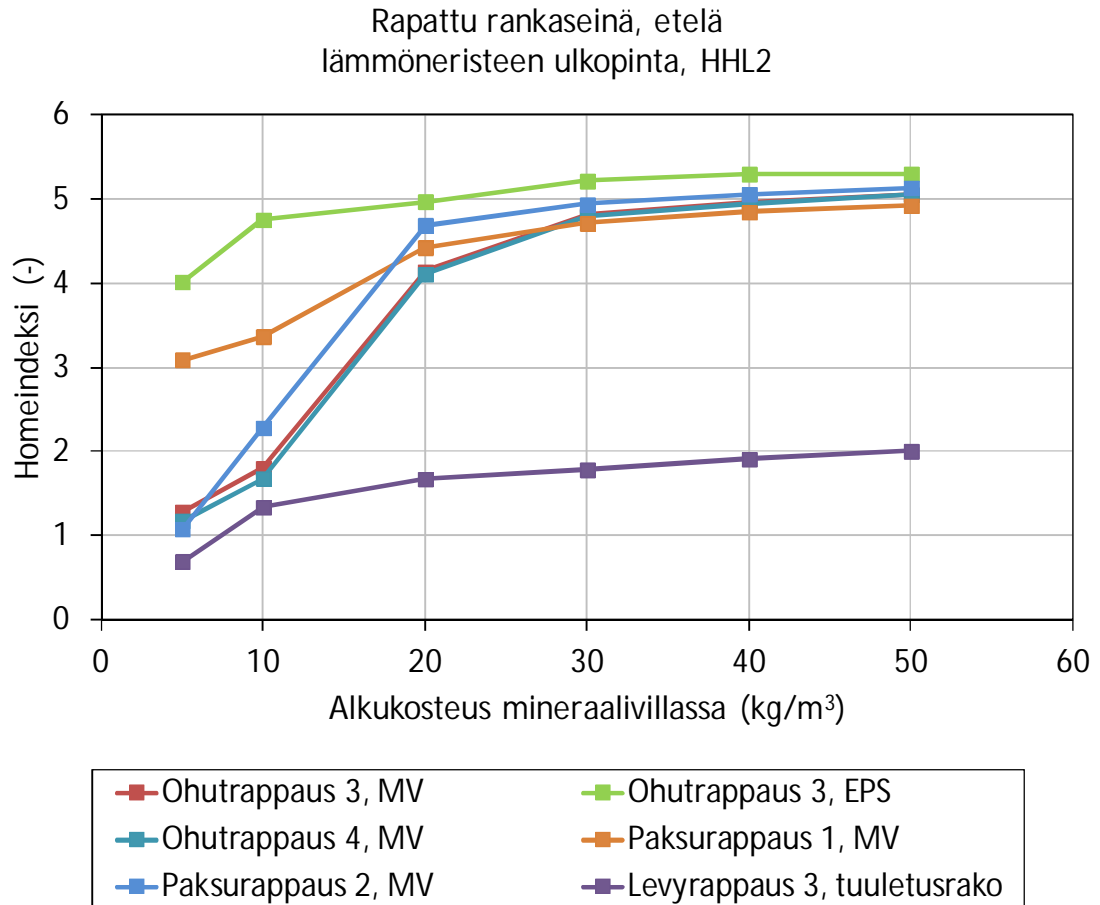


Kuva 6.20. Homeen kasvu lämmöneristeen ulkopinnassa korkeassa eristerapatussa ulkoseinässä, kun rappauksena käytetään silikonihartsipinnoitteella päällystettyä ohutrappausa (3, ks. kappale 5.3).

Rankarakenteisissa eristerapatuissa ulkoseinissä käytetty kipsikartonkilevy on erityisen herkkä veden kapillaariselle imeytymiselle ja siten myös mikrobikasvulle. Varsinkin terveydelle haitalliset aktinomykeetit viihtyvät kipsikartonkilevyssä. (Pasanen et al. 1998) Näin ollen homeindeksin tulisi eristerapatuissa ulkoseinissä olla selvästi alle yhden, jotta haitallisia bakteereja ei syntyisi ja aineenvaihduntatuotteita siirtyisi sisäilmaan.

Seinärakenteen kuivuminen

Rakentamismääräyskokoelman C2 (1998) mukaan rakenteen on kyettävä kuivumaan haittaa aiheuttamatta, kosteuden kertymisestä ei saa aiheutua terveysriskiä käyttäjille ja mahdolliseen vesivahinkoon on varauduttava siten, että estetään kosteuden haitallinen ja huomaamaton tunkeutuminen rakenteisiin. Eristerapatussa rankaseinässä vahingot eivät yleensä näy ulospäin ja kosteus tunkeutuu herkästi rakenteen sisäosiin liitoksista tai epätiiviestä ikkuna- ja oviliittymistä (Jansson et al. 2007). Tämä rakenteeseen tunkeutunut lisäkosteus ei saa aiheuttaa homeen kasvua rakenteen sisäosissa. Eristerapatussa rankaseinän kuivumista tutkittiin yleisesti käytössä olevilla rappausjärjestelmillä (ks. luku 5.3), rappausalustana käytettiin mineraalivillaa (D2, ks. liite 2) sekä EPS-eristettä. Kuvassa 6.21 on esitetty eristerapatussa rankaseinän homeindeksin maksimi-arvo kosteusvuodon jälkeen vuoden pituisella laskenta-ajanjaksoilla erilaisilla alkukosteuspitoisuuksilla.



Kuva 6.21. Tuulensuojakipsilevyn sisäpinnan homeindeksin maksimiarvo vuoden pituisella laskenta-ajanjaksolla kosteusvuodon jälkeen.

Tutkittavana rakenteena oli 200 mm paksu rankaseinä, jonka ulkopinnassa käytettiin tuulensuojakipsilevyä (A1, ks. liite 2) ja 50 mm paksua rappauseristettä. Levyrapatussa rankaseinässä käytettiin erillistä levyn päälle tehtyä rappausta (ohutrappaus 3, ks. kapale 5.3), rapatun rakenteen ja sisemmän seinäosan välissä tuuletusrakoa ja tuulensuojana 12 mm paksua huokoista puukuitulevyä (A13, ks. liite 2). Sisäilmassa vallitsi kaikkina vuodenaikoina vakioämpötila, 21 °C ja ulkoilman lämpötilan mukaan muuttuva kosteuslisä (ks. kuva 5.2). Sisäilman kosteuslisällä ei ollut merkittävää vaikutusta laskentatuloksiin, koska sisäpinnassa käytettiin tiivistä höyrinsulkumuovia (C11, ks. liite 2). Lähtötilanteessa mineraalivillaan oletettiin kerääntyneen ylimääräistä kosteutta 5-50 kg/m³ rakenteessa olevan kosteusvuodon seurauksena. Homeindeksiä on tarkasteltu tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa. Eristerapatuilla rankaseinillä homeindeksi nousi yleensä vielä jonkin verran korkeammaksi rappauseristeen takana, tuulensuojakipsilevyn ulkopinnalla. Homeindeksien ero levyn ulko- ja sisäpinnan välillä oli kuitenkin maksimissaan vain 0,2 yksikköä, eikä se näin ollen ollut kovin merkittävä laskentatulosten kannalta. Rakenteen kuivumista tarkasteltiin vuoden 2100-ilmastossa käyttäen mitoitusvuotena Vantaan 2097 sääolosuhteita.

Kalkkisementtilaastilla tehdyssä paksurappauksessa (paksurappaus 1, MV), jonka pinnalla käytetään jalolaastia, homeindeksi nousee jo vähäisellä alkukosteudella korkealle ja kipsilevyn pinnassa esiintyy silmin havaittavaa homeen kasvua jo alkukosteuspitoisuudella 5 kg/m^3 . Silikonihartsipinnoitteella päällystetty paksurappaus (paksurappaus 2, MV) toimii rakenteessa selvästi paremmin. Homeindeksi pysyy tällä rappausjärjestelmällä pienillä kosteuspitoisuuksilla alhaisena ja nousee korkeaksi vasta, kun rakenteen alkukosteuspitoisuus ylittää arvon 10 kg/m^3 .

Tiivis silikonihartsipinnoite sementtiseidaineisen ohutrappauksen pinnalla (ohutrappaus 3, MV) ei näytä juurikaan vaikuttavan kipsilevyn sisäpinnan homeindeksin tasoon. Homeindeksin maksimiarvo pysyy tällä rakenteella alkukosteuspitoisuudesta riippumatta samalla tasolla kuin käytettäessä ohutrappauslaastin pinnalla hyvin vesihöyryä läpäisevää hiertopinnoitetta (ohutrappaus 4, MV). Pienillä alkukosteuspitoisuuksilla ($0\text{-}10 \text{ kg/m}^3$) molemmissa rakenteissa (ohutrappaus 3 ja 4) havaitaan vain lievää homeen kasvua. Homeen kasvu on erityisen voimakasta kipsilevyn pinnassa alkukosteuspitoisuuksilla $20\text{-}50 \text{ kg/m}^3$.

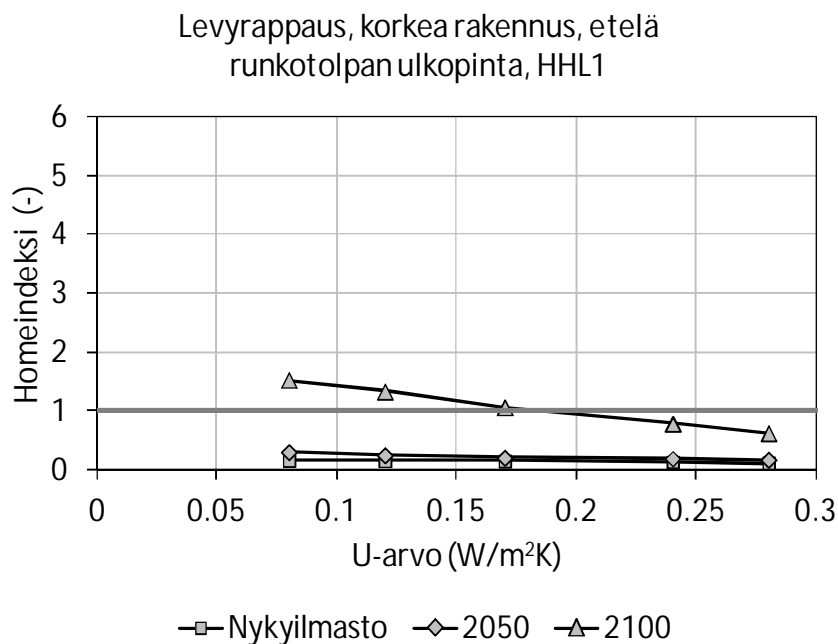
Kun ohutrappauksen 3 rappausalustana käytetään EPS-eristettä (EPS 60 S), homeindeksi nousee jo pienillä alkukosteuspitoisuuksilla yli kolmen, silmin havaittavaksi homekasvustoksi. Ero mineraalivilla-alustaiseen rapattuun puurankaseinään on merkittävä alkukosteuden ollessa tasolla $0\text{-}20 \text{ kg/m}^3$. Tämä johtuu EPS-eristeen suuremmasta vesihöyryvastuksesta, joka hidastaa selvästi rakenteen kuivumista.

Levyrapatussa rankaseinässä sateenpitävän vaipan muodostaa erillinen ulkoverhous ja ilmanpitävyydestä huolehtii sisempi seinän osa, joka on hyvin vesihöyryä läpäisevä. Kuvasta 6.21 voidaan havaita, että tällainen rakenne toimii selvästi paremmin kuin ilman tuuletusrakoa oleva eristerapattu rankaseinä. Alkukosteuden ollessa $< 7 \text{ kg/m}^3$, rakenteessa ei havaita homeen kasvua. Suurillakin alkukosteuspitoisuuksilla rakenteessa havaitaan vain mikroskooppista homeen kasvua. Kosteusvaurioriskin todennäköisyys on myös tällä rakenteella selvästi pienempi, koska ulkoverhous suojaa sisempää seinän osaa kastumiselta.

Edellä esitetty kuivumistarkastelu ei kuvaa kosteusvaurioriskiä täysin oikein, koska todellisessa tilanteessa kosteutta tulee kosteusvauriokohdan kautta lisää rakenteeseen aina viistosateen aikana. Esitetty menetelmä kertoo kuitenkin sen, millä tavoin rakenteet kuivuvat kosteusvaurion sattuessa. Kuvasta 6.21 on nähtävissä se, että tuuletusraolla varustettu rakenne on selvästi kuivumiskykyisin. Tällaisessa rakenteessa kosteus poistuu tuuletusraon kautta lyhyessä ajassa, jolloin homeindeksi pysyy rakenteessa selvästi alhaisempana kuin eristerapatussa rankaseinässä. Tuuletusraollinen seinärakenne on näin ollen turvallisin ratkaisu myös tulevaisuuden ilmasto-olosuhteissa Suomessa.

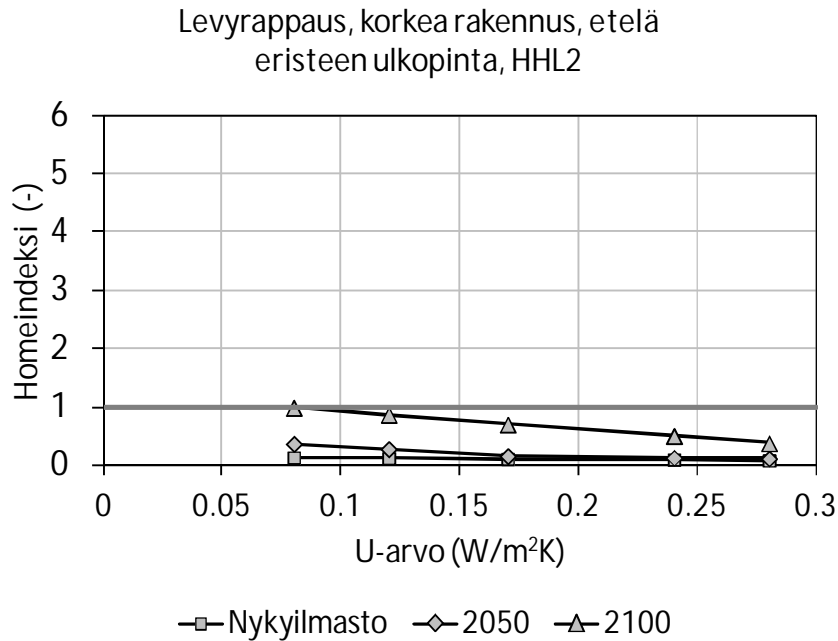
6.4 Levyrapattu rankaseinä

Levyrapattu ulkoseinä on jonkin verran kapillaarisesti vettä imevä. Tämä kasvattaa suhteellista kosteutta tuuletusraossa, mutta vaikutus on selvästi vähäisempi kuin muuratussa julkisivussa. Levyrappauksen takana oleva yhtenäinen tuuletusrako riittää poistamaan ylimääräisen, kapillaarisesti tuuletusrakoon siirtyvän kosteuden, jolloin homeindeksi pysyy rakenteessa samalla tasolla kuin puuverhotussa ulkoseinässä. Tälläkin rakenteella esiintyy hometta mineraalivillan ja runkotolpan ulkopinnassa vuoden 2100-ilmastossa, kun tuulensuojana käytetään tuulensuojakipsilevyä (ks. kuva 6.22 ja liite 7).



Kuva 6.22. Homeen kasvu runkotolpan ulkopinnassa levyrapatussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään 9 mm paksua tuulensuojakipsilevyä (A1).

Kun tuulensuoja vaihdetaan lämpöä eristävämmäksi, homeen kasvun riski rakenteesta poistuu. Kuvassa 6.23 on esitetty lämmöneristeen ulkopinnan homehtumisriski, kun tuulensuojana käytetään 12 mm paksua huokoista puukuitulevyä.

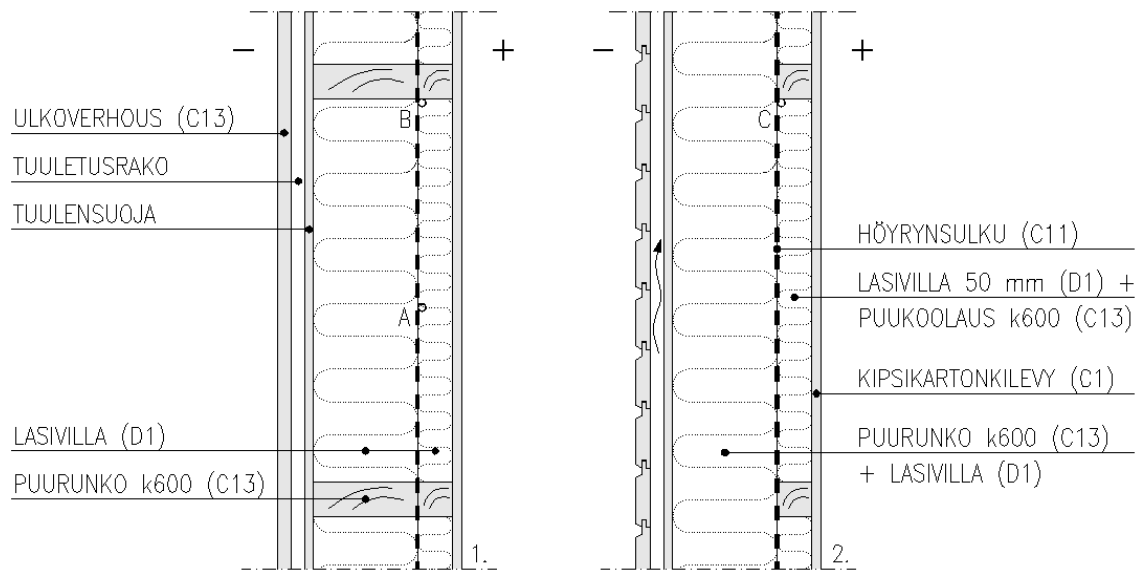


Kuva 6.23. Homeen kasvu lämmöneristeen ulkopinnassa levyrapatussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään 12 mm paksua huokoista puukuitulevyä (A13).

Lämmöneristeen ulkopinta on huokoista puukuitulevyä käytettäessä kriittisempi kuin runkotolpan ulkopinnan homehtumisriski. Tämä voidaan havaita liitteen 7, kuvasta 3. Näin ollen runkomateriaalin parantamisella ei voida vaikuttaa rakenteen homehtumisherkkyyteen, kun tuulensuojana käytetään homehtumisherkkyyden luokan 2 mukaista tuulensuojaa (ks. luku 3).

6.5 Sisäpuolinen koolaus

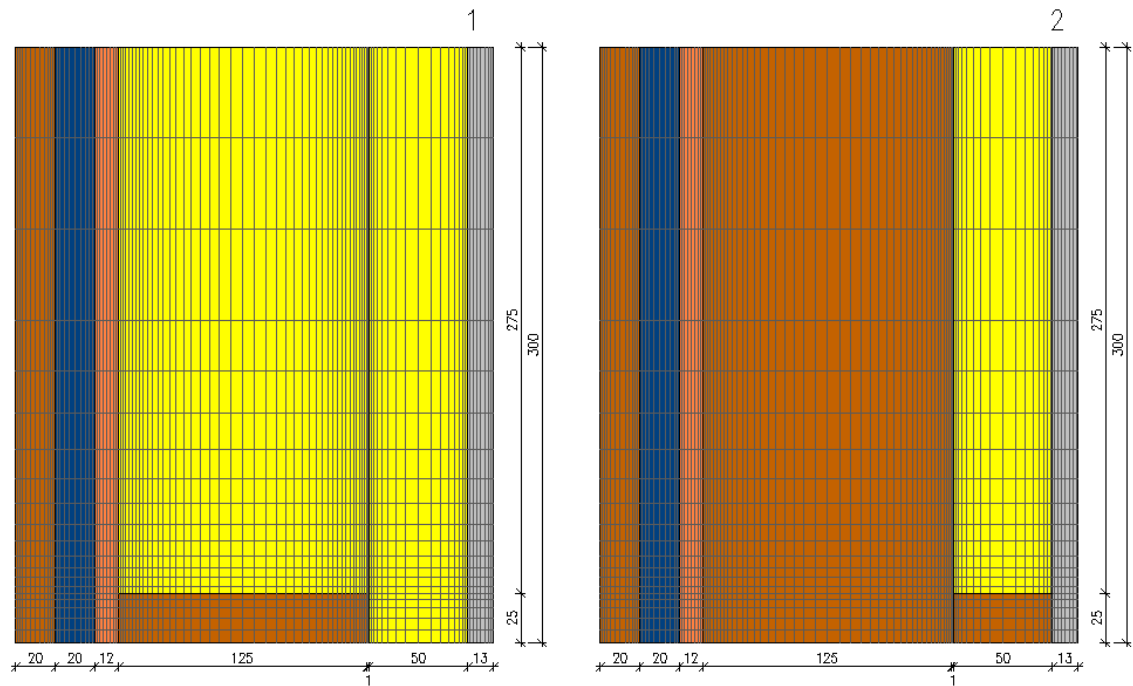
Sisäilman kosteuslisän vaikutusta höyrynsulun sisäpinnan homehtumisriskiin tutkittiin rakenteella, jossa höyrynsulku oli sijoitettu sähköasennusten vaatiman tilan takia 50 mm syvyyteen seinän sisäpinnasta. Sisäpuolisena koolauksena käytettiin 50x50 mm rimoitusta 600 mm jaolla joko pysty- tai vaakasuunnassa. Rimojen väliin oli sijoitettu 50 mm vahvuinen mineraalivillalevy (D1, ks. liite 2). Tutkitut rakenteet on esitetty kuvassa 6.24. Sisäpuolisessa pystykoolatusta seinässä puurimat oli asennettu runkotolppia vasten (ks. kuva 6.24/1) ja vaakakoolatusta rakenteesta kohtisuoraan pystyrunkoa vasten (ks. kuva 6.24/2). Tuulensuojalevyn ulkopinnassa käytettiin 20 mm paksua tuuletusra-koa ja puurakenteista ulkoverhousa.



Kuva 6.24. Seinärakenteet, joilla tutkittiin homeen kasvun riskiä höyrynsulun sisäpinnassa. Tyypissä 1 käytettiin sisäpuolista pystykoolausta kantavien runkotolppien kohdalla ja tyypissä 2 sisäpuolista vaakakoolausta. Kuvassa on esitetty myös laskennassa käytetyt monitoripisteet.

Tutkimus kohdistettiin höyrynsulun sisäpintaan, joka oli kriittisempi kosteuden kondensoitumiselle kuin sisäverhouslevyn sisäpinta. Höyrynsulun ulkopuolisena rankana käytettiin läpimenevää viilupuusta (LVL) tai sahatavarasta tehtyä runkoa, joiden pääasialliset paksuudet olivat 100, 125, 200, 300 ja 500 mm. Näistä kaksi viimeistä olivat viilupuurankoja. Monitoripisteet sijaitsivat höyrynsulun sisäpinnassa, rankojen keskellä (A) ja sisäpuolisen puurangan ulkokulmassa (B, C).

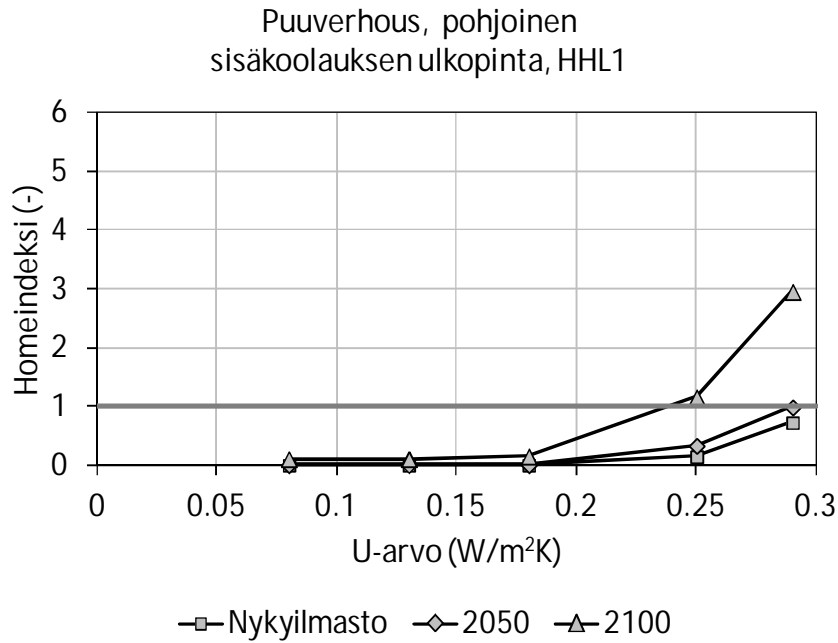
Laskenta-analyysit tehtiin Jokioisen vuoden 2004-ilmastolla ja siitä modifioituilla tulevaisuuden ilmastoilla (ks. kappale 5.1). Sisäilman lämpötila pidettiin koko ajan vakiona, 21 °C:ssa ja kosteuslisänä käytettiin kappaleen 5.2.1 mukaista ulkoilman lämpötilasta riippuvaa lisäkosteuden funktiota. Höyrynsulkuna oli tutkituissa rakenteissa muovikalvo (C11, ks. liite 2). Elementtimallit, joilla tutkittiin sisäpuolisen ristikoolauksen vaikutusta, on esitetty kuvassa 6.25. Kosteuden kondensoitumista runkotolpan alueella tutkittiin elementtimallilla 1 ja sisäpuolisen koolauksen homehtumisherkkyyttä mallilla 2.



Kuva 6.25. Esimerkit elementtimalleista, joita käytettiin tutkittaessa sisäpuolisen vaakakoolauksen vaikutusta rakenteen homehtumisriskiin.

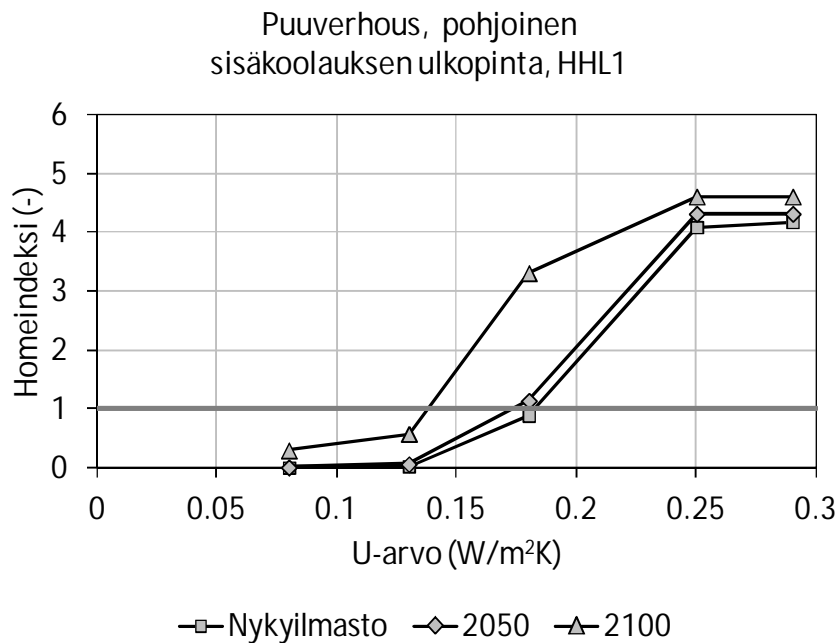
Laskentamalleissa käytettiin tiheää elementtijakoa siten, että ohuimmat elementit sijoituivat materiaalien rajapintoihin. Laskenta suoritettiin vain lasivillaa (D1, ks. liite 2) käyttäen, koska se oli avohuokoisena ja kosteutta läpäisevänä eristeenä kriittisin höyrinsulun toiminnan kannalta. Kun höyrinsulku sijoitetaan seinärakenteen sisäpinnasta 50 mm syvyyteen, kriittisin kohta muodostuu runkotolpan alueelle. Lämmöneristeen vahvuinen pystyrunko jäädyttää tehokkaasti höyrinsulun sisäpintaa, jolloin höyrinsulun sisäosiin, puurangan alueelle muodostuu homeen kasvulle otolliset olosuhteet.

Ohutta tuulensuojakalvoa käytettäessä puurangan kylmäsilta-vaikutus on suurimmillaan. Kuvasta 6.26 havaitaan, että tuulensuojakalvallisessa seinärakenteessa, jonka U-arvo on pienempi kuin $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$, ei esiinny sisäpuolista pystykoolausta käytettäessä homeen kasvua.



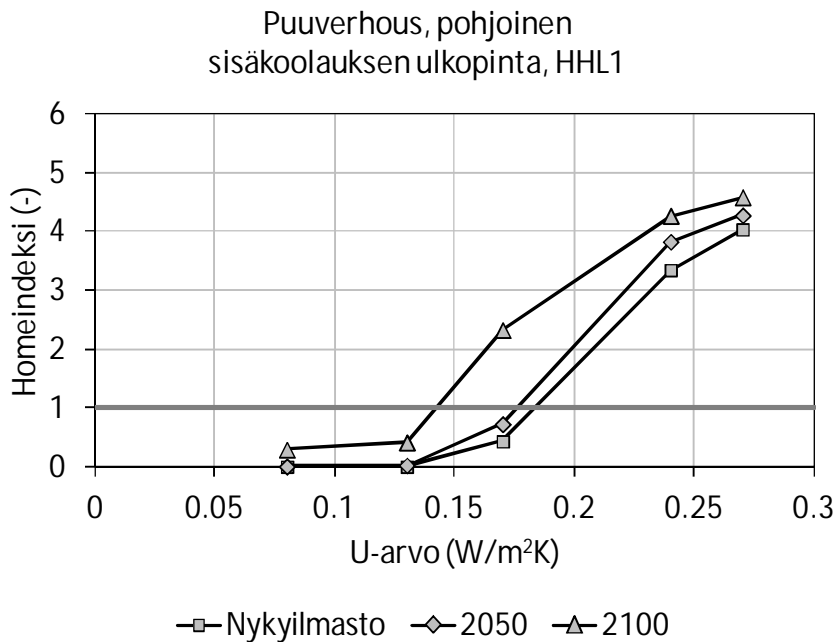
Kuva 6.26. Homeen kasvu sisäkoolauksen ulkopinnassa pystyrungon kohdalla puuverhotussa ulkoseinässä, kun tuulensuojana käytetään tuulensuojakalvoa (B1) ja sisäpuolella pystykoolausta.

Kuvasta 6.26 voidaan tehdä johtopäätös, että pystykoolausta toimii kaikissa nykymääräyksen ja passiivitasen ulkoseinissä tuulensuojasta ja sen lämmöneristävyydestä riippumatta. Vaakakoolausta käytettäessä koolauksen ulkopinta on kriittisempi homehtumiselle kuin pystykoolausta käytettäessä (ks. kuva 6.27).



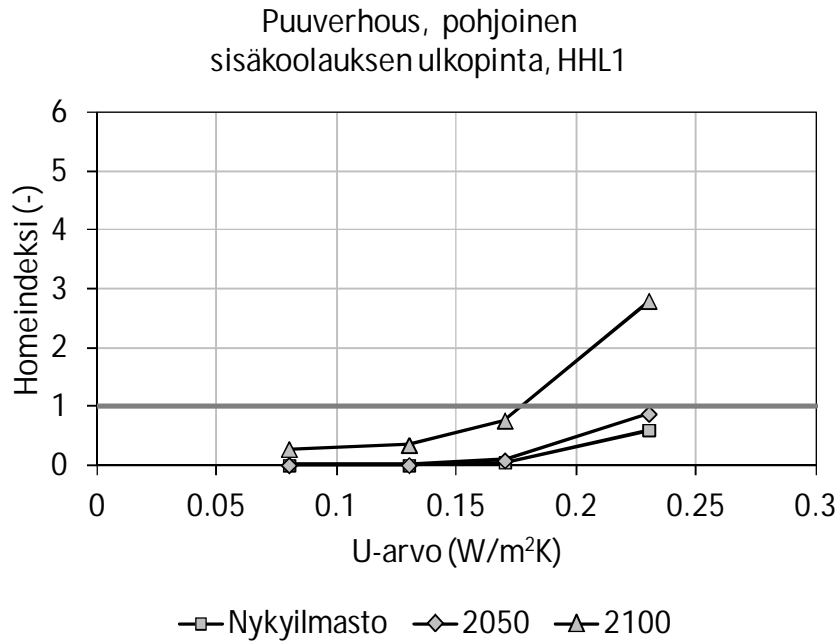
Kuva 6.27. Homeen kasvu sisäkoolauksen ulkopinnassa pystyrungon kohdalla puuverhotussa ulkoseinässä, kun tuulensuojana käytetään tuulensuojakalvoa (B1) ja sisäpuolella vaakakoolausta .

Havaitaan, että vaakakoolausta käytettäessä homeetta esiintyy sisäkoolauksen ulkopinnassa pystyrungon kohdalla tulevaisuuden ilmastossa vielä U-arvotasolla 0,14 W/(m²K), kun tuulensuojana käytetään tuulensuojakalvoa. Luvun 6.1 mukaan tuulensuojakalvoisessa ulkoseinässä esiintyy homeetta myös rakenteen ulko-osissa, jolloin tämä rakenne ei ole muutenkaan kosteusteknisesti kelvollinen. Ulko-osaltaan toimivassa rakenteessa homeindeksi nousee vaakakoolauksen ulkopinnassa pystyrungon kohdalla yli yhden myös ulkoseinissä, joiden U-arvo $\geq 0,14$ W/m²K (ks. kuva 6.28).



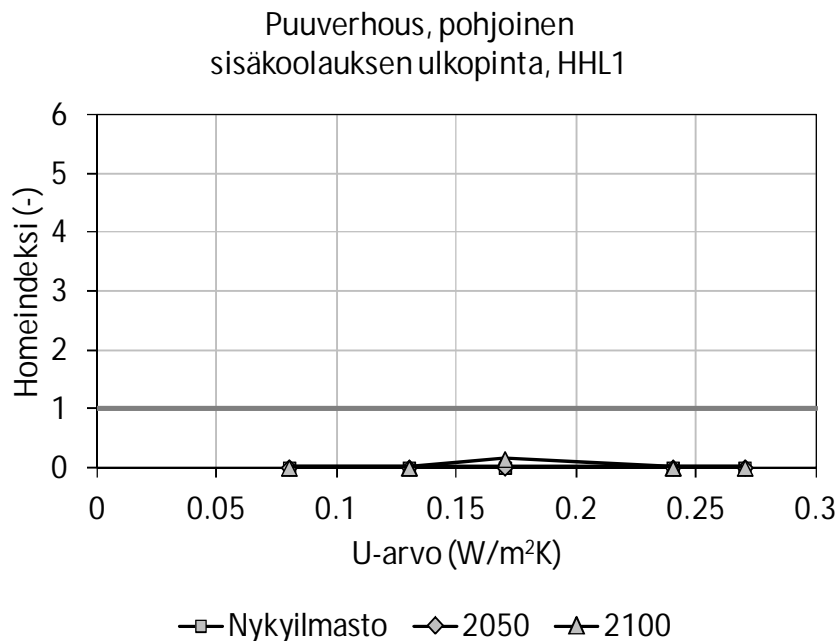
Kuva 6.28. Homeen kasvu sisäkoolauksen ulkopinnassa pystyrungon kohdalla puuverhossa ulkoseinässä, kun tuulensuojana käytetään 12 mm paksua huokoista puukuitulevyä (A13) ja sisäpuolella vaakakoolausta.

Vaakakoolausta käytettäessä homeen kasvua esiintyy nykymääräysten (RakMk C3 2010) mukaisessa ulkoseinässä myös silloin, jos tuulensuojana käytetään 25 mm paksua puukuitulevyä (A2, ks. liite 2). Tällä tuulensuojalla homeindeksi nousee vaakakoolauksen ulkopinnassa pystyrungon kohdalla arvoon 1,5 rakenteella, jonka U-arvo on 0,17 W/(m²K). Jos rakenteessa halutaan käyttää sisäpinnassa vaakakoolausta, on tuulensuojana käytettävä hyvin lämpöä eristävää mineraalivillatuulensuojaa, jotta homeen kasvua ei esiinny sisäkoolauksen ulkopinnassa (ks. kuva 6.29). Kun tuulensuojana käytetään 30 mm paksua mineraalivillalevyä (A3, ks. liite 2), homeen kasvua ei esiinny vaakakoolauksen ulkopinnassa ulkoseinissä, joiden U-arvo on $< 0,18$ W/(m²K).



Kuva 6.29. Homeen kasvu sisäkoolauksen ulkopinnassa pystyrungon kohdalla puuverhotussa ulkoseinässä, kun tuulensuojana käytetään 30 mm paksua mineraalivillalevyä (A3) ja sisäpuolella vaakakoolausta.

Käytettäessä 12-25 mm paksua huokoista puukuitulevyä tuulensuojana on seinärakenteessa käytettävä pystykoolausta, jotta homeen kasvua ei esiinny vuoden 2100-ilmastossa (ks. kuva 6.30). Tällä tuulensuojalla ja pystykoolauksella homeindeksi pysyy kaikilla U-arvotasooilla selvästi alle yhden, eikä hometta rakenteessa esiinny.



Kuva 6.30. Homeen kasvu sisäkoolauksen ulkopinnassa pystyrungon kohdalla puuverhotussa ulkoseinässä, kun tuulensuojana käytetään 12 mm paksua huokoista puukuitulevyä (A13) ja sisäpuolella pystykoolausta.

Vaakakoolausta käytettäessä höyrynsulun sisäpintaan pystyrungon kohdalle tiivistyvä kosteus määrä on tuulensuojasta riippuen $0-21 \text{ g/m}^2$, kun rakenteen U -arvo $\leq 0,17 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ (liite 8). Sisäpintaan tiivistyvät kosteusmäärät ovat siis niin pieniä, että määrävänä suunnittelukriteerinä on sisäpuolelta koolatussa ulkoseinässä höyrynsulun sisäpuolisen rimoituksen homeindeksi ja sen pysyminen tasolla, jossa homeetta ei esiinny ($M_{\text{max}} < 1$).

Tulevaisuudessa ilmasto muuttuu kriittisemmäksi ja homehtumisriski sisäpuolisen vaakakoolauksen ulkopinnassa kasvaa. Huokoista puukuitulevyä käytettäessä vähintään 84 % ja $\geq 30 \text{ mm}$ paksun mineraalivillatuulensuojan kanssa vähintään 78 % lämmöneristeestä tulisi sijoittaa höyrynsulun ulkopuolella, jotta homeen kasvun riskiä ei esiintyisi sisäpuolisen vaakakoolauksen ulkopinnassa, pystyrungon kohdalla vuoden 2100 ilmastossa (ks. liite 9). Sisäpuolista pystykoolausta käytettäessä samanlaista rajoitusta ei höyrynsulun sijainnissa ole.

Tiloissa, joissa sisäilman kosteus on normaalia huoneilman kosteutta suurempi, tulisi höyrynsulku sijoittaa heti sisäverhouslevyn alle, jotta home- ja kosteusvaurion riskiltä vältyttäisiin. Myös suurta kosteusrasitusta aiheuttavat työvaiheet tulisi tehdä ennen sisäpuolisen koolauksen asentamista. Lattialaatan valun aikana sisäilman suhteellinen kosteus nousee lähelle 100 % RH, jolloin vesihöyry tiivistyy höyrynsulun sisäpintaan. Jos sisäverhouslevy, sisäpuolinen mineraalivillakerros ja puukoolaus on asennettu rakenteeseen ennen edellä mainittua rakennusvaihetta, aiheuttaa rakennusaikainen kosteus lämmöneristekerrokseen sijoitetussa puukoolauksessa homeen kasvua ja tästä on seurauksena myöhemmin sisäilmassa kohonneet itiöpitoisuudet ja mahdolliset asukkaiden kokemat terveyshaitat (Viljanen et al. 1997). Näin ollen myös elementtirakenteisissa seinissä sisäpuolinen lämmöneristys ja sisäverhouslevy olisi suositeltavaa jättää asentamatta kunnes rakennusaikainen kosteus on riittävästi kuivunut. Vaihtoehtoisesti tässäkin tapauksessa höyrynsulku tulisi asentaa heti sisäverhouslevyn taakse.

Rungon kylmäsiltavaikutusta voidaan pienentää käyttämällä runkona kuitulevyuumaista runkotolppaa tai eriytettyä kaksoisrunkoa. Tällöin kylmäsiltavaikutus pienenee ja homeen kasvun riskiä ei sisäpuolisessa vaakakoolauksessa esiinny. Myös vähintään 50 mm paksu pystyrungon ulkopuolinen ristikoolaus ja lämmöneristys estää homeen kasvun sisäpuolisen vaakakoolauksen ulkopinnassa seinässä, jonka U -arvo $\leq 0,19 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Tämä vastaa seinärakennetta, jossa kantavana runkona on vähintään 125x50 mm kokoinen runkopuu, sisä- ja ulkopinnassa 50 mm paksu ristikoolaus ja tuulensuojana 12 mm:n huokoinen puukuitulevy.

6.6 Sisäpinnalta vaadittu vesihöyrynvastus

Ihmisten ja asumisen synnyttämän kosteustuoton seurauksena sisäilmassa on enemmän vesihöyryä kuin ulkoilmassa. Tämä vesihöyrypitoisuus pyrkii tasoittumaan ulkoilmaan diffuusiolla rakennuksen ulkovaipan läpi. Diffuusiolla siirtyvä kosteus on erityisen merkittävää talviaikana, jolloin sisä- ja ulkoilman välinen vesihöyrynpitoisuusero on suuri. Jos seinärakenteen sisäpinnan vesihöyrynvastus ei ole riittävä, siirtyy kosteutta haitallisessa määrin rakenteen ulko-osiin, aiheuttaen siellä kosteuden kondensoitumista ja homeen kasvua. Homehtumisriskiä esiintyy erityisesti kesällä ja syksyllä, jolloin ulkoilman lämpötila on suurempi kuin 0 °C ja suhteellinen kosteus samanaikaisesti korkea (ks. kappale 3). Kerroksellisen rakenteen kosteustekninen toiminta riippuu ulko- ja sisäpinnan olosuhteiden lisäksi rakennekerrosten vesihöyrynläpäisevyydestä. Yleisperiaatteena pidetään sitä, että rakenteen vesihöyrynvastuksen tulisi pienetä sisältä ulospäin siirryttäessä (Viljanen et al. 1997).

Ulkoseinärakenteilta vaadittavaa vesihöyrynvastusta selvitettiin tässä tutkimuksessa tarkemmin laskennallisesti käyttämällä kriittisiä ulkoilman olosuhteita ja ulkoilman lämpötilasta riippuvaa kosteuslisää kosteusluokassa 1 (ks. kappale 5.1). Sisäpinnan vesihöyrynvastuksen minimiarvot määritettiin erilaisilla tuulensuoja- ja lämmöneristemateriaaleilla toteutetuille seinärakenteille. Tutkituissa seinärakenteissa käytettiin rungon ulkopuolella ristikoolausta (50x50 mm k600) ja 50 mm paksua ulkopuolista lämmöneristettä. Lämmöneristeen kokonaisvahvuus oli ulkoseinässä 350 mm, joka vastasi U-arvotasoa 0,12 W/(m²K). Määräävänä laskentakriteerinä oli lämmöneristeen ulkopinnan homeindeksi. Rakenteissa, joissa ei ollut homehtumisriskiä ($M_{\max} < 1$) myös kosteuden kondensoituminen oli vähäistä.

Hygroskooppisena lämmöneristeenä käytettiin puukuitueristettä (D4, ks. liite 2) ja ei-hygroskooppisena eristeenä lasivillaa (D1, ks. liite 2). Laskennassa käytetyn hygroskooppisen lämmöneristeen ominaisuudet vastasivat märkäpuhallettua ja levymäistä eristettä, jonka keskimääräinen tiheys on 35 kg/m³. Seinärakenteen ontelopuhalluksessa eristeen tiheys on laskennassa käytettyä eristettä suurempi, vastaten arvoa 55-65 kg/m³ (Romppainen 2012). Suurempitiheyksisellä hygroskooppisella eristeellä on enemmän kosteudensitomiskapasiteettia, joka parantaa seinärakenteen toimivuutta.

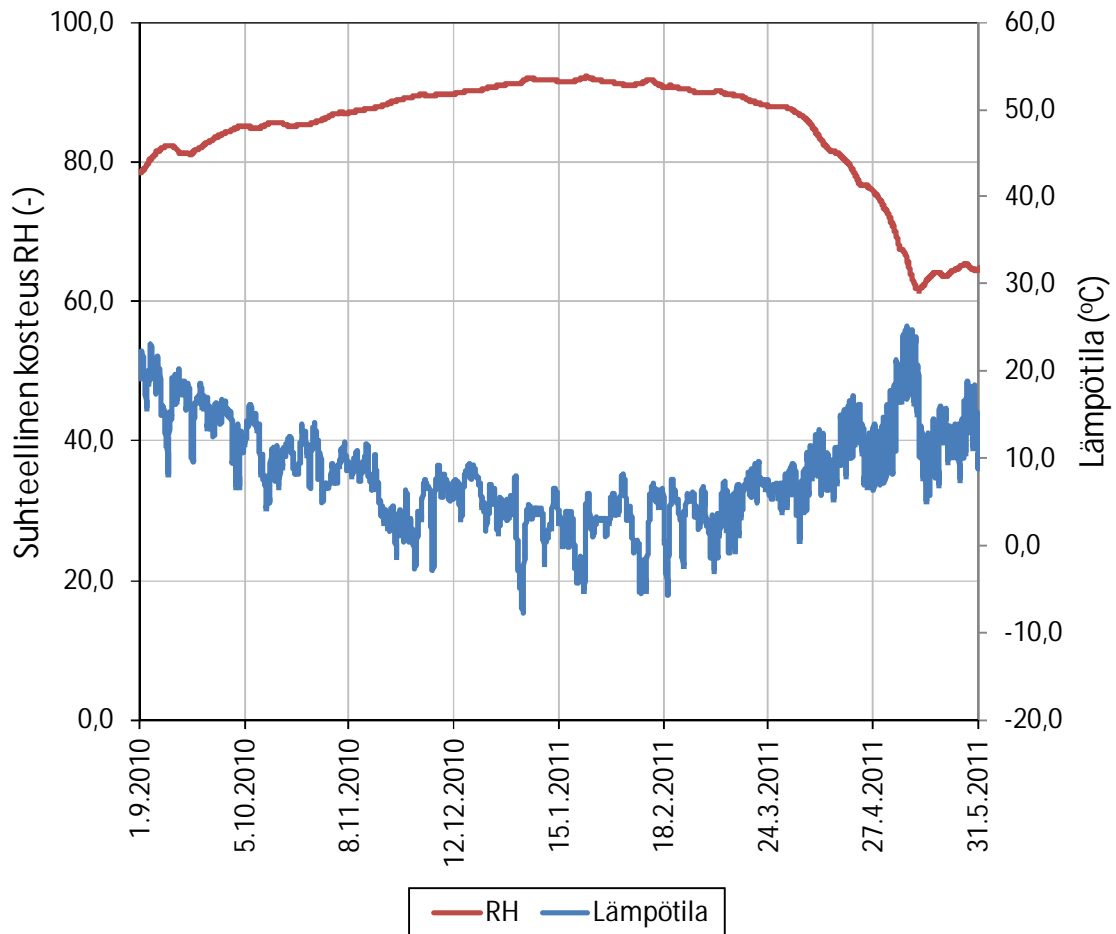
Kriittisimmäksi kohdaksi muodostui mineraalivillatuulensuojaa käytettäessä ulkopuolisen ristikoolauksen sisäpinta, jossa sisäpuolelta siirtyvä vesihöyry kohtasi vesihöyrytiiveimmän pinnan. Muilla laskennassa käytetyillä tuulensuojilla homeelle otollisimmat olosuhteet muodostuivat tuulensuojan sisäpintaan. Taulukossa 6.2 on esitetty vaaditut vesihöyrynvastussuhteet ja sisäpinnalta vaadittu vesihöyrynvastuksen minimiarvo vuoden 2100-ilmastossa, kun sisäilmassa käytetään kuvan 5.2 mukaista kosteuslisää. Valitusta tuulensuojasta riippuen rakenteen vesihöyrynvastussuhde vaihtelee välillä 1-40:1. Suomen rakentamismääräyskokoelmassa C2 (1998) esitetty vastussuhde, 5:1, ei ole

riittävä rakenteessa, jossa tuulensuojana käytetään huokoista puukuitulevyä tai havuvaneria. Näissä tapauksissa rakenteelta vaaditaan huomattavasti suurempaa vesihöyrynvastusta, jotta rakenne toimisi kosteusteknisesti oikein. Huokoisen puukuitulevyn paksuudesta riippuen vaadittu vesihöyrynvastuksen minimiarvo on 9-40:1 ja havuvanerilla 8-10:1.

Taulukko 6.2. Sisäpinnan vesihöyrynvastuksen ($Z_{v,i}$) ja sisä- ja ulkopinnan välisen vesihöyrynvastussuhteen (Z_i/Z_e) vaaditut minimiarvot puurunkoisissa ulkoseinissä, kun sisäilman kosteus on talviaikana 5 g/m^3 ja kesäaikana 2 g/m^3 .

Tuulensuoja	Lämmöneriste			
	Ei-hygroskooppinen lämmöneriste		Hygroskooppinen lämmöneriste	
	Z_i/Z_e [-]	$Z_{v,i}$ $\times 10^3$ [s/m]	Z_i/Z_e [-]	$Z_{v,i}$ $\times 10^3$ [s/m]
Mineraalivillalevy 30 mm (A3)	2:1	2,5	1:1	1,35
Huokoinen puukuitulevy 12 mm (A13)	38:1	94	40:1	98
Huokoinen puukuitulevy 25 mm (A2)	10:1	44	9:1	40,5
Havuvaneri 9 mm (A11)	10:1	130	8:1	110
Havuvaneri 9 mm (A11) + Mineraalivillalevy 30 mm (A3)	5:1	80	4:1	53
Kipsikartonkilevy 9 mm (A1) + Mineraalivillalevy 30 mm (A3)	5:1	20,5	2:1	9,5

Havuvanerin (A11, ks. liite 2) vesihöyrynvastus riippuu vanerin kosteuspitoisuudesta siten, että suhteellisen kosteuden kasvaessa vanerin vesihöyrynvastus pienenee. Lämmityskauden (1.9-31.5) aikana havuvanerin suhteellinen kosteus vaihtelee kuvan 6.31 mukaisesti. Alhaisissa lämpötiloissa vanerin huokosilman suhteellinen kosteus on korkea, koska ilman kyllästyskosteuspitoisuus alenee lämpötilan laskiessa. Keskimääräinen huokosilman suhteellinen kosteus aikavälillä 1.9-31.5 on havuvanerissa 83 % RH. Ulkopuolelta lisäeristetyssä rakenteessa suhteellinen kosteus pysyy 2 prosenttiyksikköä suurempana. Tämä johtuu mineraalivillan aiheuttamasta lisävastuksesta. 85 % RH:ssa vanerin vesihöyrynvastusarvo on vain 40 % (14×10^3 s/m) keskimääräisestä arvosta. Sisä- ja ulkopinnan välinen vesihöyrynvastussuhde on taulukon 6.2 mukaisille vanerirakenteille laskettu tätä arvoa käyttämällä. Muissa tuulensuojamateriaaleissa vesihöyrynvastus pysyy vakiona materiaalin huokosilman suhteellisesta kosteudesta riippumatta (ks. liite 2). Lisäeristys havuvanerin ulkopinnassa nostaa materiaalin lämpötilaa, jolloin havuvanerin lämpötila pysyy pidempään jäätymisalueen yläpuolella ja rakenteen kuivuminen nopeutuu. Kuvassa 6.31 esitetyt materiaalin RH- ja lämpötiläkäyrät on laskettu Jokioisen vuoden 2094 ilmastossa.

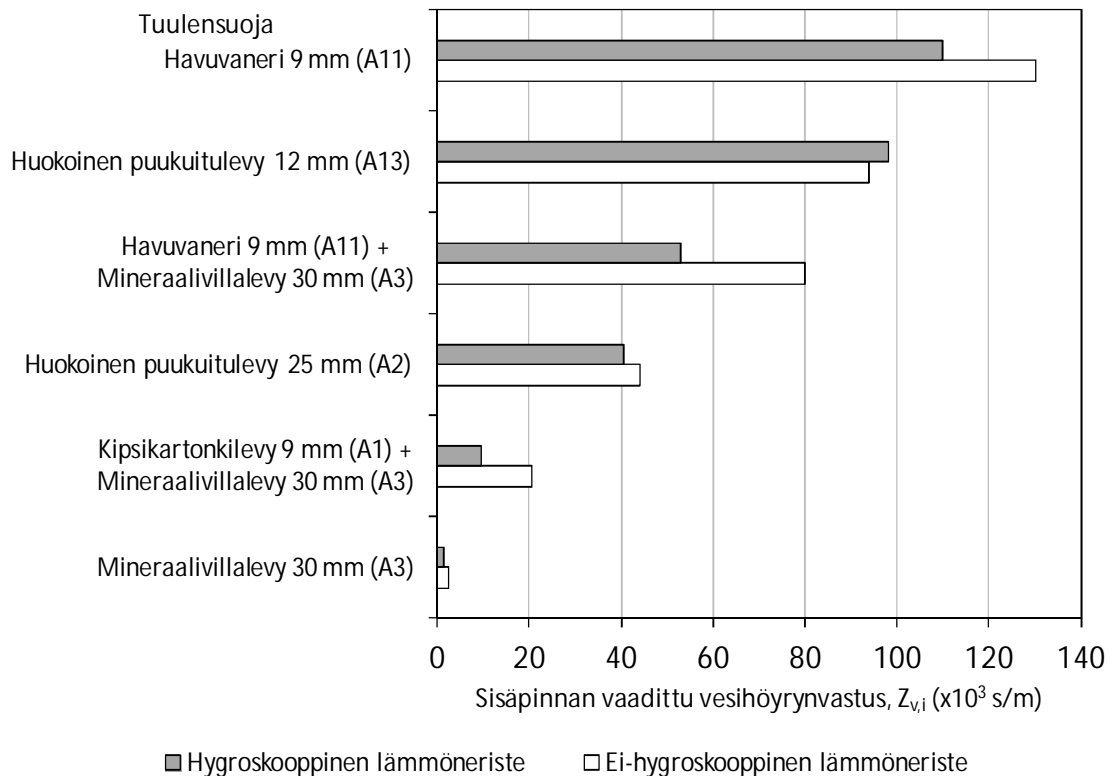


Kuva 6.31. Havuvaneri-tuulensuojan huokosilman suhteellinen kosteus ja lämpötila lämmityskauden (1.9-31.5) aikana.

Jäätymisalueella diffuusiolla siirtyvä vesihöyry härmistyy tuulensuojalevyn sisäpintaan, jolloin tuulensuojan vesihöyrynvastus kasvaa. Tätä ei ole kuitenkaan otettu huomioon laskennassa. Vaaditut vesihöyrynvastuksen minimiarvot vuoden 2100-ilmastossa on esitetty kuvassa 6.32 pylväsdigrammina. Kaaviosta nähdään, että lämmöneristeen kosteuskapasiteetin lisäämisellä voidaan pääsääntöisesti pienentää sisäpinnalta vaadittavaa vesihöyrynvastusta. Poikkeuksena on rakenne, jossa käytetään tuulensuojana 12 mm paksua puukuitulevyä. Tältä rakenteelta vaaditaan hygroskooppista lämmöneristettä käytettäessä suurempaa sisäpinnan vesihöyrynvastusta, kuin jos lämmöneristeenä käytettäisiin ei-hygroskooppista eristettä. Myös tuulensuojan lämmöneristävyuden parantaminen pienentää sisäpinnalta vaadittavaa vesihöyrynvastusta.

Käytettäessä tuulensuojana hyvin vesihöyryä läpäisevää ja lämmöneristävää mineraalivillalevyä ($R > 0,5 \text{ m}^2\text{K/W}$), on sisäpinnan vesihöyrynvastuksen oltava vähintään $2,5 \times 10^3 \text{ s/m}$ ($0,34 \times 10^9 \text{ m}^2\text{sPa/kg}$), jotta homeen kasvua ei ulkoseinärakenteen ulko-osissa esiintyisi. Muilla hyvin vesihöyryä läpäisevillä tuulensuojalevyillä, joiden lämmönvas-

tus on pienempi kuin $0,5 \text{ m}^2\text{K/W}$, on sisäpinnan vesihöyryvastus riittävä silloin, kun se on vähintään $98 \times 10^3 \text{ s/m}$ ($13,4 \times 10^9 \text{ m}^2\text{sPa/kg}$).



Kuva 6.32. Sisäpinnalta vaadittu vesihöyryvastuksen minimiarvo erilaisilla tuulensuojilla, käytettäessä lämmöneristeenä hygroskooppista tai ei-hygroskooppista lämmöneristettä.

Kuvasta 6.32 havaitaan, että muovitiivistyspaperit, joiden vesihöyryvastus on $\geq 130 \times 10^3 \text{ s/m}$ ($13,7 \times 10^9 \text{ m}^2\text{sPa/kg}$), ovat riittävän vesihöyrytiivitä kaikissa lasketuissa tapauksissa. Läpäisevämpää bitumivuorauspaperia, jonka vesihöyryvastus on välillä $3,5\text{-}7 \times 10^3 \text{ s/m}$ ($0,5\text{-}1,0 \times 10^9 \text{ m}^2\text{sPa/kg}$), voidaan käyttää ainoastaan silloin, kun tuulensuojana käytetään hyvin lämpöä eristävää ja vesihöyryä läpäisevää mineraalivillalevyä. Tiiviiden ja homehtumiselle herkempien tuulensuojien kosteusteknistä toimivuutta voidaan parantaa sijoittamalla levyn ulkopintaan erillinen lämmöneristys. Lisälämmöneristys pienentää seinärakenteen sisäpinnalta vaadittavaa vesihöyryvastusta ja parantaa rakenteen kuivumiskykyä. Myös huonosti lämpöä eristävä tuulensuojakipsilevy toimii yhdistelmä rakenteessa siten, että seinärakenteen ulko-osissa ei esiinny homeen kasvua.

Tuulen aiheuttama konvektio ei heikennä merkittävästi lisälämmöneristeen lämmönvastusta, jolloin tuulensuojan ulkopuolinen mineraalivillaeläeriste toimii lämpötekniisesti yhtä tehokkaasti kuin, jos koko lämmöneristys olisi tuulensuojan sisäpuolella. Ulkopuolisen lämmöneristeen tulee olla myös suhteellisen ohut ($< 50 \text{ mm}$), jotta se ei aiheuta lisävas-

tusta kuivumisessa. Ulkopuolelta 30 mm mineraalivillakerroksella lisäeristetyn havuvanerituulensuojarakenteen kuivumisnopeus on samaa luokkaa, kuin rakenteella, jonka ulkopinnassa on huokoinen puukuitulevy tuulensuojana. Kuitulevyn ollessa jäätymisalueella on lisäeristetyn havuvanerirakenteen kuivuminen jopa tätä nopeampaa. (Ojanen et al. 1997)

Tuulensuojan vesihöyrynvastuksen maksimiarvon määrittäminen on vaikeaa, koska se riippuu tuulensuojan lämmöneristävydestä. Materiaalien vesihöyrynvastuksia vertaamalla voidaan kuitenkin päätellä, että tuulensuojan vesihöyrynvastuksen tulisi olla pienempi kuin 5×10^3 s/m ($0,68 \times 10^9$ m²sPa/kg), jotta sisäosista diffuusiolla siirtyvä kosteus ei haitallisesti kerääntyisi tuulensuojalevyn sisäpintaan. Vinha (2007) on myös päätenyt tähän samaan arvoon aiemmassa tutkimuksessaan.

Hygroskooppinen lämmöneristys tulisi asentaa seiniin märkäpuhalluksena, koska kuivana puhalletun puukuitueristeen on todettu painuvan suurillakin seinissä käytetyillä eristetiheyksillä. Puukuitueristeissä seinissä lämmöneristykseen kosteusvaihtelut ovat merkittävin painumista aiheuttava tekijä (Nieminen 1989).

7 YHTEENVETO

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin puurunkoisten ulkoseinien kosteusteknistä toimivuutta nykyilmastossa ja tulevaisuuden ilmastoissa lämmitetyissä asuinrakennuksissa Suomessa. Seinärakenteet oletettiin ilmatiiviiksi, jolloin sisäilman vuotovirtauksista aiheutuvia kosteuskuormituksia ei laskennassa otettu huomioon. Ulkoilman olosuhteina käytettiin mitoitusvuosien ilmastoja, jotka oli määritetty neljän paikkakunnan (Vantaa, Jokioinen, Jyväskylä ja Sodankylä) 30 vuoden ilmastodataista. Ilmatieteen laitos oli lisäksi määrittänyt samoille paikkakunnille tulevaisuuden ilmastot, joiden perusteella määritettiin mitoitusvuodet myös vuosien 2050- ja 2100-ilmastoissa.

Rakennusfysikaalisten laskentavuosien valinnassa käytettiin 90 % kriittisyystasoa, jonka mukaan enintään 10 % kokonaisotannasta oli valittua vuotta kriittisempiä. Kriittisten vuosien valintakriteereinä oli kosteuden kondensoituminen ja homeen kasvun riski materiaaleissa ja niiden rajapinnoissa. Homeen kasvun riskiä tarkasteltiin VTT:n ja TTY:n yhteistyössä laatimalla homeen kasvun laskentamallilla, joka on tällä hetkellä kansainvälisestikin tunnetuin homeen kasvua simuloiva malli. Laskentamalli perustuu visuaalisiin havaintoihin, joten se ei kuvaa homehtumisen terveystarpeita. Tämän takia tässä tutkimuksessa asetettiin homeen kasvun raja-arvoksi nollassa ($M_{\max} < 1$) eli homeen kasvua ei hyväksytty rakenteessa valituissa tarkastelupisteissä. Tuulensuojan ulkopinnassa sitä vastoin sallittiin ulkoilmasta johtuva luonnollinen homeen kasvu.

Ulkoseinärakenteen kosteusteknistä toimivuutta ja homehtumisriskiä tarkasteltiin vallitsevassa ilmastossa tunnin aika-askeleella tehdyillä laskentatarkasteluilla. Sisäilman kosteuskuormituksena käytettiin aikaisemmin TTY:llä yli 100:sta asuinrakennuksesta mitattua ulkoilman lämpötilasta riippuvaa kosteuslisän arvoa kosteusluokassa 1. Tämän mukaisesti kosteuslisä sisäilmassa oli 5 g/m^3 , kun ulkoilman lämpötila oli $\leq 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ja se muuttui lineaarisesti tasolle 2 g/m^3 , kun ulkoilman lämpötila nousi 5°C :sta 15°C :een. Sisäilmassa käytettiin koko laskentajakson aikana vakioämpötilaa, $21 \text{ }^\circ\text{C}$, joka edusti aikaisemmista kenttämittauksista mitattua 90 % kriittisyystasoa.

Vuosien kriittisyystaso riippui seinärakenteesta, erityisesti sen kosteuskapasiteetista ja vesihöyrynläpäisevyydestä. Laskentavuodeksi valikoitui sadevettä imeville julkisivuverhouksille Vantaan vuoden 2007 ilmasto ja vesitiiviille/sadevettä huonosti imeville verhouksille Jokioisen vuoden 2004 ilmasto. Puuverhotuissa rakenteissa kriittisin oli pohjoinen julkisivu, jossa auringon lämpösäteilyn vaikutus oli vähäisempää kuin eteläisivulla. Tiiliverhouksissa ja rapatuissa rakenteissa auringonsäteily puolestaan tehosti

kosteuden haihtumista ja sen siirtymistä diffuusiolla seinän sisäosiin, jonka takia etelän puoleinen julkisivu oli näissä rakenteissa kriittisempi.

Kirjallisuustutkimuksen ja laskenta-analyysien perusteella päädyttiin käyttämään pohjoisen puoleisissa puuverhotuissa julkisivuissa ilma- ja ilmanvaihtuvuutena arvoa 500 l/h ja etelän puoleisissa tiilijulkisivuissa 10 vaihtoa tunnissa. Kevytrakenteisissa verho- uksissa otettiin huomioon niiden pienen lämpökapasiteetin takia taivaan tehollisen läm- pötilan vaikutus kirkkaina öinä. Kriittisimmät pisteet seinärakenteen toiminnan kannalta olivat tuulensuojan sisäpinta ja höyrynsulun ulkopinta. Sisäpuolista vaakakoolausta käy- tettäessä myös höyrynsulun sisäpinnalle muodostui tietyissä tapauksissa rakenteen toi- minnan kannalta kriittiset olosuhteet.

Lämmöneristyksen lisääminen alentaa vaipparakenteiden ulko-osan lämpötilaa, jolloin homeen kasvu ja kosteuden kondensoitumisriski ulko-osassa lisääntyy. Ilmastonmuutos heikentää rakenteiden kosteusteknistä toimintaa entisestään ja lisää homeen kasvua ra- kenteiden ulko-osissa. Tuulensuojakalvoa käytettäessä runkotolpan ulkopinnassa esiin- tyy voimakasta homeen kasvua vuoden 2100 ilmastossa. Laskelmien mukaisesti hyvin vesihöyryä läpäisevän tuulensuojan lämmönvastuksen tulisi olla pääsääntöisesti vähin- tään 0,2 m²K/W. Havuvaneri muodostaa tässä asiassa kuitenkin poikkeuksen. Vaikka havuvanerin lämmönvastus on alhainen, sen muuttuva vesihöyrynvastus ja suuri koste- uskapasiteetti mahdollistavat sen käytön rakenteessa tuulensuojana. Homeindeksi pysyy havuvaneri-rakenteessa matalana, eikä runkorakenteen ulkopintaan muodostu homeelle otollisia olosuhteita. Jos rakenteessa halutaan käyttää levyjäykisteenä homehtumisher- kää kipsilevyä, on sen ulkopuolelle sijoitettava hyvin lämpöä eristävä tuulensuojalevy, jotta homeen kasvua ei mineraalivillan ulko-osissa esiintyisi vuoden 2100-ilmastossa. 30 mm mineraalivillatuulensuoja levyrakenteen ulkopuolella nostaa rakenteen lämpöti- laa ja parantaa sen kuivumispotentialiaa.

Nykyilmastossa ja tulevaisuuden ilmastoissa kosteusvirran suunta on puuverhotuissa seinärakenteissa tyypillisesti rakenteen sisäosista ulospäin, jolloin haitallista kesäkon- denssi- ja homeriskiä ei seinärakenteiden sisäosissa esiinny ja höyrynsululla varustettu rakenne toimii käytetyistä materiaaleista ja vuodenaikasta riippumatta ulkoseinässä kos- teusteknisesti oikein. Höyrynsulun käyttö on myös tehokkain tapa pienentää sisäilmasta diffuusiolla siirtyvää kosteusvirtaa ja siten myös rakenteen ulkopinnan kosteus- ja ho- meaurioriskiä.

Ilmaston lämpeneminen ja lisääntyvä saderasitus heikentävät tiiliverhottujen rankara- kenteisten ulkoseinien kosteusteknistä toimivuutta. Tiilimuurauksen suuri vedenimuky- ky, lämpökapasiteetti ja pieni ilmanvaihtuvuus muodostavat tuuletusraon taakse olosu- teet, joissa homeen kasvu on mahdollista. Matalassa tiiliverhotussa (< 10 m) rankasei- nässä homeen kasvu voidaan estää käyttämällä hyvin lämpöä eristävää mineraalivilla- tuulensuojaa, homeelle kestävämpää runkomateriaalia tai puurungon ulkopinnassa esi-

merkiksi ristiinkoolattua metallirankaa. Yli 10 metriä korkeassa tiiliverhotussa rankaseinässä homeen kasvua sitä vastoin esiintyy paksuimmallakin markkinoilla olevalla mineraalivillatuulensuojalla (100 mm) runkorakenteesta riippumatta. Homeen kasvu voidaan korkeassa tiiliverhotussa rakennuksessa estää vain käyttämällä tiiliverhouksen takana tiivistä vettä ja vesihöyryä pidättävää rakennekerrosta siten, että sen ulko- ja sisäpuolelle muodostetaan tuulettuva ilmakerros. Tällainen rakenne estää ulkopuolelta diffuusiolla siirtyvän kosteuden siirtymisen seinän sisempään osaan, jolloin rakenteen kosteustekninen toiminta paranee. Suojakerros toimii rakenteessa myös rakennusaikaisena sadesuojana. Rakenteen riittävä tuulettuminen on kuitenkin varmistettava seinärakenteen ylä- ja alaosasta.

Paksu kalkkisementtirappaus imee runsaasti vettä viistosateen aikana. Rappauspintaan imeytyneet kosteudet siirtyvät auringonsäteilyn vaikutuksesta diffuusiolla rakenteen sisäosiin aiheuttaen siellä homeen kasvua. Homeen kasvua esiintyy niin matalassa kuin korkeasakin rakennuksessa. Tiiviillä pinnoitteella tai sementtiseidainisella ohutrappauksella päällystettyyn rakenteeseen muodostuu viistosateen aikana vesikalvo, jolloin rakenteen sisään voi kulkeutua suuriakin määriä kosteutta halkeamien, liitosten ja epätiivien saumojen kautta. Eristerapatussa seinässä kosteusvuoto ei näy ulospäin. Kosteusvuoto aiheuttaa eristerapattun rakenteen sisäosiin homeelle otolliset olosuhteet käytetystä rappausjärjestelmästä riippumatta. EPS-eristeen käyttö rappausalustana pahentaa tilannetta entisestään, koska rakenteen ulkopinnan vesihöyrynvastus kasvaa ja siten ulkoseinän kuivuminen heikkenee. Rapattu pintarakenne on suositeltava erottaa sisemmästä seinäosasta kuivumisen mahdollistavalla tuuletusraolla.

Levyrapatussa rankaseinässä sateenpitävän vaipan muodostaa erillinen ulkoverhous ja ilmanpitävyydestä huolehtii sisempi seinän osa, joka on hyvin vesihöyryä läpäisevä. Kun rakenteessa käytetään lämmöneristävää ja hyvin vesihöyryä läpäisevää tuulensuojaa, rakenne toimii kosteusteknisesti oikein, eikä homeita seinärakenteessa esiinny. Levyrapattu rankaseinä kuivuu mahdollisen kosteusvuodon sattuessa nopeasti, eikä kosteus kerääntä haitallisesti rakenteisiin.

Puurunkoisissa ulkoseinissä höyrynsulku asennetaan ilmatiiviysvaatimusten takia yleensä 50 mm syvyyteen seinärakenteen sisäpinnasta, jolloin rakennuksen sähköasennukset voidaan tehdä höyrynsulkua rikkomatta. Kriittisin kohta kosteuden kondensoitumisen ja homeen kasvun kannalta on tällaisessa rakenteessa runkotolpan alueella, jossa kylmäsiirtovaikutus on suurimmillaan. Lämmöneristeen vahvuinen puurunko johtaa lämpöä selvästi tehokkaammin kuin ympärillä oleva lämmöneriste ja viilentää höyrynsulun pintaa, jolloin olosuhteet muuttuvat höyrynsulun sisäpinnalla homeen kasvun kannalta otollisiksi. Homeen kasvu ja kosteuden kondensoitumisriski höyrynsulun sisäpuolella voidaan eliminoida käyttämällä rakenteessa kuitulevyuumaista runkotolppaa, eriytettyä runkoa, ulkopuolista ristikoolausta tai pystysuuntaista sisäpuolista koolausta kantavia runkotolppia vasten. Muussa tapauksessa tuulensuojana on käytettävä hyvin

lämpöä eristävää mineraalivillaa, jonka lämmönvastus on vähintään $0,8 \text{ m}^2\text{K/W}$, jotta homeen kasvua ei esiintyisi sisäpuolisen vaakakoolauksen ulkopinnassa ulkoseinärakenteissa, joiden U-arvo on $\leq 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Vaakasuuntaista sisäpuolista koolausta käytettäessä noin 80 % seinärakenteen lämmöneristeestä tulisi sijaita höyrynsulun ulkopuolella. Pystysuuntaista koolausta käytettäessä samanlaista vaatimusta ei ole.

Nykmääräyksen (RakMk C2 1998) mukainen seinärakenteen sisä- ja ulkopinnan välinen vesihöyrynvastussuhde 5:1 ei ole riittävä, kun tuulensuojan lämmönvastus on pienempi kuin $0,8 \text{ m}^2\text{K/W}$. Pienemmän lämmönvastuksen omaavilla tuulensuojalevyillä vaadittu vesihöyrynvastus vaihtelee alueella 10:1-40:1 käytetystä lämmöneristeestä ja tuulensuojasta riippuen. Muovitiivistyspaperit ($\geq 13,7 \times 10^9 \text{ m}^2\text{sPa/kg}$) ovat riittävän tiiviitä höyrynsulkuja kaikissa lasketuissa rakenteissa. Lämpäisempää ilmasulkupaperia, jonka vesihöyrynvastus on $0,5-1,0 \times 10^9 \text{ m}^2\text{sPa/kg}$, voidaan käyttää ainoastaan silloin, kun tuulensuojana käytetään hyvin vesihöyryä läpäisevää ja lämmöneristävää tuulensuojaa ($R \geq 0,8 \text{ m}^2\text{K/W}$). Mikäli sisäilman kosteus on normaalia huoneilmaa korkeampi, on ulkoseinässä käytettävä höyrynsulku tai muuta vastaavaa tiivistä kerrosta. Hygroσκοoppinen lämmöneriste hidastaa rakenteen kostumista syksyllä ja kuivumista keväällä. Hygroσκοoppisen lämmöneristeiden käytöllä voidaan kuitenkin yleensä pienentää jonkin verran seinärakenteelta vaadittavaa vesihöyrynvastussuhdetta.

LÄHTEET

Absetz, I. & Viljanen, M. 1985. Kapillaarinen kosteuden siirtyminen rakenteissa. Espoo, Teknillinen korkeakoulu, Rakennetekniikan laitos. Julkaisu 75. 117 s. + 2 liites.

Alakulju, Aila. Kehityspäällikkö, Saint.Gobain Weber Oy. Sähköposti- ja puhelinkeskustelu 25.11.2011.

Angervo, J. M.. 1948. Sääopin perusteet. Werner Söderström osakeyhtiö. Porvoo. 457 s.

Björkholtz, D. 1987. Ulkoseinien kastuminen ja kuivuminen. RIL K76, Kosteus rakennusteknisenä ongelmana. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL. Sivut 141-148.

Björkholtz, D. 1990. Rakennuksen kuivattaminen. Tampere, Suomen Rakennusteollisuusliitto r.y. 76 s.

Björkholtz, D. 1997. Lämpö ja kosteus, rakennusfysiikka. 2. painos, Rakennustieto Oy. 150 s.

Blocken, B. & Carmeliet, J. 2004. A review of wind-driven rain research in building science. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 92. Elsevier Ltd. Pp. 1079-1130.

Bomberg, M. Moisture Flow Through Porous Building Materials. 1974. Report 52. Sweden, Lund Institute of Technology. 188 p.

BY 57. 2011. Eriste- ja levyrappaus. Lahti. Suomen betoniyhdistys r.y. 200 s.

Decareau, C. P., Kan, L. & Piñon, J. P. 2007. Inputs and Analyses: An End User's Perspective of Heat-Air-Moisture Data. *Journal of ASTM International*, Vol. 4, No. 8. Paper ID JAI100332. 7p.

DIN 4108-3. 1981. Wärmeschutz im Hochbau, Berechnungsverfahren. Deutsches Institut für Normung. 16 p.

DIN 52617. 1987. Wärmeschutz im Hochbau, Berechnungsverfahren. Deutsches Institut für Normung. 16 p.

EN 1745. 2002. Masonry and masonry products – Methods for determining design thermal values. Brussels, European Committee for Standardization. 65 p.

Evrard, A. & Herde, A. D. 2010. Hygrothermal Performance of Lime-Hemp Wall Assemblies. *Journal of Building Physics*, Vol. 34, No 1 – July 2010. Pp 5-25.

Finch, G., Straube, J. 2007. Ventilated Wall Claddings: Review, Field Performance and Hygrothermal Modeling. *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings International Conference*. December 2-7, 2007, Clearwater Beach, Florida. 16 p.

Ge, H. & Ye, Y. Investigation of Ventilation Drying of Rainscreen Walls in the Coastal Climate of British Columbia. *ASHRAE*. 10 p.

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

Harsia, P. 2009. Lämpökäyttö. Sähkölämmityksen peruskurssi [verkkajulkaisu]. Virtuaaliammattikorkeakoulu. [Viitattu 29.8.2011] Saatavissa: www.amk.fi/opintojaksot/0505015/1119948180490.html.

Heljo, J., Nippala, E., Nuutila, H. 2005. Rakennusten energian kulutus ja CO₂-ekv päästöt Suomessa. Ympäristöklusterin tutkimusohjelma. Rakennuskannan ekotehokkaampi energiankäyttö (EKOREM)-projekti. Loppuraportti 2005:4. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakentamistalouden laitos. 56 s. + liitteet.

Hemmilä, M. 1988. Ulkoseiniin kohdistuvat rasitukset ja rakenteen fysikaalinen toiminta. RIL K91. Rakennusten ulkoseinä- ja kattorakenteet. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry. s. 37-62.

Hemilä, S. & Utriainen, J. 1989. Lämpöoppi. Suomen Fyysikköseuran julkaisuja 3. Jyväskylä, Fysiikan Kustannus Oy. 189 s.

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

Husman, T., Roto, P., Seuri, M. 2002. Sisäilma ja terveys – tietoa rakentajille. Kuopio, Kansanterveyslaitos. 42 s.

Hyland, R. W. & Wexler, A. 1983. Formulations for the Thermodynamic Properties of the Saturated Phases of H₂O from 173.15 K to 473.15 K. *ASHRAE Transactions*. Vol. 89, Part 2A. Atlanta, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Pp. 500-519.

IEA Annex 24. 1996. Heat, Air and Moisture Transfer Through New and Retrofitted Insulated Envelope Parts (Hamtie). Task 2: Environmental conditions. Building Research Establishment. Belgium, Scottish Laboratory. 95 p.

Iivonen, P. & Viljanen, M. 1984. Lämmön siirtyminen konvektiolla rakennuksen vaipan pinnoilla. Espoo, Teknillinen korkeakoulu, Rakennetekniikan laitos. Julkaisu 68. 88 s.

Iivonen, P. 1987. Tuuletusraot ja niiden toiminta. RIL K76, Kosteus rakennusteknisenä ongelmana. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL. Sivut 149-168.

Ilmatieteen laitos. 2010. Suomen ilmaston tulevat muutokset mallitulosten perusteella [viitattu 14.6.2011]. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/suomen-ilmaston-tulevat-muutokset-mallitulosten-perusteella>.

Ilmatieteen laitos 2011. Suomen nykyilmasto ja ilmastotilastot [viitattu 2.8.2011]. Saatavilla: <http://ilmatieteenlaitos.fi/suomen-nykyilmasto-ja-ilmastotilastot>.

ISO 6946. 2008. Rakenne- ja rakenneosat. Lämmönvastus ja lämmönläpäisykerroin. Laskentamenetelmä. Suomen standardisoimisliitto. 31 s.

ISO 10211. 2007. Thermal bridges in building construction – Heat flows and surface temperatures construction – Detailed calculations. Brussels, European Committee for Standardization. 45 p.

ISO 12572. 2001. Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties. Brussels, European Committee for Standardization. 32 p.

ISO 13788. 2001. Hygrothermal performance of building components and building elements – Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation – Calculation methods. Brussels, European Committee for Standardization. 36 p.

ISO 15927-1. 2003. Hygrothermal performance of building – Calculation and presentation of climatic data – Part 1: Monthly means of single meteorological elements. Brussels, European Committee for Standardization. 29 p.

Isoaho, S. & Valve, M. 1986. Vesikemian perusteet. Toinen tarkistettu painos. Helsinki, Otakustantamo. 264 s. + 9 liites.

Jansson, A., Mjörnel, K. & Samuelson. 2007. Fuktskador I putsade, odränerade träregelväggar – lägesrapport oktober 2007. SP Rapport 2007:36. SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut. Båras 2007. 19 s.

Jantunen, J., Holmijoki, O., Viljanen, M. 1986. Lämmön siirtyminen rakenteissa. Esimerkkitapauksia I. Julkaisu 70. Helsinki, Teknillinen korkeakoulu, Rakennetekniikan laitos. 79 s.

Karagiozis, A. N., Kuenzel H. M. 2009. The Effect of Air Cavity Convection on the Wetting and Drying Behaviour of Wood-Frame Walls Using a Multi-Physics Approach. *Journal of ASTM International*, Vol. 6, No. 10. 15 p.

Kehl, D, Hauswirth, S. & Weber, H. 2009. Is ventilation of timber facades essential? Research report. University of Applied Science, Switzerland.

Kilpeläinen, Tapio. Tutkimus- ja kehityspäällikkö, Thermisol Oy. Puhelinkeskustelu 24.11.2011.

Kokko, E., Ojanen, T., Salonvaara, M. 1997. Uudet vaipparakenteet, Energian säästö ja kosteustekniikka. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 1896. 90 s.

Kokko, E., Ojanen, T., Salonvaara, M., Hukka, A. & Viitanen, H. 1999. Puurakenteiden kosteustekninen toiminta. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 1991. 160 s.

Koponen, H. 1991. Massan ja lämmön siirtymisen perusteet puussa ja puutuotteissa. Osa II. Kosteusliikkeet puun kapillaareissa, lämpötilagradientin vaikutuksesta ja puun rajapinnassa sekä lämmön johtuminen. Helsinki, Teknillinen korkeakoulu. Puunjalostustekniikan laitos. Tiedonanto 1991/58. 59 s.

Koronthályová, O. & Matiasovský. 2000. Driving Rain Course Simulation Based on Daily Data. *Journal of Thermal env. & Bldg. SCI.*, Vol. 25. Technomic Publishing Co. Pp. 51-66.

Künzel, H. M. 1994. Vefahren zur ein-und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation Universität Stuttgart. 68 Seiten.

Künzel, H.M. 1995. Simultaneous heat and moisture transport in building components, One and two-dimensional calculation using simple parameters. Stuttgart, IRB Verlag, Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau. 102 p. + tables and figures.

Künzel, M.M., Karagiozis, A., Holm, A. 2000. User's Guide. Windows Program for WUFI-ORNL/IBP Model. Fraunhofer Institute for Building Physics. P. 99.

Lacy, R. E. 1965. Driving-Rain Maps and the Onslaught of Rain on Buildings. Proceedings of RILEM/CIB Symposium on Moisture Problems in Buildings, Helsinki.

Lehtinen, T. & Viljanen, M. 1989. Tiilijulkisivuisen seinärakenteen toiminnan varmistaminen viistosadetta vastaan. Julkaisu 16. Helsinki, Teknillinen korkeakoulu, Talonrakennustekniikka, Talonrakennustekniikan laboratorio. 52 s. + 6 liites.

Lehtinen, T. & Viljanen, T. 1994. Tiilirakenteiden kapillaarinen kosteuden siirtyminen sisätiloihin rajoittuvissa rakenteissa. Talonrakennustekniikan laboratorio. Julkaisu 44. Espoo, Teknillinen Korkeakoulu. 44 s. + 29 liites.

Lehtinen, T., Lehtonen, H. & Viljanen, M. 1997. Betonisandwich-ulkoseinien kosteustekninen käyttäytyminen. Julkaisu 70. Helsinki, Teknillinen korkeakoulu, Talonrakennustekniikan laboratorio. 79 s. + 46 liites.

Leivo, V. 1998. Opas kosteusongelmiin. Rakennustekninen, mikrobiologinen ja lääketieteellinen näkökulma. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, talonrakennustekniikka. Julkaisu 95. 158 s.

Manelius, E. Rapattujen ulkoseinien kosteustekninen toimivuus. 2011. Kandinaatintyö.

Meklin, T., Haatainen, S., Kauriinvaha, E., Kettunen, A.-V., Haverinen, U., Viljanen, M., Nevalainen, A. 1997. Kosteusvauriorakennuksesta otettujen rakennusmateriaalinäytteiden mikrobisto ja kosteuspitoisuudet. Sisäilmastoseminaari 19.3.1997. Sisäilmastoyhdistysraportti 8. Helsinki, Sisäilmastoyhdistys ry. Sivut 161-166.

Metiäinen. 1984. Kosteuden vaikutus rakenteisiin, kosteuden lähteet. Rakentajain kalenteri 1984. Helsinki, Rakentajan kustannus Oy. S.398-407.

Metsämäki, J., Heikkilä, S., Joensuu, J., Perttula, P., Mannila, P., Saarinen, S., Olli, T., Turpela, V., Polvi, A., Hautala, M., Hirviniemi, J., Valtari, J., Lehtinen, I., Tahvanpää, J., Matilainen, J. & Kotanen, R. 2001. Rannilan rakennejärjestelmät –käsikirja. Keuruu. Rannila Steel Oy. 967 s.

Mikkilä, A. 2001. Rakennusmateriaalien vesihöyrynläpäisevyydet eri kosteusolosuhteissa. Diplomityö. Tampere. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Rakennetekniikan laitos, Talonrakennustekniikka. 61 s. + 91 liites.

Mills, A.F. 1999. Basic Heat & Mass Transfer. 2nd ed., Upper Saddle River, Prentice Hall. 1000 p.

Nevander, L.E. & Elmarsson, B. 1994. Fukthandbok, Praktik och teori. 2nd ed. Stockholm, AB Svensk Byggtjänst. 538 p.

Nieminen, J. 1988. Rakennusta ympäröivä mikroilmasto. Mittauksia koetalosta. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT tiedotteita 880. 65 s. + 27 liites.

Nieminen, J. 1989. Höyrynsulun tarve puuseinässä. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Rakennetekniikan laboratorio. Tiedotteita 1050. Espoo. 60 s.

Nikkola, J., Viljanmaa, L., Virtanen, T. 1988. Laaja fysiikka I. 1.-7. painos. Vaasa, Kirjayhtymä. 295 s.

Ojanen, T., Kokko, E., Salonvaara, M. & Viitanen, H. 1997. Havuvanerirakenteiden kosteusteknisen toiminnan perusteet. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 1870. 90 s. + 2 liites.

Paajanen, L., Ritschkoff A.-C. & Viitanen, H. 1994. Lämmöneristeiden merkitys rakennusten biologisissa vaurioissa. VTT julkaisuja 791. Valtion teknillinen tutkimuskeskus VTT.

Paroc ulkoseinäratkaisut. Rakennuseristeet 2 – 3.20. Marraskuu 2008. 28 s. Saatavissa: www.paroc.fi.

Pasanen, A.-L., Rautiala, S., Ikäheimo, M., Kalliokoski, P., Kääriäinen, H., Rantamäki, J. 1998. Rakennusmateriaalien kostumistavan ja kuivumisen vaikutus mikrobikasvuston muodostumiseen ja elinkykyyn. Sisäilmastoseminaari 18-19.3.1998. Sisäilmastoyhdistysraportti 11. Helsinki, Sisäilmastoyhdistys ry. Sivut 147-152.

Pentti, M. & Hyypöläinen, T. 1999. Ulkoseinärakenteiden kosteustekninen suunnittelu. Rakennustekniikan osasto, talonrakennustekniikka. Julkaisu 94. Tampereen teknillinen korkeakoulu. 150 s. + 40 liites.

Puhakka, E., Bäck, S., Kalso, S., Vahanan, R., Viitanen, H., Arvela, H., Voutilainen, A., Ruotsalainen, R., Koukila-Kähkölä, P., Sarekoski, K., Kärkkäinen, J. 1996. Terveellinen sisäilma. Jyväskylän, Sisäilmatietokeskus. 243 s.

Rantamäki, J., Kääriäinen, H., Tulla, K., Viitanen, H., Kalliokoski, P., Keskikuru, T., Kokotti, H. & Pasanen A.-L. 2000. Rakennusten ja rakennusmateriaalien homeet. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus. VTT Tiedotteita 2030. 40 s. + 8 liites.

Rakennustutkimus RTS Oy. 2003. Omakotirakentaja 03/04. Värit.

Rakennustutkimus RTS Oy. 2011. Omakotirakentaja 11/12 suunnitteluvaiheen aineisto.
Rakennustutkimus RTS Oy, omakotitalot 2011/2012. Kesäkuu 2011.

RakMk C2. 1998. Kosteus, määräykset ja ohjeet 1998. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Helsinki, Ympäristöministeriö. 11 s.

RakMk C3. 2010. Rakennusten lämmöneristys, määräykset 2010. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Helsinki, Ympäristöministeriö. 10 s.

RakMk C4. 2003. Lämmöneristys, ohjeet 2003. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Helsinki, Ympäristöministeriö. 28 s.

Raunama, Tapio. Talonrakennussektorin johtaja, Finnmap Consulting Oy. Puhelin- ja sähköpostikeskustelut 7.2.2012 ja 10.2.2012.

Rautiala, S., Pasanen, A.-L., Rantamäki, J., Kalliokoski, P. 1997. Materiaalin kosteuden ja vauriokohdan etäisyyden vaikutus mikrobipitoisuuteen. Sisäilmastoseminaari 19.3.1997. Sisäilmastoyhdistysraportti 8. Helsinki, Sisäilmastoyhdistys ry. Sivut 143-148.

RIL 107-2000. 2009. Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry. 211 s.

RIL 155. 1984. Lämmön- ja kosteudeneristys. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry. 389 s.

Romu, Martti. Kehityspäällikkö, Wienerberger Oy Ab. Sähköposti- ja puhelinkeskustelu. 26.10.2011.

Romppainen, Ilkka. Tuotepäällikkö, Ekovilla Oy. Puhelinkeskustelu. 17.2.2012.

Rossi, V., Gabrielsson, J., Jaatinen, J., Kojonen, E., Olander, C.-J. & Ranta, O. 1967. Auringonsäteily ja sen merkitys teknillisissä ratkaisuissa. Julkaisu 32-66. Insinöörijärjestön koulutuskeskus. PAINOS 100. Tampere.

Saarimaa, J., Nieminen, J., Rautiainen, L., Ojanen, T. & Kohonen, R. 1989. Kosteuden siirtyminen rakenteissa. Rakennusaineiden kosteustekniset ominaisuudet. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT tutkimuksia 644. 98 s.

- Salonvaara, M. & Kokko, E. 1999. Sellukuiturakenteiden lämmön- ja aineensiirtotekninen toiminta. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT tiedotteita 1946. 51 s.
- Salonvaara, M., Karagiozis, A. & Holm, A. 2001. Stochastic Building Envelope Modeling – The Influence of Material properties. Proceedings of the DOE/ORNL/ASHRAE/BETEC/NRC/CIBCE Conference, Performance of Exterior Envelopes of Whole Building VIII: Integration of Building Envelopes, Clearwater Beach, Florida, USA, December 2-7. Session IIIA. 8 p.
- Seppänen, O., Säteri, J., Lehtinen, T., Nevalainen, A. 1997. Tavoitteena terve talo. Sisäilmastoyhdistysraportti 9. Espoo, Sisäilmastoyhdistys ry. 113 s.
- Siikanen, U. 1996. Rakennusfysiikka, perusteet ja sovellukset. Helsinki, Rakennustieto Oy. 219 s.
- Sisäilmastoluokitus 2008. 2008. Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. Sisäilmastoyhdistyksen julkaisu 5. Espoo, Sisäilmastoyhdistys ry. 43 s.
- Sosiaali- ja terveystieteiden tutkimuskeskus, STM. 1997. Sisäilmaohje. Asuntojen ja muiden oleskelutilojen fysikaaliset, kemialliset ja mikrobiologiset tekijät. Opas 1997:1. Helsinki. 72 s.
- Straaten, R. V. 2003. Measurement of Ventilation Drying of Vinyl Siding and Brick Clad Wall Assemblies. A thesis. University of Waterloo. Ontario, Canada. 182 p.
- Straube, J. & Burnett, E. 1995. Vents, Ventilation Drying, and Pressure Moderation. Research report. Building Engineering Group. University of Waterloo.
- Straube, J.F. & Burnett E.F.P. 1997. Driving Rain on Building Facades. CLIMA 2000. Brussels, Belgium. Pp. 297-313.
- Straube, J., VanStraaten, R., Burnett, E., Schumacher, C. 2004. ASHRAE 1091 – Development of Design Strategies for Rainscreen and Sheathing Membrane Performance in Wood Frame Walls. Review of Literature and Theory. Report #1. Building Engineering Group, University of Waterloo. 1150 p.
- Suomen Tuuliatlas. 2011. Tuulisuus Suomessa [verkkojulkaisu], [viitattu 16.8.2011]. Saatavissa: <http://www.tuuliatlas.fi/tuulisuus/index.html>
- Tietäväinen, Hanna. Tutkija. Ilmatieteen laitos. Sähköpostikeskustelu. 13.2.2012.
- Tilastokeskus. 2009. Asunnot ja asuinolot [verkkojulkaisu], [Viitattu 29.8.2011]. Saatavissa: <http://www.stat.fi/til/asas/index.html>

Tilastokeskus. 2011. Euroopan unionin kasvihuonepäästöt [viitattu 14.6.2011]. Saatavissa: http://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_eu_inventaario.html.

Tollander, Max. Tuotekehityspäällikkö, Knauf Oy. Sähköposti- ja puhelinkeskustelu 23-24.11.2011.

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2009. Energiatehokkuustoimikunnan mietintö: Ehdotus energiasäästön ja energiatehokkuuden toimenpiteiksi. Energiatehokkuustoimikunnan mietintö. Energia ja ilmasto [verkkójulkaisu]. 198 s. Saatavissa: http://www.motiva.fi/files/2714/Ehdotus_energiansaaston_ja_energiatehokkuuden_toimenpiteiksi.pdf

Vaisala. 2009. Kosteuden laskentakaavat ja suhteellisen kosteuden määritelmä. [Verkkójulkaisu] B210973FI-A. 17 s. Saatavissa: www.vaisala.com.

Veijalainen, N., Jakkila, J., Vehviläinen, B., Marttunen, M., Nurmi, T., Parjanne, A., Aaltonen, J., Dubrovin, T., Suomalainen, M. 2010. Suomen vesivarat ja ilmastonmuutos – vaikutukset ja muutoksiin sopeutuminen. Iijoen työraportti. Suomen Ympäristökeskus, Hydrologian yksikkö. 9 s. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=123375&lan=fi>.

Viitanen, H. 2000. Homeen kasvun malli ja homekriteeristö rakennusten kosteusongelmien tarkasteluun. Sisäilmastoseminaari 22-23.3.2000. Sisäilmastoyhdistysraportti 14. Helsinki, Sisäilmastoyhdistys ry. Sivut 131-136.

Viitanen, H. 2011. Erikoistutkija, VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Espoo. Puhelinkeskustelu 28.9.2011.

Viljanen, M. 1984. Lämmön siirtyminen säteilyllä rakennuksen vaipan pinnoilla. Helsinki, Teknillinen korkeakoulu, Rakennetekniikan laitos. Julkaisu 67. 130 s.

Viljanen, M., Kettunen, A.-V., Kauriinvaha, E., Bergman, J., Laamanen, P., Nevalainen, A., Hyvärinen, A., Meklin, T. 1997. Kosteus- ja homevaurioituneen rakennuksen kunto-tutkimus. Ympäristöopas 28. Helsinki, Ympäristöministeriö ja Rakennustieto Oy. 143 s.

Vinha, J. & Käkelä, P. 1999. Vesihöyryn siirtyminen seinärakenteissa diffuusion ja konvektion vaikutuksesta. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu. Rakennustekniikan osasto. Julkaisu 96. 81 s. + 29 liites.

Vinha, J., Käkelä, P., Kalamees, T. 2003. Puurunkoisten seinärakenteiden kosteustekni-
sen toiminnan vertailu omakotitalossa. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Ra-
kennustekniikan osasto. Tutkimusraportti 116. 54 s. + 11 liites.

Vinha, J., Valovirta, I., Korpi, M., Mikkilä, A. & Käkelä, P. 2005a. Rakennusmateriaa-
lien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona.
Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Talonrakennustekniikan laboratorio. Julkaisu
129. 101 s. + 211 liites.

Vinha, J., Korpi, M., Kalamees, T., Eskola, L., Palonen, J., Kurnitski, J., Valovirta, I.,
Mikkilä A. & Jokisalo, J. 2005b. Puurunkoisten pientalojen kosteus- ja lämpötilaolosuh-
teet, ilmanvaihto ja ilmatiiviys. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Talonraken-
nustekniikan laboratorio. Tutkimusraportti 131. 102 s. + 10 liites.

Vinha, J. 2007. Hygrothermal Performance of Timber-Framed External Walls in Finn-
ish Climatic Conditions: A Method for Determining the Sufficient Water Vapour Re-
sistance of the Interior Lining of a Wall Assembly. Tampere, Tampere University of
Technology. 338 p. + app. 10 p.

Vinha, J., Korpi, M., Kalamees, T., Jokisalo, J., Eskola, L., Palonen, J., Kurnitski, J.,
Aho, H., Salminen, M., Salminen, K. & Keto, M. 2009. Asuinrakennusten ilmanpitä-
vyys, sisäilmasto ja energiatalous. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Raken-
nustekniikan laitos, Rakennetekniikka. Tutkimusraportti 140. 147 s. + 19 liites.

Vinha, J., Viitanen, H., Lähdesmäki, K., Peuhkuri, R., Ojanen, T., Salminen, K., Paaja-
nen, L., Strander, T., Iiitti, H. 2012. Rakennusmateriaalien ja rakenteiden homehtumis-
riskin laskennallinen arviointi. Tutkimusraportti 143. Tampere. Tampereen teknillinen
yliopisto. (*Julkaistaan 2012*)

Virta, J. 2000. Puu-ulkoverhousien suunnittelu-, rakentamis- ja pintakäsittelyohje. Jul-
kaisu 104. 2. painos. Helsinki, Teknillinen korkeakoulu, Talonrakennustekniikan labo-
ratorio. 50 s.

Wienerberger. Julkisivutiilet [viitattu 10.8.2011]. Saatavissa:
<http://www.wienerberger.fi>.

Wufi Pro 5.1 Online help. PC Software Tool for One-dimensional Hygrothermal Build-
ing Envelope Simulation. Fraunhofer IBP.

Wufi Software. Application. Fraunhofer. [viitattu 14.7.2011]. Saatavissa:
http://www.wufi.de/index_e.html.

Zirkelbach, D. 2011. Department manager. Fraunhofer Institute for Building Physics. Germany. E-mail message 5 Oct 2011.

LIITTEET

LIITE 1

Pintojen säteilykertoimia 1 s.

LIITE 2

Materiaaliarvoja 6 s.

LIITE 3

Materiaalien tasapainokosteuskäyriä 4 s.

LIITE 4

Homeen kasvu puuverhotussa rankaseinässä 8 s.

LIITE 5

Homeen kasvu tiiliverhotussa rankaseinässä 8 s.

LIITE 6

Homeen kasvu eristerapatussa rankaseinässä 2 s.

LIITE 7

Homeen kasvu levyrapatussa rankaseinässä 2 s.

LIITE 8

Homeen kasvu ja kondenssi sisäpuolisessa koolauksessa 5 s.

LIITE 9

Höyrynsulun sijainnin vaikutus vaakakoolauksen homeindeksiin 1 s.

Taulukko 1. Pintojen emissiviteettejä. (Hagentoft 2001; Viljanen 1984)

Pinta	Emissiviteetti ϵ
Poltettu savitiili	0,91
Karkea tiili (punainen)	0,93
Kalkkihiekkatiili	0,90
Rappaus	0,90
Betoni	0,94
Lasi	0,94
Puu	0,90
Kattohuopa	0,92
Maalit, lakat	
- öljymaalit	0,94
- musta maali	0,8 - 0,97
- musta lakka	0,97
- valkoinen maali	0,85
- vaaleat värisävyt	0,90 - 0,97

Taulukko 2. Pintojen auringonsäteilyn absorptiokertoimia. (Hagentoft 2001; Viljanen 1984; Rossi et al. 1967; Wufi Pro 5.1)

Pinta	Absorptiokerroin α_{sol}
Betoni	0,70
Bitumi	0,93
Poltettu savitiili, keltainen	0,55
Poltettu savitiili, punainen	0,75
Poltettu savitiili, valkoinen	0,26
Poltettu savitiili, kerma	0,36
Kalkkihiekkatiili, vaalea	0,40
Kalkkihiekkatiili, tumma	0,60
Rappaus, valkoinen	0,30
Puu, käsittelemätön	0,40
Maalaus	0,94
- vaalean vihreä	0,50
- vaalean harmaa	0,75
- valkoinen	0,25
- keltainen	0,50
- vaalean punainen	0,50
- tumman punainen	0,70
- ruskea	0,80
- kerma	0,30
- vaaleat värisävyt	0,30 - 0,50

	Materiaali	Tiheys kg/m ³	Huok. m ³ /m ³	Om.lämp. J/kgK	Sorptiokäyrä w (kg/m ³), f(RH) [+23 °C]										
					0	33	55	65	75	80	83	86	93	97	100
A1	Kipsilevy GTS 9 mm	774	0.68	1100	0.0	6.1	8.4	9.0	9.5	10.8	11.5	13.5	18.2	23.8	500
A2	Runkoleijona 25 mm	280	0.85	1500	0.0	12.3	20.0	24.1	28.2	35.7	40.2	47.6	64.8	74.8	140
A3	Isover RKL 30 mm	73	0.94	850	0.0	0.51	0.58	0.60	0.62	0.91	1.1	1.6	2.9	3.3	4.1
A4	Isover RKL-EJ 25 mm	104	0.93	850	0.0	0.80	0.90	0.97	1.0	1.4	1.7	2.6	4.7	5.4	6.8
A5	Runkolevy TSL 30 mm	92	0.94	850	0.0	0.19	0.21	0.25	0.28	0.33	0.36	0.38	0.44	0.56	0.70
A6	Isorunkolevy IRL 30 mm	120	0.93	850	0.0	0.21	0.24	0.27	0.29	0.35	0.38	0.43	0.54	0.64	0.80
A7	Vital-levy 25 mm	63	0.95	2000	0.0	4.9	6.4	7.9	9.4	11.4	12.7	17.5	28.9	32.6	710
A8	Rakentajan kovalevy 4,8 mm	1140	(0.999) 0.60	1500	0.0	69.9	88.2	125	163	195	214	236	288	328	990
A9	Wilhelmi V3 13 12 mm	723	(0.80) 0.60	1500	0.0	43.7	60.4	82.8	105	127	140	149	170	197	760
A11	Wisa 3 ply 9 mm	394	0.65	1500	0.0	22.9	31.0	43.2	55.4	67.5	74.7	86.4	114	126	590
A12	Tuulensuojaluja 3,2 mm	1780	0.30	850	0.0	27.3	44.3	56.1	67.8	126	161	180	222	271	280
A13	Tuulileijona 12 mm	270	0.85	1500	0.0	12.4	19.6	22.4	25.2	33.6	38.7	45.9	62.7	71.3	210
B1	Paavo-tuulensuojalaminaatti 1 mm	360	0.60	1500											
B2	Tyvek Soft-diffuusiokalvo 1 mm	250	0.60	1500											
B3	Elwitek 4440-tuulensuojalam. 1 mm	230	0.60	1500											
B4	Elwitek 5550-tuulensuojalam. 1 mm	390	0.60	1500											
B5	Paavo-bitumivuorauspaperi 1 mm	940	0.60	1500											
B6	Paavo-bitumivuuraukstreppi 1 mm	540	0.60	1500											
B7	Paavo-bitumivuurauhuopa 1 mm	860	0.60	1500											
B8	Bitupap 125-bitumivuurauspap. 1 mm	840	0.60	1500											
B9	Bitukrep 125-bitumivuurauspap. 1 mm	620	0.60	1500											
C1	Kipsilevy GN 13 mm	574	0.77	1100	0.0	4.6	6.3	6.7	7.1	8.0	8.6	10.1	13.5	17.7	371
C2	Huokoleijona 12 mm	234	0.85	1500	0.0	10.4	16.9	19.8	22.7	29.5	33.6	39.8	54.2	62.2	148
C3	Wilhelmi 12 mm	592	(0.999) 0.65	1500	0.0	34.9	49.1	69.1	89.1	106	116	128	158	172	990
C5	Luja A 8 mm	1170	0.30	850	0.0	17.9	29.0	36.7	44.4	82.7	106	118	146	178	180
C6	Eitete OSB 3 12 mm	646	(0.9) 0.65	1500	0.0	37.1	53.0	72.9	92.7	110	121	133	162	183	840
C7	Paavo-muovitiivistyspaperi 1 mm	940	0.30	2000											
C8	Vahattu voimapaperi, UG-voima 1 mm	880	0.30	1500											
C9	PE-PAP 125-muovitiivistyspap. 1 mm	760	0.30	2000											
C10	Bitumipaperi 1 mm	740	0.60	1500											
C11	Höyrynsulkumuovi 1 mm	980	0.001	2300											
C12	Ruskea rakennuspaperi 1 mm	750	0.60	1500											
C13	Mänty 10 mm	532	(0.9) 0.78	2700	0.0	32.3	45.0	62.6	80.1	97.5	108	126	169	185	870
C14	Eit-Kraft VCL 1 mm	600	0.60	1500											
C15	EkoPaavo 1 mm	990	0.60	1500											
D1	Isover KI-C 50 mm	22	0.98	850	0.0	0.45	0.54	0.66	0.78	0.98	1.1	1.3	1.9	2.4	3.0
D2	Isolevy IL 50 mm	37	0.97	850	0.0	0.15	0.23	0.33	0.43	0.53	0.59	0.62	0.69	0.93	1.2
D3	Vital 50 mm	51	0.95	2000	0.0	2.8	3.8	4.8	5.7	7.3	8.2	11.3	18.5	22.2	650
D4	Ekovilla 50 mm (irtoeriste, puhál.)	37	0.97	2000	0.0	1.9	3.1	4.0	4.8	6.1	6.8	8.6	12.9	15.2	440
D4a	Ekovilla 50 mm (irtoeriste, sullottu)	60	0.95	2000	0.0	3.1	5.0	6.4	7.8	9.8	11.0	14.0	20.9	24.6	570
D5	Pellavaeriste, T ³ 50 mm	39	0.97	2000	0.0	1.8	2.7	3.2	3.7	5.0	5.7	8.6	15.3	17.6	94
D6	Sahanpuru 50 mm (irtoeriste)	168	0.87	2500	0.0	10.7	16.2	19.9	23.6	28.4	31.2	34.4	42.0	47.5	720
D7	Kutterinlastu 50 mm (irtoeriste)	130	0.90	2500	0.0	7.8	11.8	14.5	17.1	20.7	22.8	25.5	31.8	36.3	540
D67	Sahanpuru + kutterinlastu 50 mm (irto)	149	0.89	2500	0.0	9.3	14.0	17.2	20.3	23.2	24.9	28.5	36.9	41.9	630
D8	Hamppueriste 50 mm (irtoeriste)	60	0.95	2000	0.0	2.9	4.2	5.5	6.8	9.2	10.7	11.9	14.6	18.1	480
D9	Hamppueriste 50 mm (irtoeriste)	40	0.95	2000	0.0	2.0	2.8	3.7	4.6	6.2	7.2	8.0	9.8	12.0	320
H2	Hamppueriste 50 mm	42	0.95	2000	0.0	1.8	2.7	3.7	4.7	6.4	7.4	8.1	9.7	12.0	330
P1	SPU-levy 10 mm	39	0.95	1500											

= mitattu arvo
 = mitatusta arvosta laskennallisesti arvioitu arvo
 = kirjallisuudesta otettu/ arvioitu arvo

	Materiaali	Tiheys kg/m ³	Adsorptiokäyrä w (kg/m ³), f(RH) [+23 °C]								Desorptiokäyrä w (kg/m ³), f(RH) [+23 °C]							
			0	33	55	75	83	93	97	100	0	33	55	75	83	93	97	100
A1	Kipsilevy GTS 9 mm	774	0.0	3.2	6.2	6.8	10.2	18.2	23.8	500	0.0	9.1	10.7	12.2	12.9	18.2	23.8	500
A2	Runkoleijona 25 mm	280	0.0	12.0	18.5	25.0	40.0	64.8	74.8	140	0.0	12.5	21.6	31.3	40.4	64.8	74.8	140
A3	Isover RKL 30 mm	73	0.0	0.21	0.28	0.29	0.96	2.9	3.3	4.1	0.0	0.82	0.88	0.95	1.2	2.9	3.3	4.1
A4	Isover RKL-EJ 25 mm	104	0.0	0.36	0.48	0.66	1.7	4.7	5.4	6.8	0.0	1.2	1.3	1.4	1.7	4.7	5.4	6.8
A5	Runkolevy TSL 30 mm	92	0.0	0.19	0.21	0.27	0.35	0.44	0.56	0.70	0.0	0.20	0.22	0.28	0.36	0.44	0.56	0.70
A6	Isorunkolevy IRL 30 mm	120	0.0	0.20	0.24	0.29	0.37	0.54	0.64	0.80	0.0	0.21	0.25	0.30	0.38	0.54	0.64	0.80
A7	Vital-levy 25 mm	63	0.0	2.5	4.0	6.8	11.5	28.9	32.6	710	0.0	7.3	8.8	12.0	13.8	28.9	32.6	710
A8	Rakentajan kovalevy 4,8 mm	1140	0.0	58.2	71.2	142	192	288	328	990	0.0	81.7	105	184	235	288	328	990
A9	Wilhelmi V313 12 mm	723	0.0	36.2	52.8	91.1	123	170	197	760	0.0	51.3	68.0	119	158	170	197	760
A11	Wisa 3 ply 9 mm	394	0.0	18.9	28.3	48.1	64.8	114	126	590	0.0	26.8	33.6	62.6	84.7	114	126	590
A12	Tuulensuojaletku 3,2 mm	1780	0.0	25.9	42.1	64.2	154	222	271	280	0.0	28.7	46.5	71.4	169	222	271	280
A13	Tuulileijona 12 mm	270	0.0	12.4	18.5	23.3	37.4	62.7	71.3	210	0.0	12.1	20.8	27.2	39.9	62.7	71.3	210
B1	Paavo-tuulensuojalaminaatti 1 mm	360																
B2	Tyvek Soft-diffuusioikalvo 1 mm	250																
B3	Elwitek 4440-tuulensuojalam. 1 mm	230																
B4	Elwitek 5550-tuulensuojalam. 1 mm	390																
B5	Paavo-bitumivuorauspaperi 1 mm	940																
B6	Paavo-bitumivuorauskreppi 1 mm	540																
B7	Paavo-bitumivuorauspuopa 1 mm	860																
B8	Bitupap 125-bitumivuorauspap. 1 mm	840																
B9	Bitukrep 125-bitumivuorauspap. 1 mm	620																
C1	Kipsilevy GN 13 mm	574	0.0	2.4	4.6	5.1	7.5	13.5	17.7	371	0.0	6.7	7.9	9.1	9.6	13.5	17.7	371
C2	Huokoleijona 12 mm	234	0.0	10.4	15.7	20.5	33.0	54.2	62.2	148	0.0	10.5	18.1	24.9	34.2	54.2	62.2	148
C3	Wilhelmi 12 mm	592	0.0	29.0	43.8	75.2	101	158	172	990	0.0	40.8	54.5	103	130	158	172	990
C5	Luja A 8 mm	1170	0.0	17.0	27.6	42.1	101	146	178	180	0.0	18.8	30.4	46.8	111	146	178	180
C6	Eltete OSB 3 12 mm	646	0.0	31.0	45.9	77.5	107	162	183	840	0.0	43.3	60.1	108	135	162	183	840
C7	Paavo-muovitiivistyspaperi 1 mm	940																
C8	Vahattu voimapaperi, UG-voima 1 mm	880																
C9	PE-PAP 125-muovitiivistyspap. 1 mm	760																
C10	Bitumipaperi 1 mm	740																
C11	Höyrynsulkumuovi 1 mm	980																
C12	Ruskea rakennuspaperi 1 mm	750																
C13	Mänty 10 mm	532	0.0	26.6	38.3	65.0	93.1	169	185	870	0.0	38.0	51.6	95.2	123	169	185	870
C14	Elt-Kraft VCL 1 mm	600																
C15	EkoPaavo 1 mm	990																
D1	Isover KI-C 50 mm	22	0.0	0.14	0.18	0.36	0.80	1.9	2.4	3.0	0.0	0.77	0.90	1.2	1.4	1.9	2.4	3.0
D2	Isolevy IL 50 mm	37	0.0	0.14	0.16	0.36	0.58	0.69	0.93	1.2	0.0	0.16	0.30	0.50	0.60	0.69	0.93	1.2
D3	Vital 50 mm	51	0.0	2.2	3.4	4.8	7.6	18.5	22.2	650	0.0	3.3	4.3	6.6	8.8	18.5	22.2	650
D4	Ekovilla 50 mm (irtoeriste, puhäl.)	37	0.0	2.1	3.0	4.1	6.6	12.9	15.2	440	0.0	1.7	3.1	5.5	6.9	12.9	15.2	440
D4a	Ekovilla 50 mm (irtoeriste, sullottu)	60	0.0	3.4	4.9	6.6	10.7	20.9	24.6	570	0.0	2.8	5.0	8.9	11.2	20.9	24.6	570
D5	Pellavaeriste, T ³ 50 mm	39	0.0	1.6	2.4	3.4	4.3	15.3	17.6	94	0.0	2.0	3.1	4.1	7.1	15.3	17.6	94
D6	Sahanpuru 50 mm (irtoeriste)	168	0.0	9.0	13.9	19.3	29.5	42.0	47.5	720	0.0	12.4	18.4	27.9	32.9	42.0	47.5	720
D7	Kutterinlastu 50 mm (irtoeriste)	130	0.0	6.8	10.5	14.0	21.8	31.8	36.3	540	0.0	8.8	13.2	20.2	23.7	31.8	36.3	540
D67	Sahanpuru + kutterinlastu 50 mm (irto)	149	0.0	7.9	12.2	16.6	25.6	36.9	41.9	630	0.0	10.6	15.8	24.1	28.3	36.9	41.9	630
D8	Hamppueriste 50 mm (irtoeriste)	60	0.0	2.8	4.1	5.5	9.8	14.6	18.1	480	0.0	3.1	4.3	8.2	11.6	14.6	18.1	480
D9	Hamppueriste 50 mm (irtoeriste)	40	0.0	1.8	2.7	3.7	6.6	9.8	12.0	320	0.0	2.1	2.9	5.4	7.8	9.8	12.0	320
H2	Hamppueriste 50 mm	42	0.0	1.6	2.4	3.9	6.8	9.7	12.0	330	0.0	2.0	2.9	5.6	7.9	9.7	12.0	330
P1	SPU-levy 10 mm	39																

= mitattu arvo
 = mitatusta arvosta laskennallisesti arvioitu arvo
 = kirjallisuudesta otettu/ arvioitu arvo

	Materiaali	Tiheys kg/m ³	Kosteuden diffuusiovastuskerroin m (-), f(RH) [+23 °C]								
			0	35	45	55	65	75	85	95	100
A1	Kipsilevy GTS 9 mm	774	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9
A2	Runkoleijona 25 mm	280	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6
A3	Isover RKL 30 mm	73	14	14	14	14	14	14	14	14	14
A4	Isover RKL-EJ 25 mm	104	18	18	18	18	18	18	18	18	18
A5	Runkolevy TSL 30 mm	92	15	15	15	15	15	15	15	15	15
A6	Isorunkolevy IRL 30 mm	120	17	17	17	17	17	17	17	17	17
A7	Vital-levy 25 mm	63	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
A8	Rakentajan kovalevy 4,8 mm	1140	79	79	79	79	79	79	79	79	79
A9	Wilhelmi V313 12 mm	723	146	146	143	139	136	133	130	127	126
A11	Wisa 3 ply 9 mm	394	232	232	232/54	216	126	73	42	25	19
A12	Tuulensuojaluja 3,2 mm	1780	90	90	90	90	90	90	90	90	90
A13	Tuuliileijona 12 mm	270	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
B1	Paavo-tuulensuojalaminaatti 1 mm	360	87	87	87	87	87	87	87	87	87
B2	Tyvek Soft-diffuusiokalvo 1 mm	250	35	35	35/47	17	6.8	2.8	1.1	1.0	1.0
B3	Elwitek 4440-tuulensuojalam. 1 mm	230	255	255	197	169	133	114	100	89	85
B4	Elwitek 5550-tuulensuojalam. 1 mm	390	318	318	252	206	174	151	133	119	113
B5	Paavo-bitumivuorauspaperi 1 mm	940	137	137	137	137/58	98	62	40	25	20
B6	Paavo-bitumivuorauskreppi 1 mm	540	152	152	152	152/60	122	81	53	35	28
B7	Paavo-bitumivuorauspuo 1 mm	860	419	419	419	419/64	400	281	197	137	115
B8	Bitupap 125-bitumivuorauspap. 1 mm	840	121	121	121	121/62	110	76	52	36	30
B9	Bitukrep 125-bitumivuorauspap. 1 mm	620	151	151	151	151/63	139	97	67	46	38
C1	Kipsilevy GN 13 mm	574	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9
C2	Huokoleijona 12 mm	234	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8
C3	Wilhelmi 12 mm	592	39	39	39	39	39	39	39	39	39
C5	Luja A 8 mm	1170	26	26	26	26	26	26	26	26	26
C6	Eltete OSB 3 12 mm	646	162	162	162	162	162	162	162	162	162
C7	Paavo-muovitiivistyspaperi 1 mm	940	9900	9900	9800	9700	9610	9520	9430	9340	9290
C8	Vahattu voimapaperi, UG-voima 1 mm	880	650	650	650/54	634	372	219	129	76	58
C9	PE-PAP 125-muovitiivistyspap.. 1 mm	760	3880	3880	3880	3880	3880	3880	3880	3880	3880
C10	Bitumipaperi 1 mm	740	293	293	293	293/58	213	136	87	56	44
C11	Höyrinsulkumuovi 1 mm	980	89000	89000	89000	89000	89000	89000	89000	89000	89000
C12	Ruskea rakennuspaperi 1 mm	750	23	23	23	23	23	23	23	23	23
C13	Mänty 10 mm	532	84	84	84	84/57	58	37	23	15	12
C14	Elt-Kraft VCL 1 mm	600	433	433	433	433/64	418	303	219	159	135
C15	EkoPaavo 1 mm	990	1200	1200	1200	1200	779	496	316	201	161
D1	Isover KI-C 50 mm	22	12	12	12	12	12	12	12	12	12
D2	Isolevy IL 50 mm	37	12	12	12	12	12	12	12	12	12
D3	Vital 50 mm	51	13	13	13	13	13	13	13	13	13
D4	Ekovilla 50 mm (irtoeriste, puhál.)	37	13	13	13	13	13	13	13	13	13
D4a	Ekovilla 50 mm (irtoeriste, sullottu)	60	17	17	161	153	146	139	133	128	125
D5	Pellavaeriste, T ³ 50 mm	39	14	14	14	14	14	14	14	14	14
D6	Sahanpuru 50 mm (irtoeriste)	168	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
D7	Kutterinlastu 50 mm (irtoeriste)	130	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
D67	Sahanpuru + kutterinlastu 50 mm (irto)	149	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
D8	Hamppueriste 50 mm (irtoeriste)	60	14	14	14	14	14	14	14	14	14
D9	Hamppueriste 50 mm (irtoeriste)	40	15	15	15	15	15	15	15	15	15
H2	Hamppueriste 50 mm	42	16	16	16	16	16	16	16	16	16
P1	SPU-levy 10 mm	39	185	185	185	185	185	185	185	185	185

= mitattu arvo
 = mitatusta arvosta laskennallisesti arvioitu arvo
 = kirjallisuudesta otettu/ arvioitu arvo

	Materiaali	Tiheys kg/m ³	Kosteudensiirtokert. vakioarvot [+23 °C]			Kapillariteettikerr. A _w (kg/(m ² s ^{1/2}))
			μ (-)	Z _v (x10 ³ s/m)	δ _v (x10 ⁻⁶ m ² /s)	
A1	Kipsilevy GTS 9 mm	774	7.9	2.62	3.4	0.076
A2	Runkoleijona 25 mm	280	4.6	4.29	5.8	0.005
A3	Isover RKL 30 mm	73	14	158	19.0	
A4	Isover RKL-EJ 25 mm	104	18	168	14.9	
A5	Runkolevy TSL 30 mm	92	15	163	16.4	
A6	Isorunkolevy IRL 30 mm	120	17	185	16.2	
A7	Vital-levy 25 mm	63	2.0	188	13.3	0.098
A8	Rakentajan kovalevy 4,8 mm	1140	79	14.1	0.34	0.030
A9	Wilhelmi V313 12 mm	723	137	60.9	0.20	0.082
A11	Wisa 3 ply 9 mm	394	100	33.1	0.27	0.022
A12	Tuulensuojaluja 3,2 mm	1780	90	10.7	0.3	0.026
A13	Tuulileijona 12 mm	270	5.5	2.46	4.9	0.004
B1	Paavo-tuulensuojalaminaatti 1 mm	360	87	3.23	0.31	
B2	Tyvek Soft-diffuusiokalvo 1 mm	250	22	0.82	12	
B3	Elwitek 4440-tuulensuojalam. 1 mm	230	150	5.57	0.18	
B4	Elwitek 5550-tuulensuojalam. 1 mm	390	193	7.16	0.14	
B5	Paavo-bitumivuorauspaperi 1 mm	940	100	3.70	0.27	
B6	Paavo-bitumivuorauskreppi 1 mm	540	116	4.29	0.23	
B7	Paavo-bitumivuoraushuopa 1 mm	860	335	12.4	0.08	
B8	Bitupap 125-bitumivuorauspap. 1 mm	840	101	3.76	0.27	
B9	Bitukrep 125-bitumivuorauspap. 1 mm	620	129	4.70	0.21	
C1	Kipsilevy GN 13 mm	574	6.9	3.32	3.9	0.076
C2	Huokoleijona 12 mm	234	4.8	2.12	5.7	0.005
C3	Wilhelmi 12 mm	592	39	17.4	0.69	0.015
C5	Luja A 8 mm	1170	26	7.73	1.0	0.026
C6	Eltete OSB 3 12 mm	646	162	7.19	0.17	0.011
C7	Paavo-muovitiivistyspaperi 1 mm	940	9640	358	0.003	
C8	Vahattu voimapaperi, UG-voima 1 mm	880	304	113	0.09	
C9	PE-PAP 125-muovitiivistyspap.. 1 mm	760	3880	144	0.007	
C10	Bitumipaperi 1 mm	740	187	6.93	0.14	
C11	Höyrynsulkumuovi 1 mm	980	89000	3330	0.00003	
C12	Ruskea rakennuspaperi 1 mm	750	23	0.84	12	
C13	Mänty 10 mm	532	49	18.1	0.55	0.004
C14	Elt-Kraft VCL 1 mm	600	357	13.5	0.07	
C15	EkoPaavo 1 mm	990	695	26.2	0.04	
D1	Isover KI-C 50 mm	22	12	2.24	22.3	
D2	Isolevy IL 50 mm	37	12	2.24	22.3	
D3	Vital 50 mm	51	13	2.48	20.1	0.086
D4	Ekovilla 50 mm (irtoeriste, puhál.)	37	13	2.41	20.8	0.074
D4a	Ekovilla 50 mm (irtoeriste, sullottu)	60	15	3.07	17.7	0.065
D5	Pellavaeriste, T ³ 50 mm	39	14	2.51	19.9	0.009
D6	Sahanpuru 50 mm (irtoeriste)	168	2.1	3.83	13.0	0.14
D7	Kutterinlastu 50 mm (irtoeriste)	130	2.5	4.57	10.9	0.034
D67	Sahanpuru + kutterinlastu 50 mm (irto)	149	2.3	4.20	12.0	0.087
D8	Hamppueriste 50 mm (irtoeriste)	60	14	2.58	19.0	0.028
D9	Hamppueriste 50 mm (irtoeriste)	40	15	2.79	17.9	0.020
H2	Hamppueriste 50 mm	42	16	2.94	17.0	0.019
P1	SPU-levy 10 mm	39	185	70.1	0.14	

	= mitattu arvo
	= mitatusta arvosta laskennallisesti arvioitu arvo
	= kirjallisuudesta otettu/ arvioitu arvo

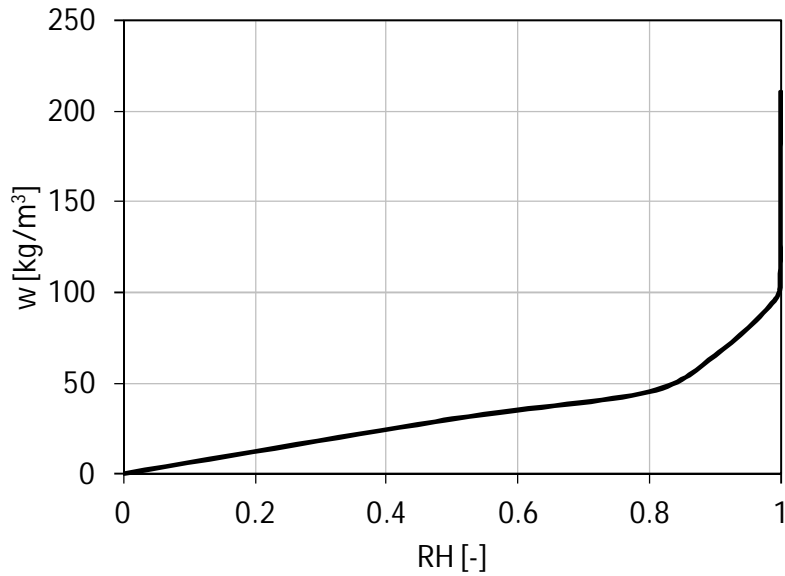
	Materiaali	Tiheys kg/m ³	Kosteusdiffusiv. D_w (m ² /s), f(RH) [+23 °C]			Lämmönjohtavuus λ (W/mK), f(RH) [+10 °C]						λ_n W/mK
			RH	100	100	0 33 65 86 97 100						
						0	33	65	86	97	100	
A1	Kipsilevy GTS 9 mm	774	80	1,02E-10	8,78E-08	0.19	0.19	0.19	0.20	0.21	0.60	0.21
A2	Runkoleijona 25 mm	280	80	2,82E-11	4,85E-09	0.050	0.051	0.052	0.054	0.056	0.60	0.055
A3	Isover RKL 30 mm	73				0.031	0.031	0.031	0.031	0.031	0.60	0.037
A4	Isover RKL-EJ 25 mm	104				0.031	0.031	0.031	0.031	0.031	0.60	0.037
A5	Runkolevy TSL 30 mm	92				0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.60	0.041
A6	Isorunkolevy IRL 30 mm	120				0.033	0.033	0.033	0.033	0.033	0.60	0.041
A7	Vital-levy 25 mm	63	80	8,09E-11	7,24E-08	0.037	0.037	0.037	0.038	0.040	0.60	0.041
A8	Rakentajan kovalevy 4,8 mm	1140	97	3,44E-11	3,49E-09	0.11	0.11	0.12	0.13	0.14	0.60	0.13
A9	Wilhelmi V313 12 mm	723	97	2,65E-10	4,42E-08	0.11	0.11	0.12	0.13	0.14	0.60	0.14
A11	Wisa 3 ply 9 mm	394	55	7,60E-12	5,28E-09	0.11	0.11	0.11	0.12	0.13	0.60	0.13
A12	Tuulensuojaletku 3,2 mm	1780	97	2,62E-08	3,28E-08	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.60	0.60
A13	Tuulileijona 12 mm	270	80	4,17E-12	1,38E-09	0.048	0.049	0.050	0.052	0.055	0.60	0.055
B1	Paavo-tuulensuojalaminaatti 1 mm	360				0.20					0.20	0.20
B2	Tyvek Soft-diffuusioikalvo 1 mm	250				0.20					0.20	0.20
B3	Elwitek 4440-tuulensuojalam. 1 mm	230				0.20					0.20	0.20
B4	Elwitek 5550-tuulensuojalam. 1 mm	390				0.20					0.20	0.20
B5	Paavo-bitumivuoerauspaperi 1 mm	940				0.10					0.10	0.12
B6	Paavo-bitumivuoerausreppi 1 mm	540				0.10					0.10	0.12
B7	Paavo-bitumivuoeraushuopa 1 mm	860				0.10					0.10	0.12
B8	Bitupap 125-bitumivuoerauspap. 1 mm	840				0.10					0.10	0.12
B9	Bitukrep 125-bitumivuoerauspap. 1 mm	620				0.10					0.10	0.12
C1	Kipsilevy GN 13 mm	574	80	1,85E-10	1,59E-07	0.19	0.19	0.19	0.20	0.21	0.60	0.21
C2	Huokoleijona 12 mm	234	80	1,72E-11	4,34E-09	0.049	0.050	0.051	0.053	0.055	0.60	0.055
C3	Wilhelmi 12 mm	592	97	2,90E-12	8,72E-10	0.11	0.11	0.12	0.13	0.14	0.60	0.14
C5	Luja A 8 mm	1170	97	7,34E-08	7,93E-08	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.60	0.34
C6	Eltete OSB 3 12 mm	646	97	2,93E-12	6,52E-10	0.11	0.11	0.12	0.13	0.14	0.60	0.14
C7	Paavo-muovitiivistyspaperi 1 mm	940				0.10					0.10	0.12
C8	Vahattu voimapaperi, UG-voima 1 mm	880				0.10					0.10	0.12
C9	PE-PAP 125-muovitiivistyspap.. 1 mm	760				0.10					0.10	0.12
C10	Bitumipaperi 1 mm	740				0.10					0.10	0.12
C11	Höyrynsulkumuovi 1 mm	980				0.40					0.40	0.40
C12	Ruskea rakennuspaperi 1 mm	750				0.10					0.10	0.12
C13	Mänty 10 mm	532	65	1,32E-13	8,03E-11	0.10	0.11	0.12	0.13	0.15	0.60	0.12
C14	Elt-Kraft VCL 1 mm	600				0.10					0.10	0.12
C15	EkoPaavo 1 mm	990				0.10					0.10	0.12
D1	Isover KI-C 50 mm	22				0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.60	0.041
D2	Isolevy IL 50 mm	37				0.034	0.034	0.034	0.034	0.034	0.60	0.041
D3	Vital 50 mm	51	80	7,19E-11	6,65E-08	0.037	0.037	0.038	0.039	0.042	0.60	0.041
D4	Ekovilla 50 mm (irtoeriste, puhäl.)	37	80	1,18E-10	1,07E-07	0.038	0.038	0.038	0.039	0.042	0.60	0.041
D4a	Ekovilla 50 mm (irtoeriste, sullottu)	60	80	5,56E-11	4,94E-08	0.040	0.040	0.041	0.042	0.044	0.60	0.050
D5	Pellavaeriste, T ³ 50 mm	39	80	5,01E-11	3,48E-08	0.035	0.036	0.036	0.038	0.041	0.60	0.041
D6	Sahanpuru 50 mm (irtoeriste)	168	80	1,89E-10	1,44E-07	0.055	0.056	0.057	0.061	0.069	0.60	0.080
D7	Kutterinlastu 50 mm (irtoeriste)	130	80	1,96E-11	1,51E-08	0.053	0.054	0.055	0.057	0.060	0.60	0.080
D67	Sahanpuru + kutterinlastu 50 mm (irto)	149	80	9,34E-11	7,25E-08	0.052	0.052	0.054	0.057	0.064	0.60	0.080
D8	Hamppueriste 50 mm (irtoeriste)	60	80	1,48E-11	1,29E-08	0.043	0.046	0.049	0.053	0.057	0.60	0.060
D9	Hamppueriste 50 mm (irtoeriste)	40	80	1,70E-11	1,48E-08	0.043	0.045	0.047	0.052	0.057	0.60	0.060
H2	Hamppueriste 50 mm	42	80	1,44E-11	1,26E-08	0.043	0.045	0.047	0.052	0.057	0.60	0.060
P1	SPU-levy 10 mm	39				0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	0.60	0.027

- = mitattu arvo
- = mitatusta arvosta laskennallisesti arvioitu arvo
- = kirjallisuudesta otettu/ arvioitu arvo

	Materiaali	Tiheys kg/m ³	Mitatut lämmönjohtavuusarvot λ (W/mK), f(RH) [+10 °C]				
			0	33	65	86	97
A1	Kipsilevy GTS 9 mm	774	0.1900	0.1900	0.1900	0.2000	0.2100
A2	Runkoleijona 25 mm	280	0.0485	0.0514	0.0520	0.0553	0.0541
A3	Isover RKL 30 mm	73	0.0306	0.0305	0.0305	0.0305	0.0307
A4	Isover RKL-EJ 25 mm	104	0.0312	0.0310	0.0313	0.0311	0.0315
A5	Runkolevy TSL 30 mm	92	0.0320	0.0318	0.0319	0.0321	0.0323
A6	Isorunkolevy IRL 30 mm	120	0.0327	0.0324	0.0326	0.0325	0.0327
A7	Vital-levy 25 mm	63	0.0371	0.0363	0.0376	0.0386	0.0399
A8	Rakentajan kovalevy 4,8 mm	1140					
A9	Wilhelmi V 313 12 mm	723					
A11	Wisa 3 ply 9 mm	394	0.1100	0.1100	0.1100	0.1200	0.1300
A12	Tuulensuojaluja 3,2 mm	1780					
A13	Tuulileijona 12 mm	270	0.0465	0.0494	0.0512	0.0543	0.0529
B1	Paavo-tuulensuojalaminaatti 1 mm	360					
B2	Tyvek Soft-diffuusiokalvo 1 mm	250					
B3	Elwitek 4440-tuulensuojalam. 1 mm	230					
B4	Elwitek 5550-tuulensuojalam. 1 mm	390					
B5	Paavo-bitumivuorauspaperi 1 mm	940					
B6	Paavo-bitumivuorauskreppi 1 mm	540					
B7	Paavo-bitumivuorashuopa 1 mm	860					
B8	Bitupap 125-bitumivuorauspap. 1 mm	840					
B9	Bitukrep 125-bitumivuorauspap. 1 mm	620					
C1	Kipsilevy GN 13 mm	574	0.1900	0.1900	0.1900	0.2000	0.2100
C2	Huokoleijona 12 mm	234	0.0475	0.0504	0.0516	0.0548	0.0535
C3	Wilhelmi 12 mm	592					
C5	Luja A 8 mm	1170					
C6	Eltete OSB 3 12 mm	646					
C7	Paavo-muovitiivistyspaperi 1 mm	940					
C8	Vahattu voimapaperi, UG-voima 1 mm	880					
C9	PE-PAP 125-muovitiivistyspap.. 1 mm	760					
C10	Bitumipaperi 1 mm	740					
C11	Höyrinsulkumuovi 1 mm	980					
C12	Ruskea rakennuspaperi 1 mm	750					
C13	Mänty 10 mm	532					
C14	Elt-Kraft VCL 1 mm	600					
C15	EkoPaavo 1 mm	990					
D1	Isover KI-C 50 mm	22	0.0348	0.0351	0.0351	0.0354	0.0353
D2	Isolevy IL 50 mm	37	0.0337	0.0336	0.0336	0.0333	0.0337
D3	Vital 50 mm	51	0.0361	0.0371	0.0373	0.0415	0.0414
D4	Ekovilla 50 mm (irtoeriste, puhäl.)	37	0.0378	0.0382	0.0383	0.0394	0.0418
D4a	Ekovilla 50 mm (irtoeriste, sullottu)	60	0.0391	0.0401	0.0411	0.0417	0.0437
D5	Pellavaeriste, T ³ 50 mm	39	0.0347	0.0359	0.0366	0.0380	0.0405
D6	Sahanpuru 50 mm (irtoeriste)	168	0.0542	0.0559	0.0577	0.0619	0.0682
D7	Kutterinlastu 50 mm (irtoeriste)	130	0.0527	0.0531	0.0551	0.0574	0.0599
D67	Sahanpuru + kutterinlastu 50 mm (irto)	149	0.0517	0.0522	0.0551	0.0562	0.0641
D8	Hamppueriste 50 mm (irtoeriste)	60	0.0445	0.0454	0.0472	0.0546	0.0570
D9	Hamppueriste 50 mm (irtoeriste)	40					
H2	Hamppueriste 50 mm	42	0.0435	0.0443	0.0460	0.0538	0.0560
P1	SPU-levy 10 mm	39	0.0220	0.0220	0.0220	0.0220	0.0220

= mitattu arvo
 = mitatusta arvosta laskennallisesti arvioitu arvo
 = kirjallisuudesta otettu/ arvioitu arvo

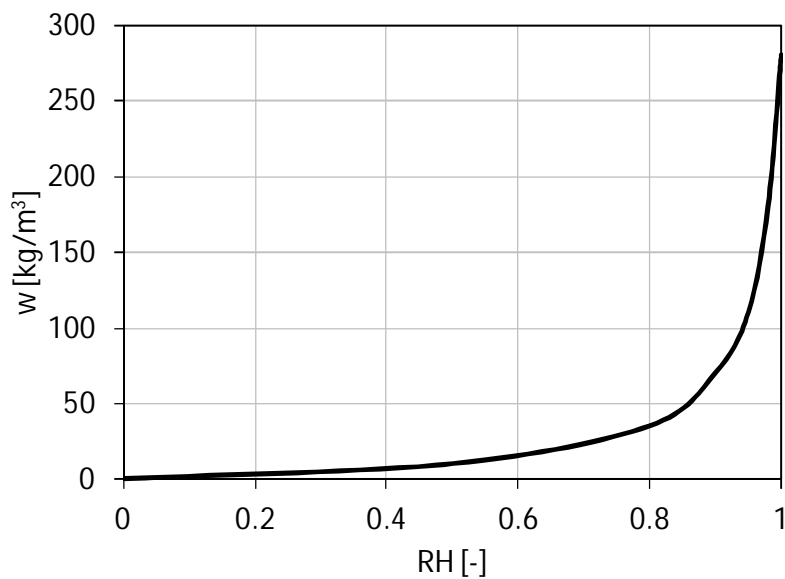
Kalkkisementtilaastit



RH [-]	0	0.5	0.8	0.9	0.99	0.999	0.9995	0.9999	1
w [kg/m ³]	0	30	45	65	95	110	140	200	210

Kuva 1. Kalkkisementtilaastien tasapainokosteuskäyrä. (Alakulju 2011; Manelius 2011)

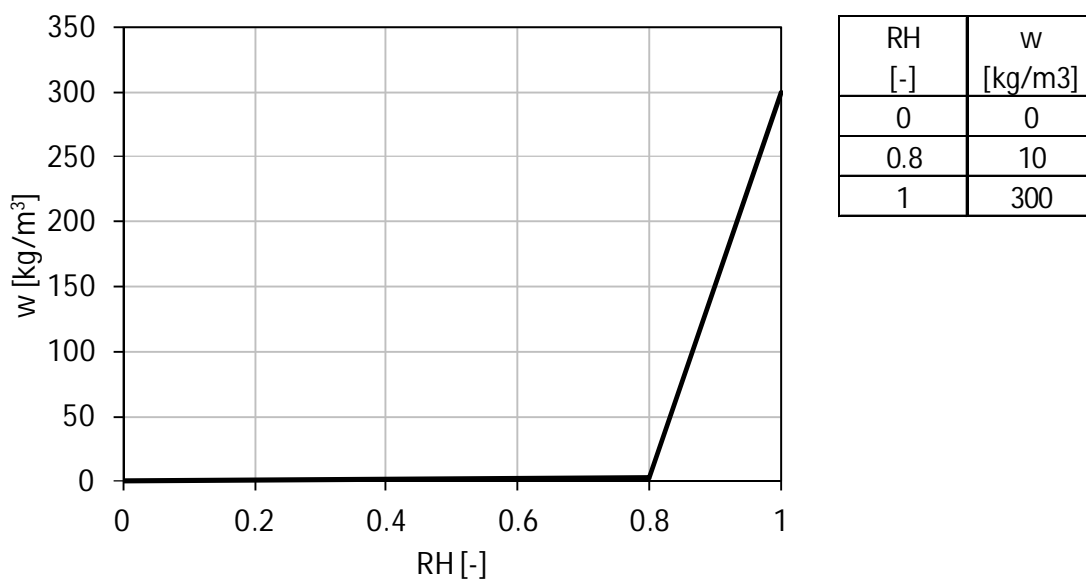
Sementtilaastit



RH [-]	0	0.5	0.8	0.9	0.95	0.98	1
w [kg/m ³]	0	10	35	70	110	180	280

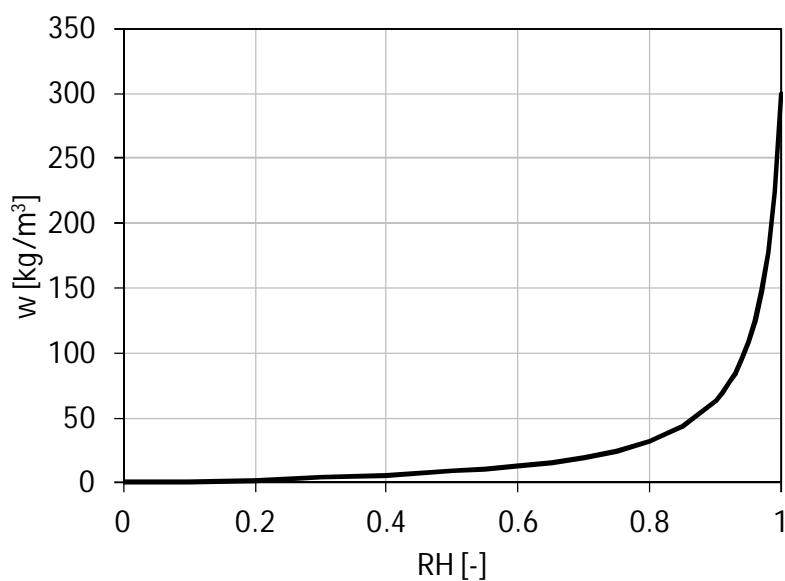
Kuva 2. Sementtilaastien tasapainokosteuskäyrä. (Alakulju 2011; Manelius 2011)

Silikonihartsipinnoite



Kuva 3. Silikonihartsipinnoitteen tasapainokosteuskäyrä. (Alakulju 2011)

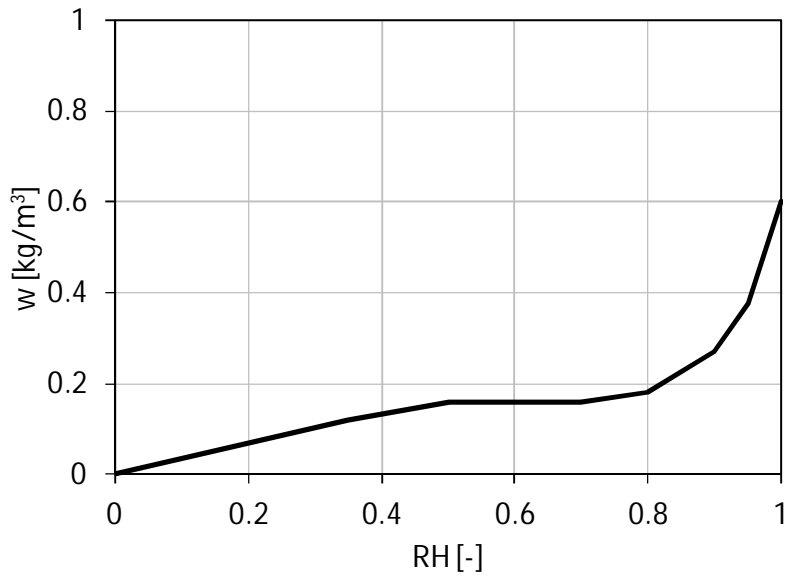
Silikonihartsimaali



RH [-]	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.55	0.6	0.65
w [kg/m ³]	0	0.99	2.22	3.79	5.85	8.7	10.56	12.86	15.75
RH [-]	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	0.91	0.92	0.93	0.94
w [kg/m ³]	19.53	24.66	32	43.4	63.53	69.55	76.67	85.19	95.59
RH [-]	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1			
w [kg/m ³]	108.57	125.22	147.34	178.18	224.15	300			

Kuva 4. Silikonihartsimaalin tasapainokosteuskäyrä. (Alakulju 2011; Manelius 2011)

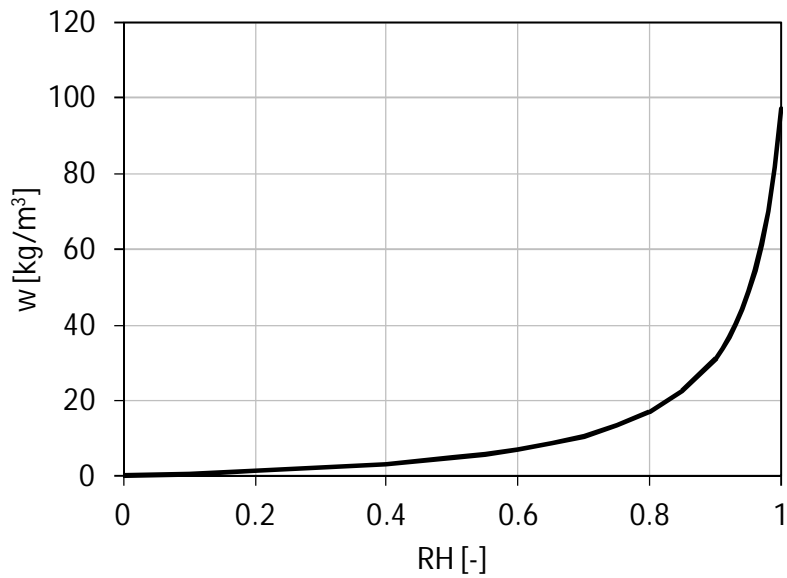
EPS-eriste



RH [-]	w [kg/m ³]
0	0
0.35	0.12
0.5	0.16
0.7	0.16
0.8	0.18
0.9	0.27
0.95	0.38
1	0.6

Kuva 5. EPS-eristeen tasapainokosteuskäyrä. (Hagentoft 2001)

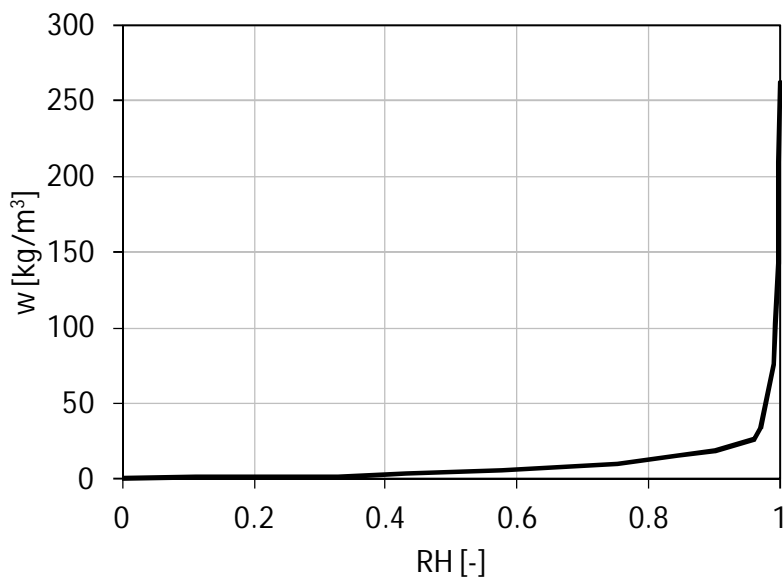
Sementtipohjainen rappauslevy



RH [-]	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.55	0.6	0.65
w [kg/m ³]	0	0.57	1.27	2.16	3.32	4.89	5.91	7.16	8.71
RH [-]	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	0.91	0.92	0.93	0.94
w [kg/m ³]	10.7	13.33	17	22.44	31.38	33.9	36.79	40.14	44.06
RH [-]	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1			
w [kg/m ³]	48.73	54.36	61.31	70.08	81.5	97			

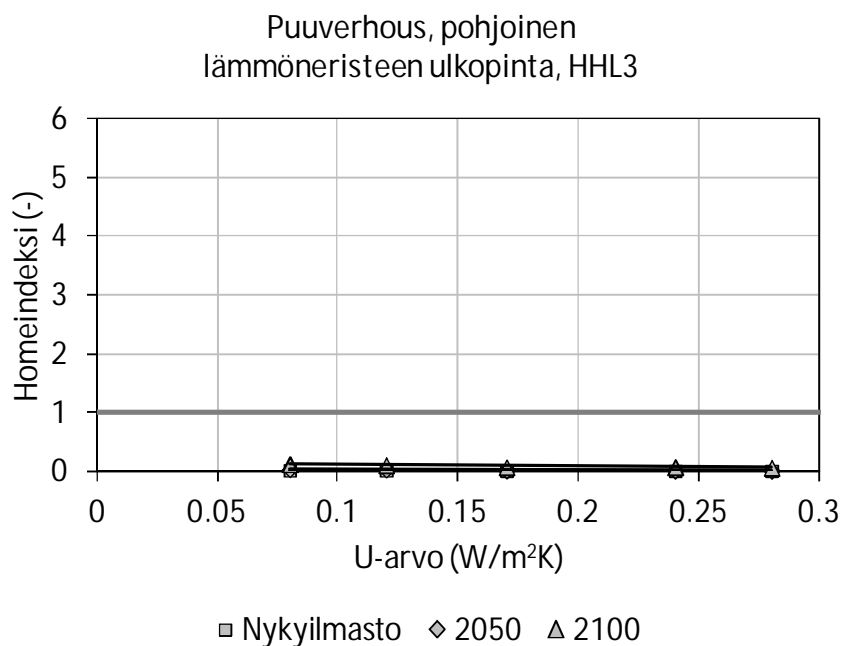
Kuva 6. Sementtipohjaisen rappauslevyn tasapainokosteuskäyrä.

Savitiili

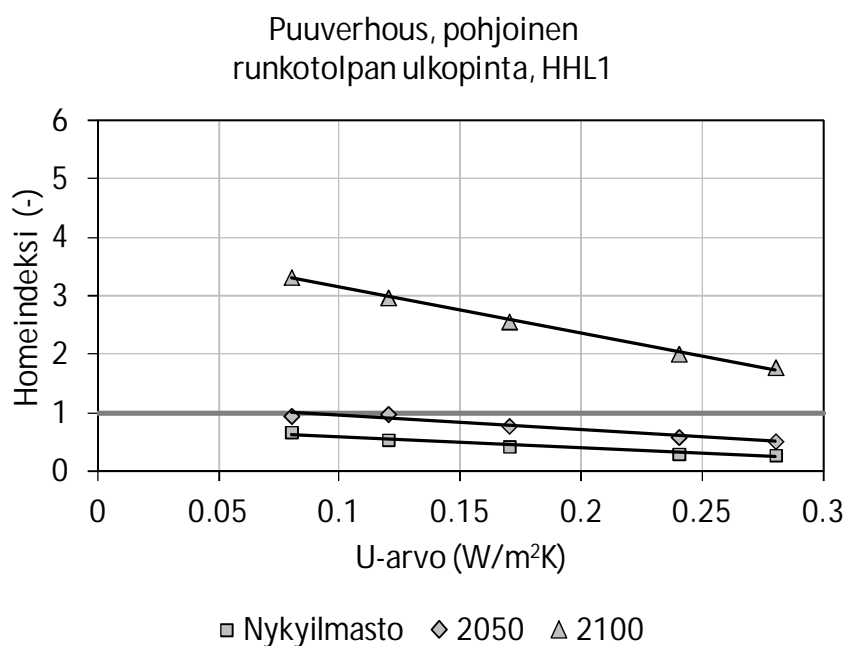


RH [-]	0	0.113	0.228	0.328	0.432	0.576	0.752	0.843	0.9
w [kg/m ³]	0	1.37	1.6	1.99	3.91	5.91	10.3	15.9	18.6
RH [-]	0.96	0.969	0.9897	0.9926	0.997	0.9978	0.9985	1	
w [kg/m ³]	26.4	33.3	75.3	103	143	172	209	262	

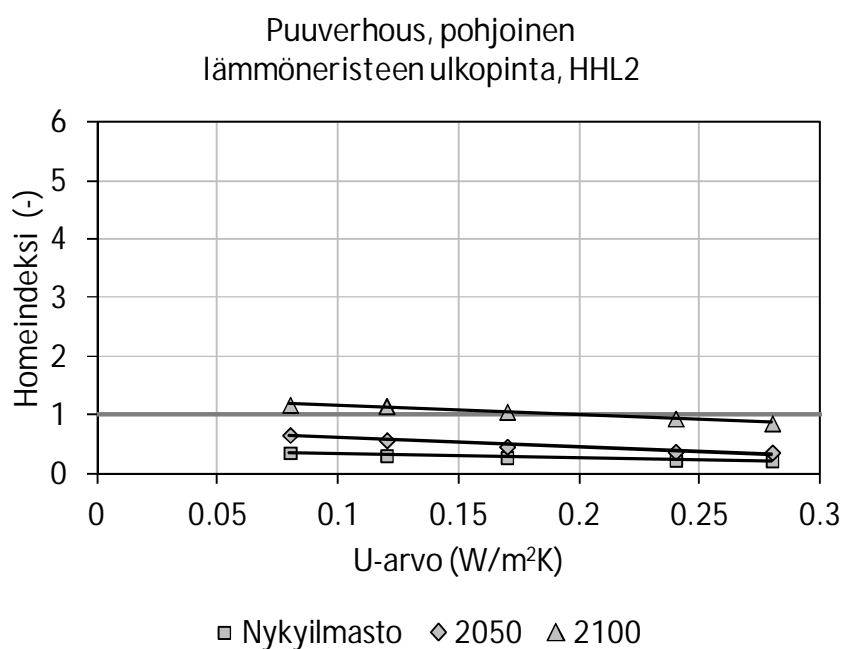
Kuva 7. Savitiilen tasapainokosteuskäyrä. (Wufi 5.1 Pro)



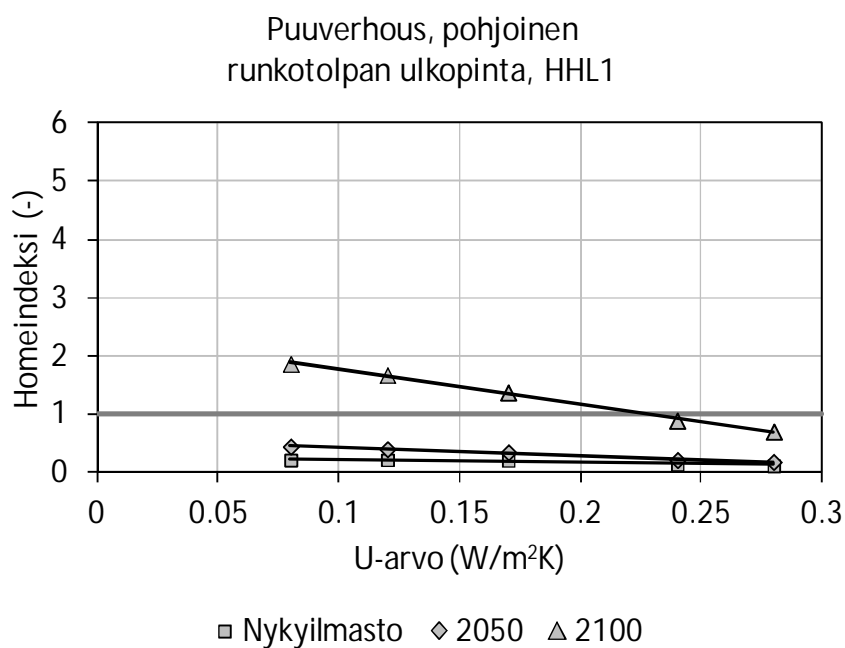
Kuva 1. Homeen kasvu lämmöneristeen ulkopinnassa puuverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään muovipohjaista tuulensuojakalvoa (B1).



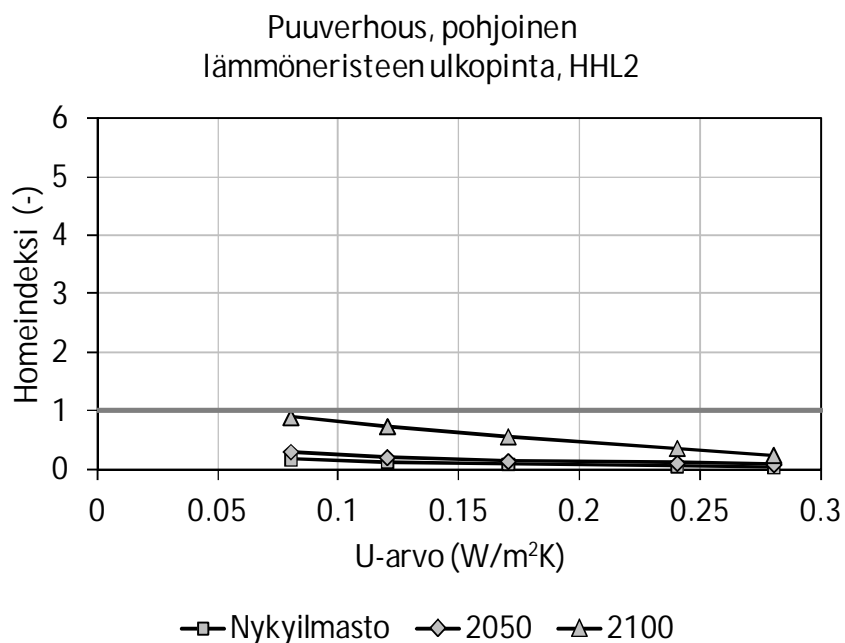
Kuva 2. Homeen kasvu runkotolpan ulkopinnassa puuverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään muovipohjaista tuulensuojakalvoa (B1).



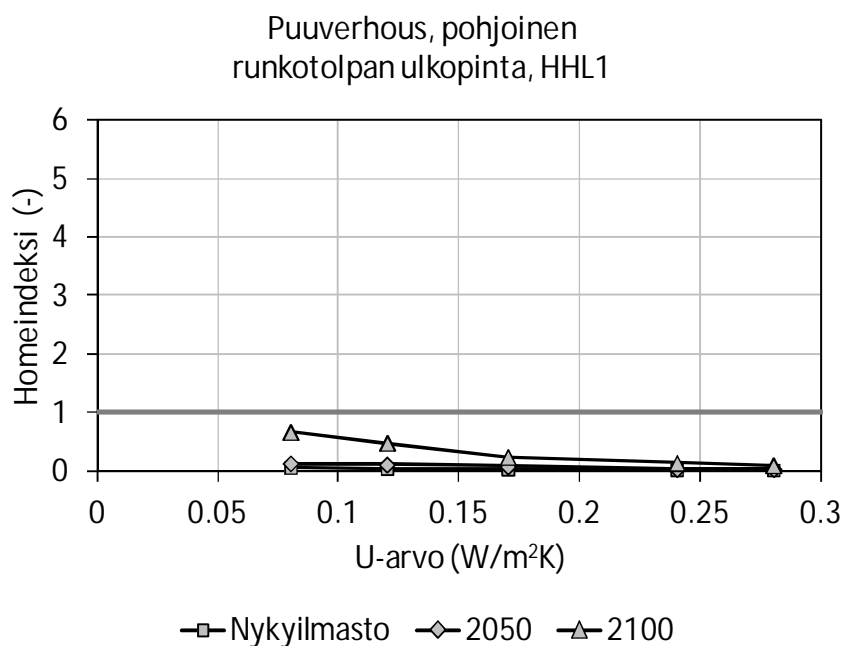
Kuva 3. Homeen kasvu lämmöneristeen ulkopinnassa puuverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään 9 mm paksua tuulensuojakipsilevyä (A1).



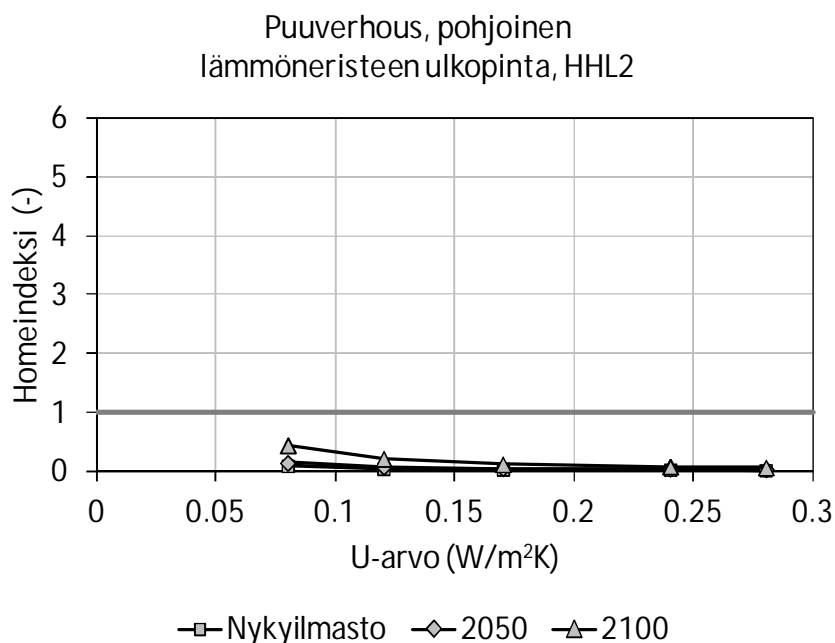
Kuva 4. Homeen kasvu runkotolpan ulkopinnassa puuverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään 9 mm paksua tuulensuojakipsilevyä (A1).



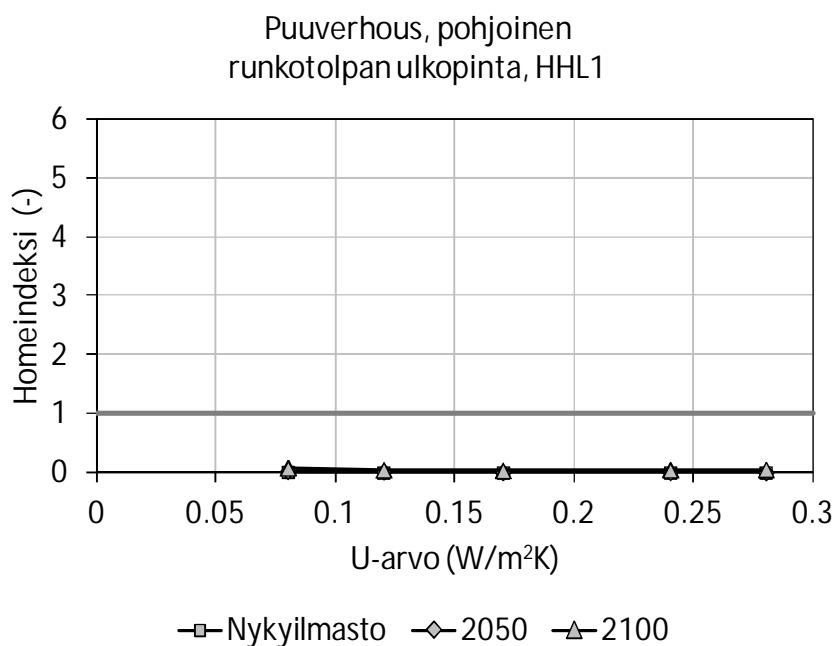
Kuva 5. Homeen kasvu lämmöneristeen ulkopinnassa puuverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään 12 mm paksua huokoista puukuitulevyä (A13).



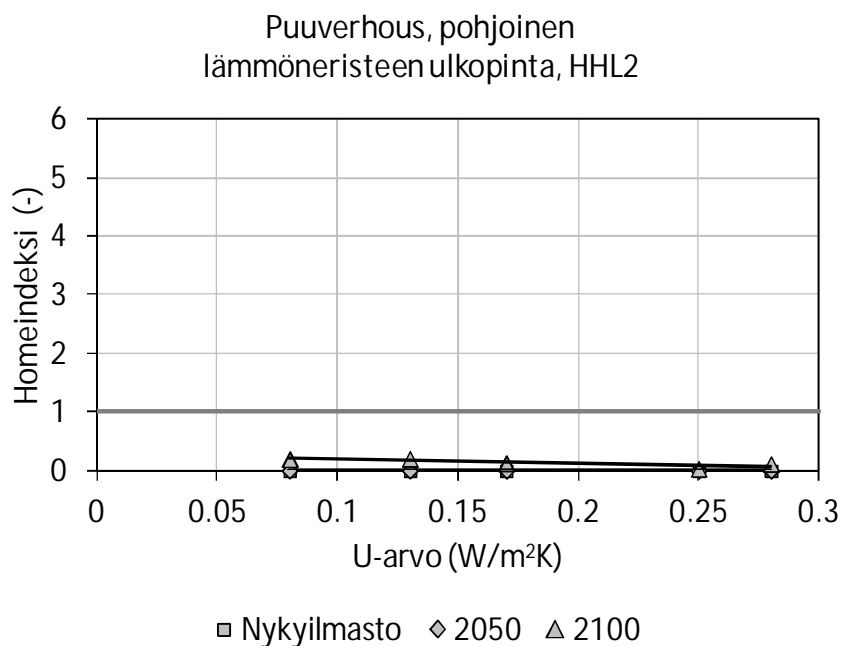
Kuva 6. Homeen kasvu runkotolpan ulkopinnassa puuverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään 12 mm paksua huokoista puukuitulevyä (A13).



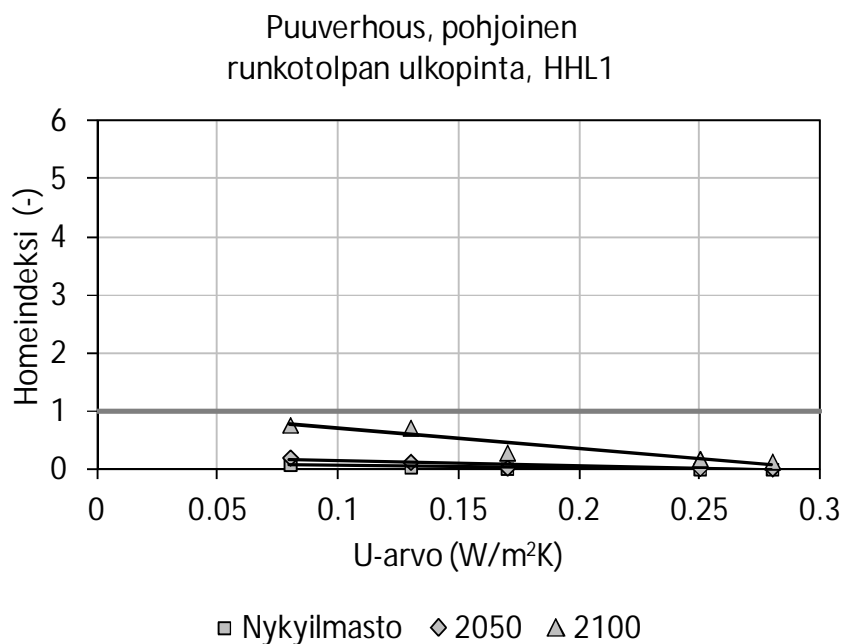
Kuva 7. Homeen kasvu lämmöneristeen ulkopinnassa puuverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään 9 mm paksua tuulensuojakipsilevyä ja 30 mm paksua mineraalivillalevyä (A1+A3).



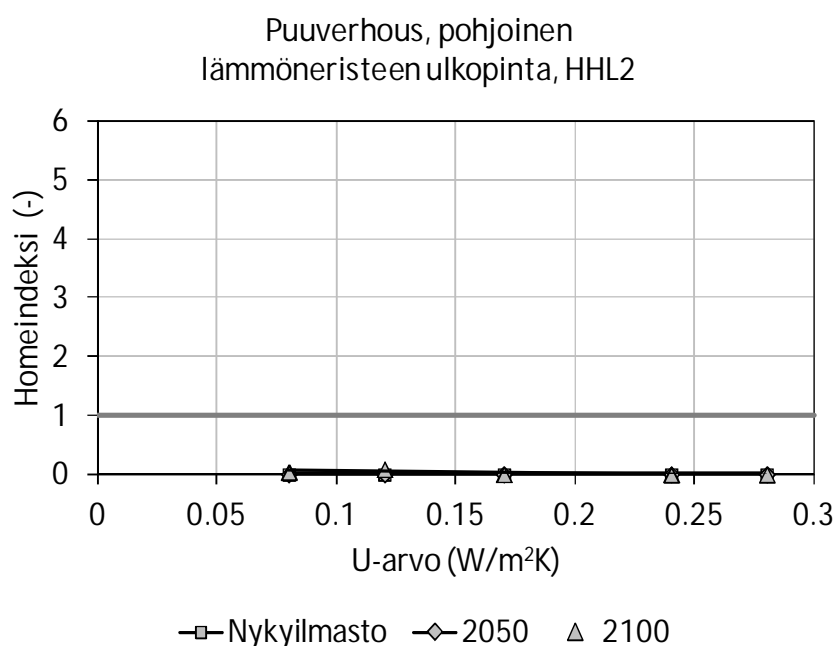
Kuva 8. Homeen kasvu runkotolpan ulkopinnassa puuverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään 9 mm paksua tuulensuojakipsilevyä ja 30 mm paksua mineraalivillalevyä (A1+A3).



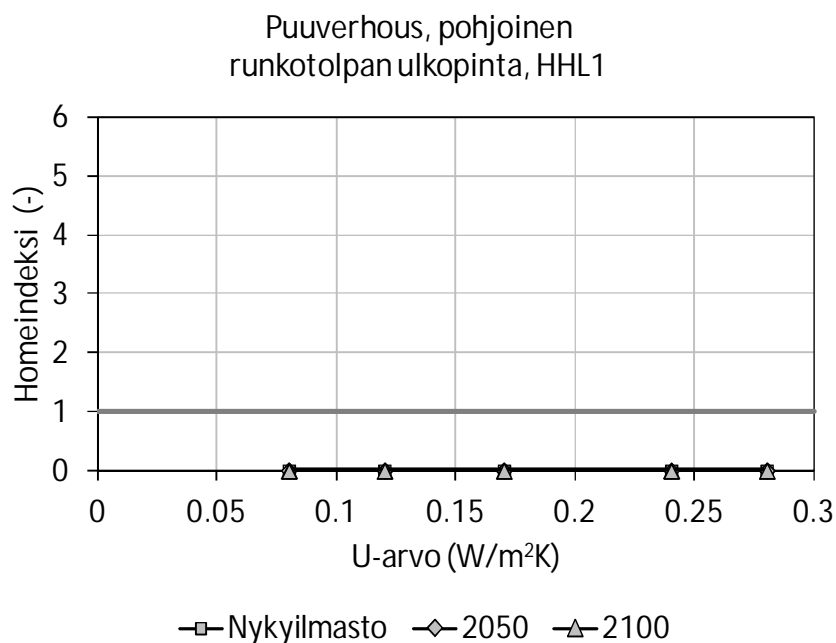
Kuva 9. Homeen kasvu lämmöneristeen ulkopinnassa puuverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään 9 mm paksua havuvaneria (A11).



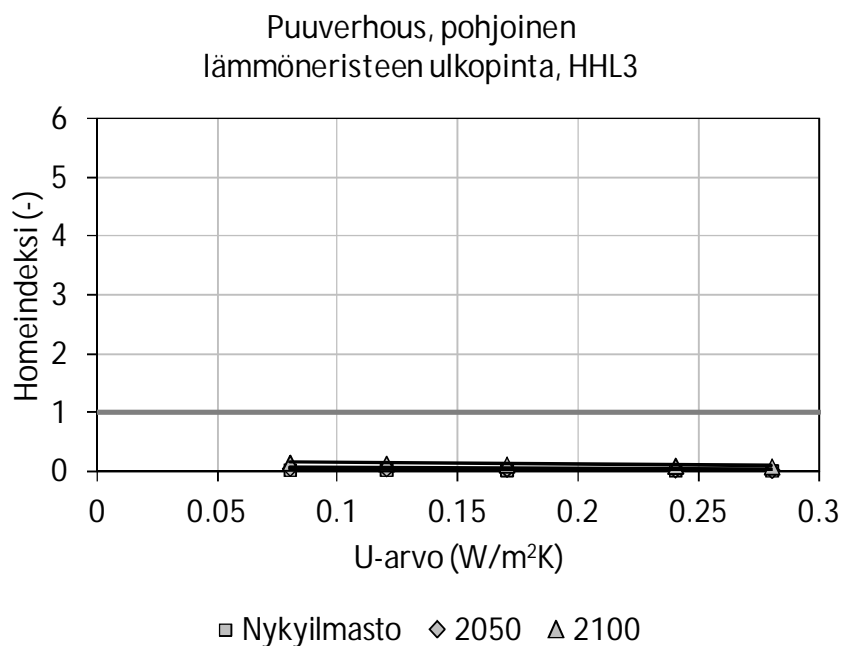
Kuva 10. Homeen kasvu runkotolpan ulkopinnassa puuverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään 9 mm paksua havuvaneria (A11).



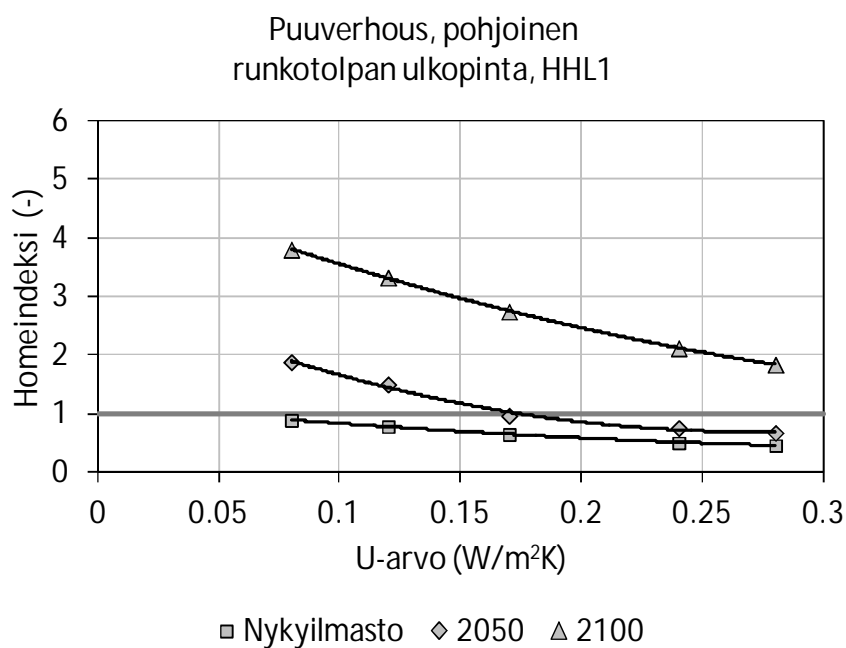
Kuva 11. Homeen kasvu lämmöneristeen ulkopinnassa puuverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään 9 mm paksua havuvaneria ja 30 mm paksua mineraalivillalevyä (A11+A3).



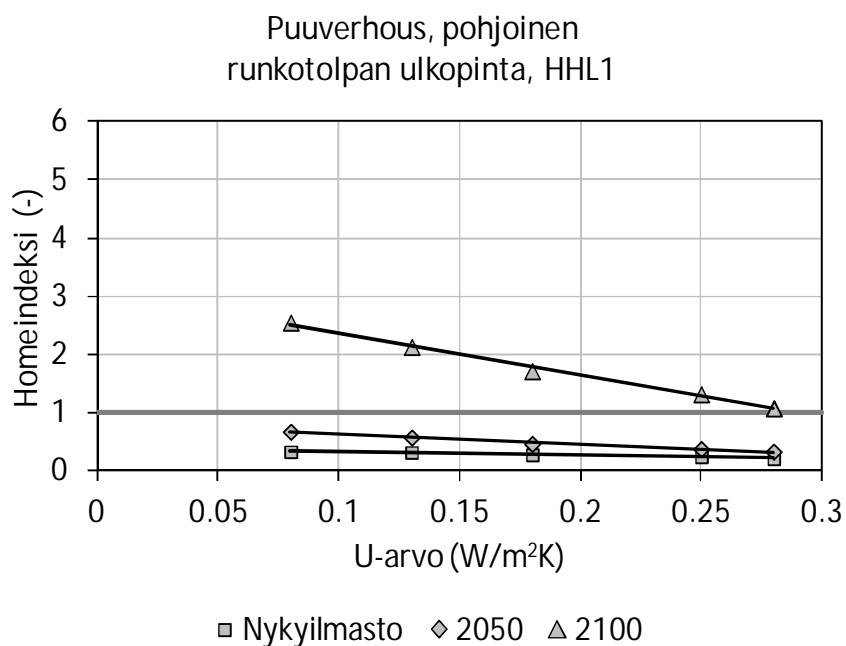
Kuva 12. Homeen kasvu runkotolpan ulkopinnassa puuverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään 9 mm paksua havuvaneria ja 30 mm paksua mineraalivillalevyä (A11+A3).



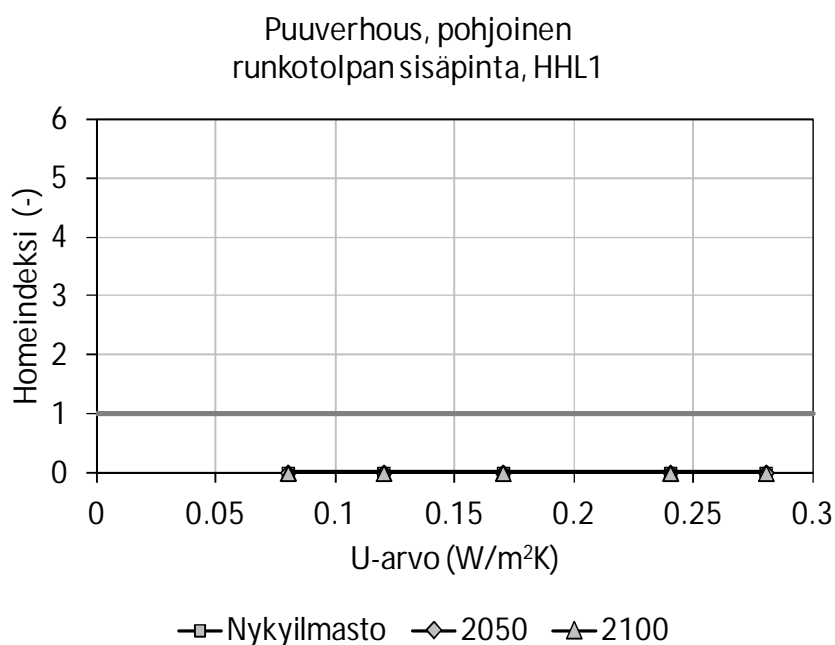
Kuva 13. Homeen kasvu lämmöneristeen ulkopinnassa puuverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään diffuusioavointa tuulensuojakalvoa (B2).



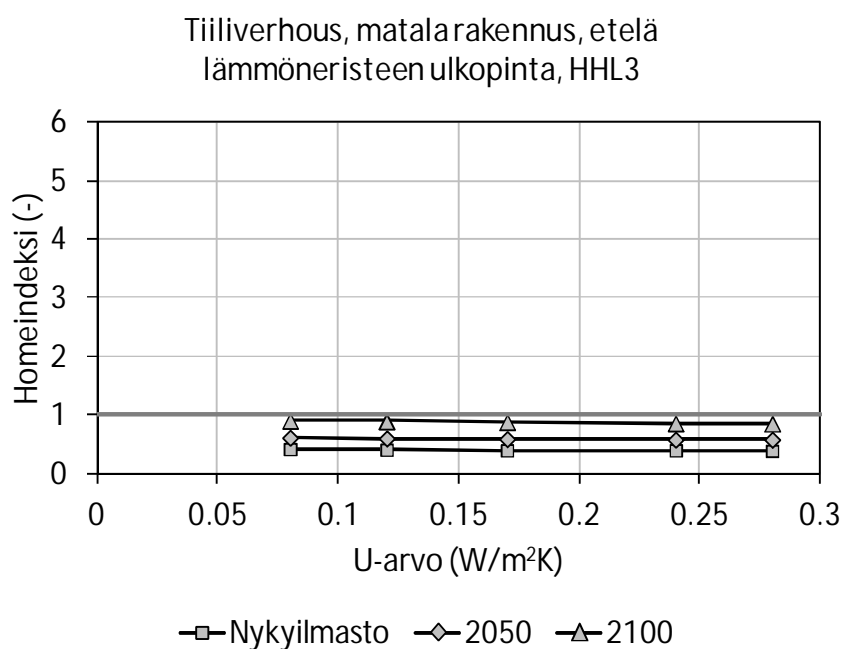
Kuva 14. Homeen kasvu runkotolpan ulkopinnassa puuverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään diffuusioavointa tuulensuojakalvoa (B2).



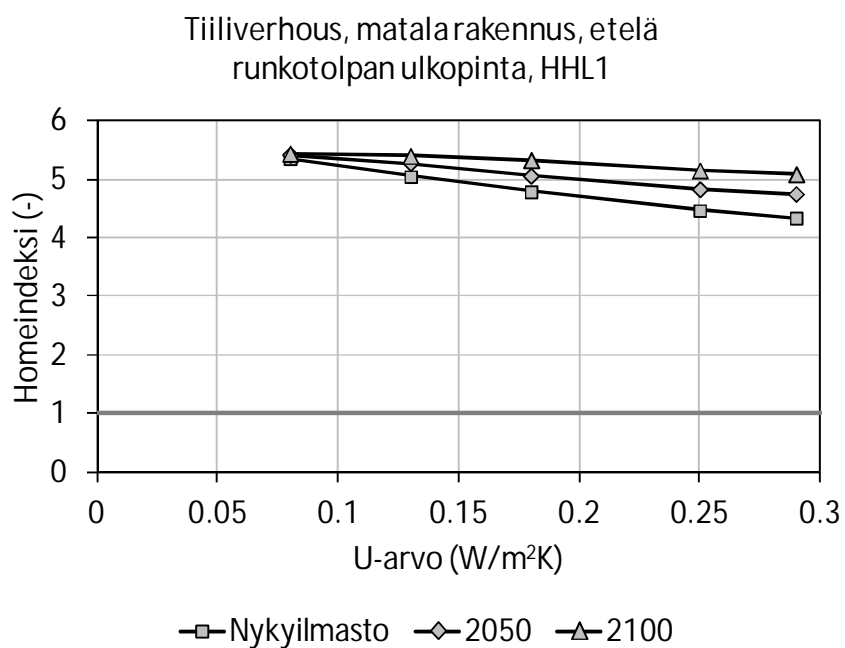
Kuva 15. Homeen kasvu ulkopuolisen ristikoolauksen ulkopinnassa, kun tuulensuojana käytetään 9 mm paksua tuulensuojakipsilevyä (A2).



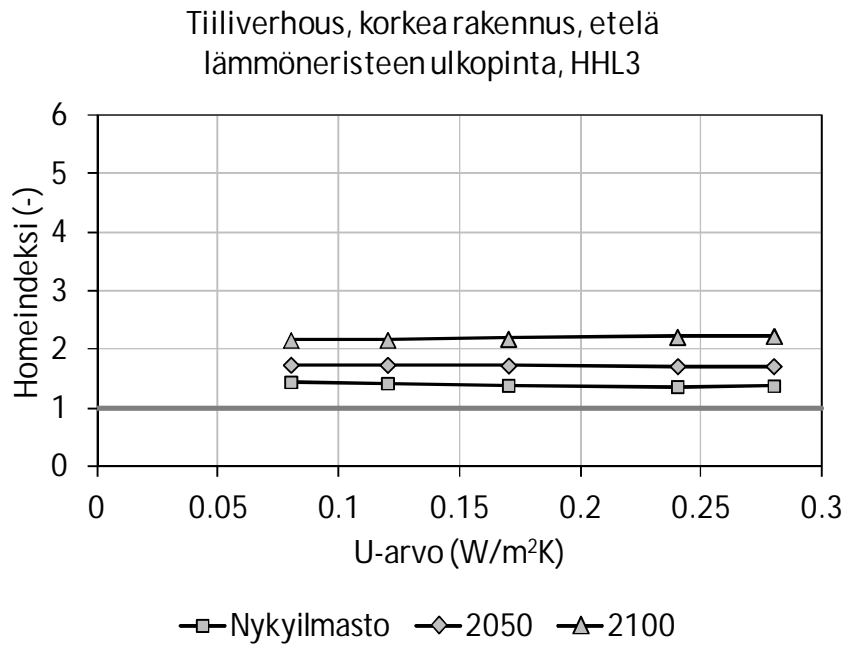
Kuva 16. Homeen kasvu runkotolpan sisäpinnassa puuverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään 9 mm paksua tuulensuojakipsilevyä ja 30 mm paksua mineraalivillalevyä (A1+A3).



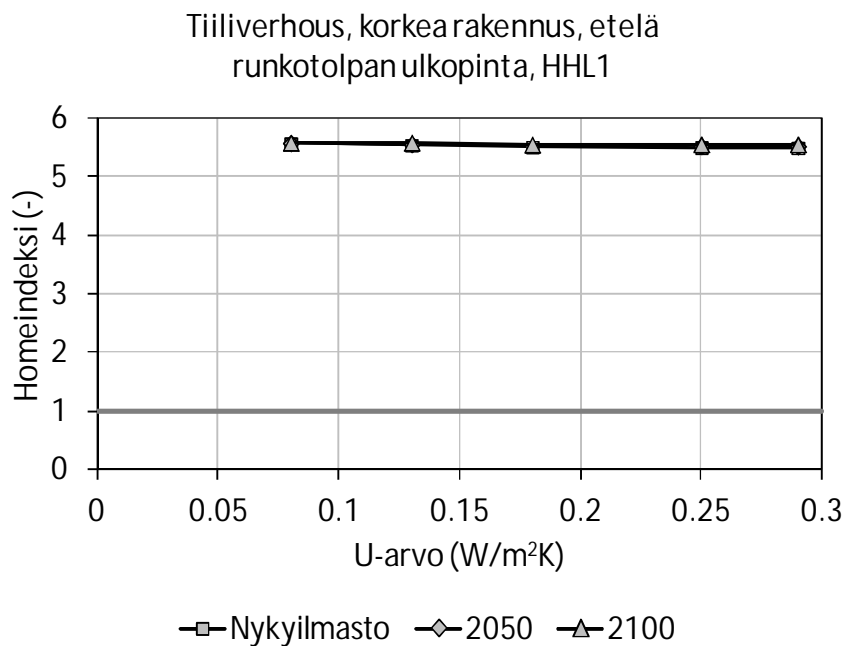
Kuva 1. Homeen kasvu lämmöneristeen ulkopinnassa matalassa tiiliverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään muovipohjaista tuulensuojakalvoa (B1).



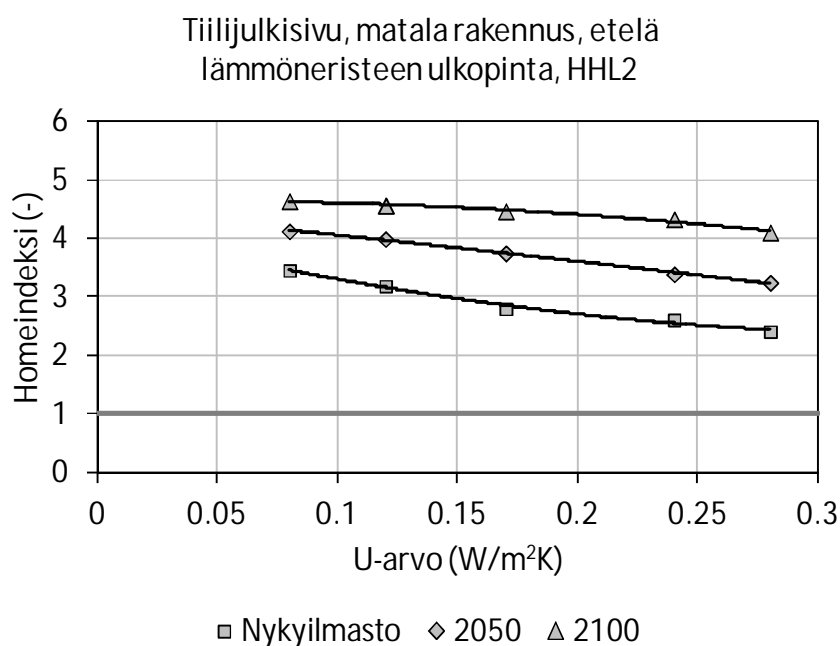
Kuva 2. Homeen kasvu runkotolpan ulkopinnassa matalassa tiiliverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään muovipohjaista tuulensuojakalvoa (B1).



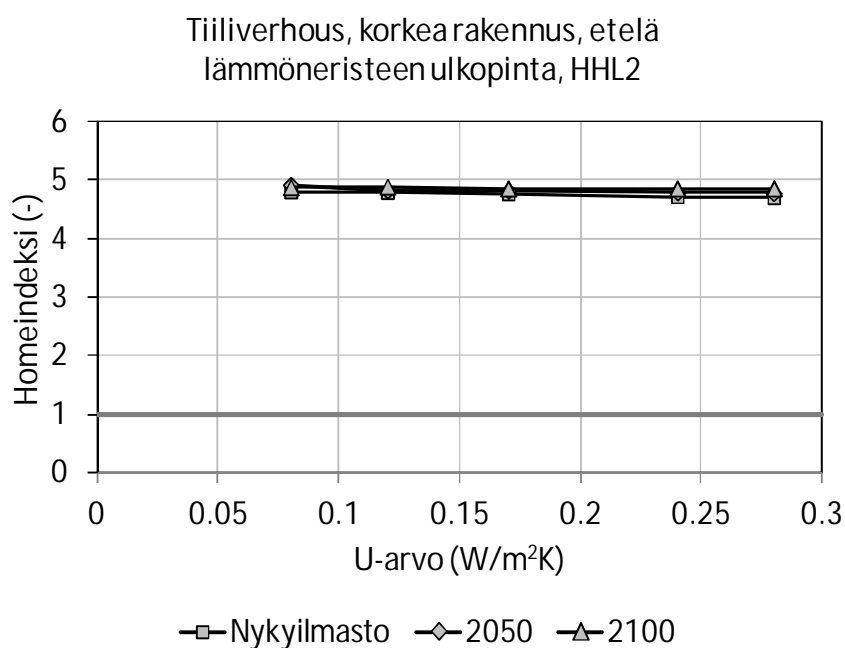
Kuva 3. Homeen kasvu lämmöneristeen ulkopinnassa korkeassa tiiliverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään muovipohjaista tuulensuojakalvoa (B1).



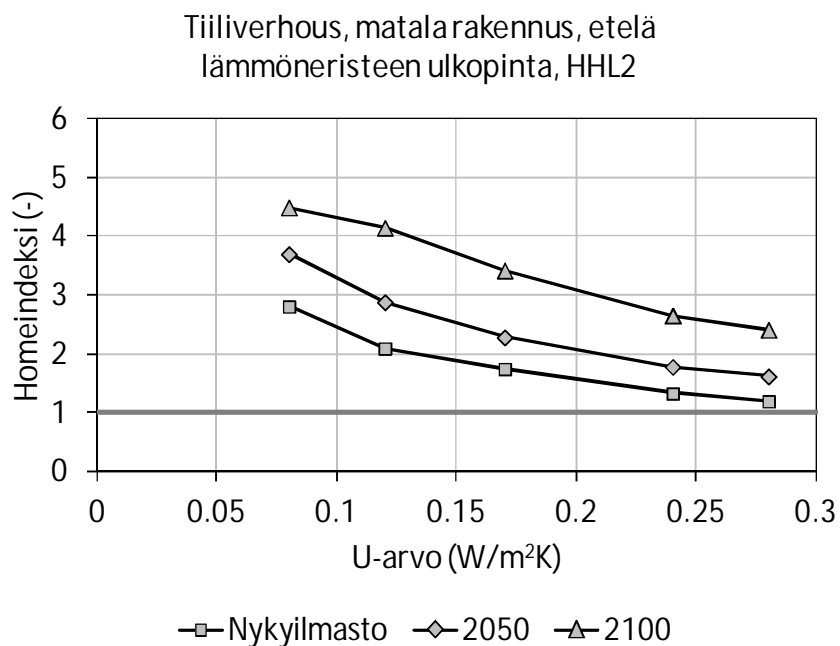
Kuva 4. Homeen kasvu runkotolpan ulkopinnassa korkeassa tiiliverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään muovipohjaista tuulensuojakalvoa (B1).



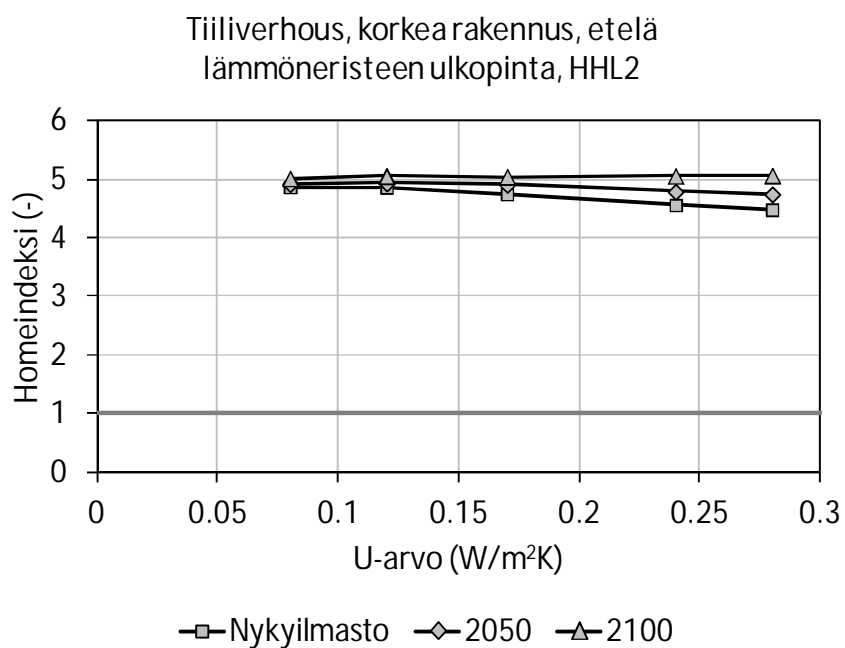
Kuva 5. Homeen kasvu lämmöneristeen ulkopinnassa matalassa tiiliverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään 9 mm paksua tuulensuojakipsilevyä (A1).



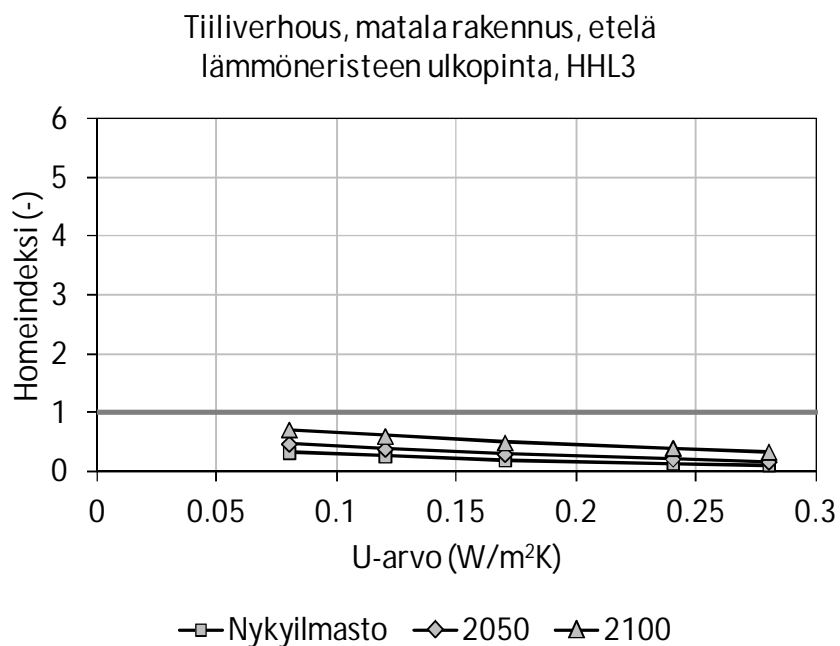
Kuva 6. Homeen kasvu lämmöneristeen ulkopinnassa korkeassa tiiliverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään 9 mm paksua tuulensuojakipsilevyä (A1).



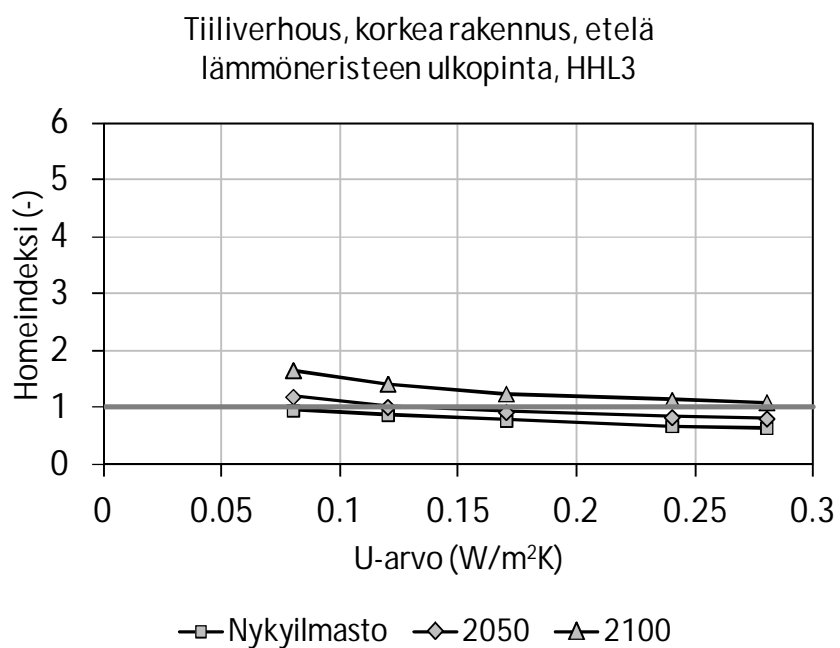
Kuva 7. Homeen kasvu lämmöneristeen ulkopinnassa matalassa tiiliverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään 25 mm paksua huokoista puukuitulevyä (A2).



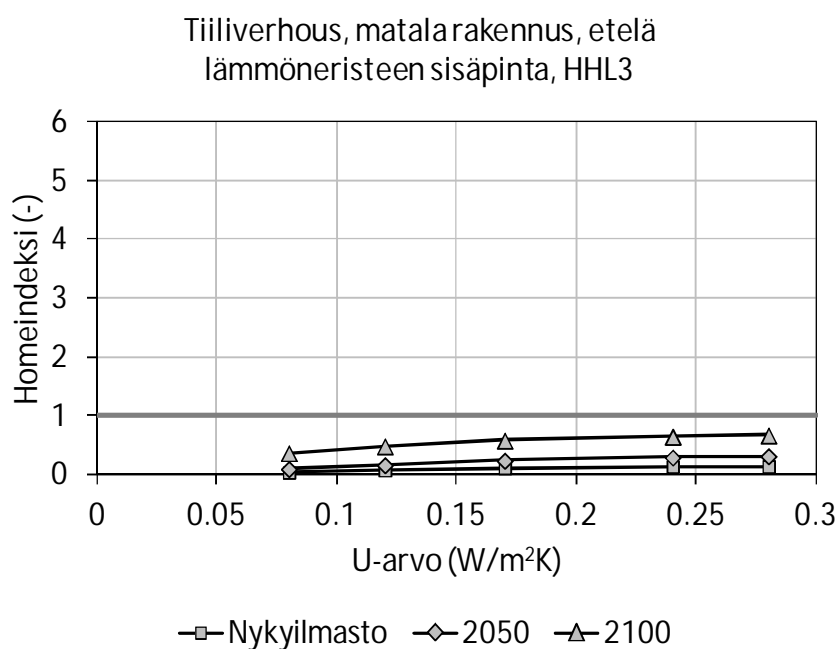
Kuva 8. Homeen kasvu lämmöneristeen ulkopinnassa korkeassa tiiliverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään 25 mm paksua huokoista puukuitulevyä (A2).



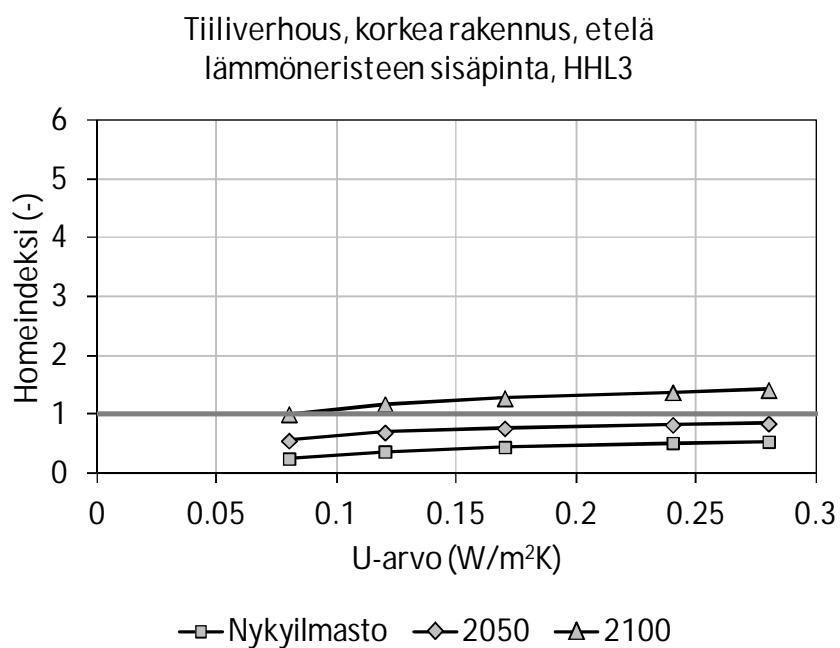
Kuva 9. Homeen kasvu lämmöneristeen ulkopinnassa matalassa tiiliverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään 30 mm paksua mineraalivillalevyä (A3).



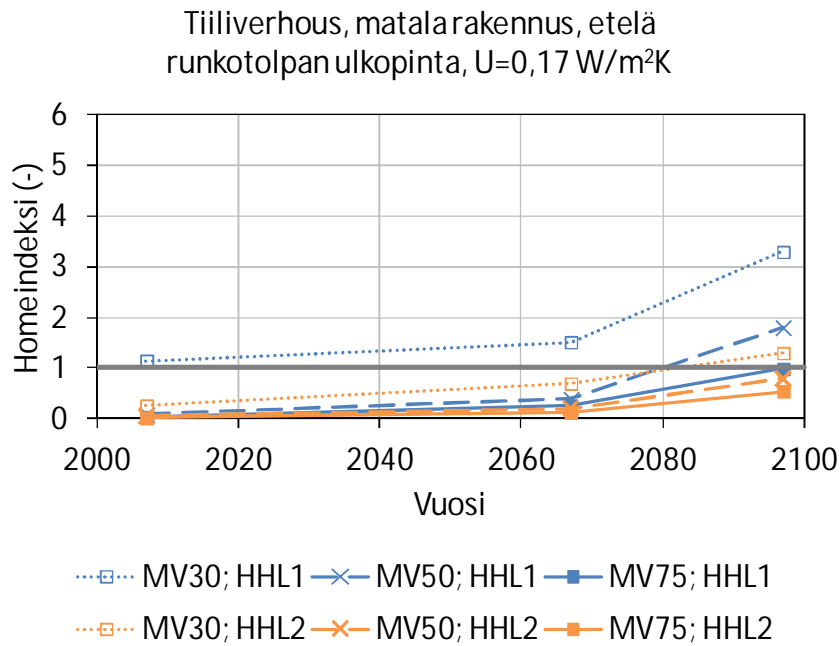
Kuva 10. Homeen kasvu lämmöneristeen ulkopinnassa korkeassa tiiliverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään 30 mm paksua mineraalivillalevyä (A3).



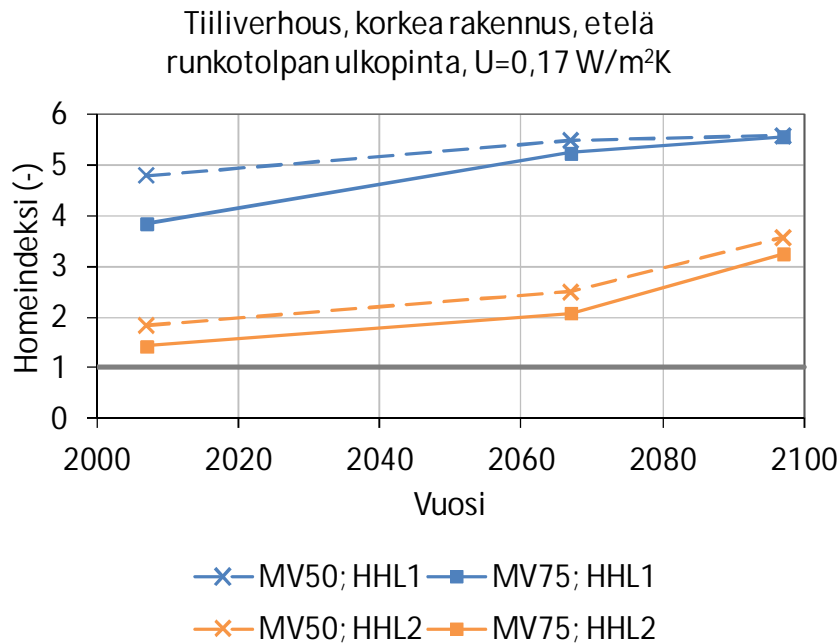
Kuva 11. Homeen kasvu lämmöneristeen sisäpinnassa matalassa tiiliverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään 30 mm paksua mineraalivillalevyä (A3).



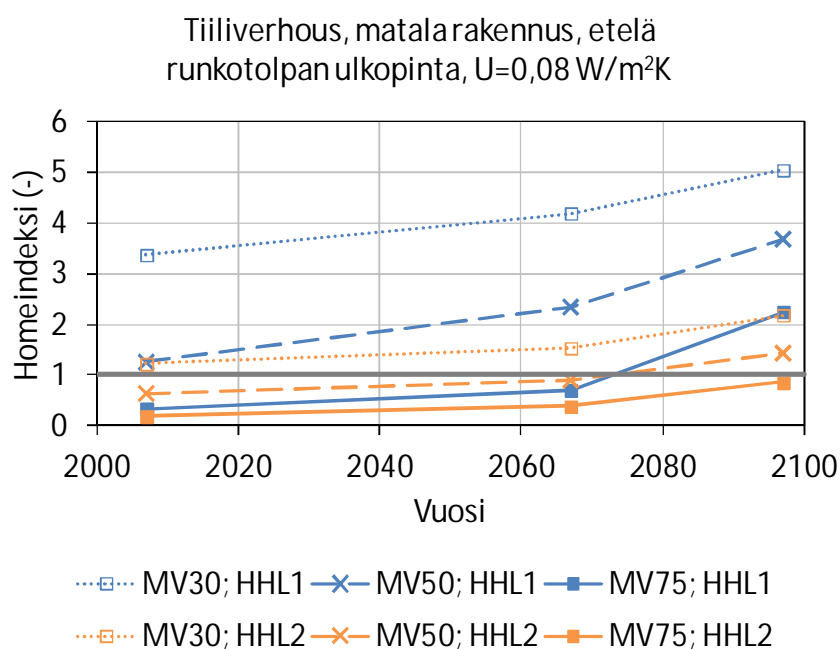
Kuva 12. Homeen kasvu lämmöneristeen sisäpinnassa korkeassa tiiliverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään 30 mm paksua mineraalivillalevyä (A3).



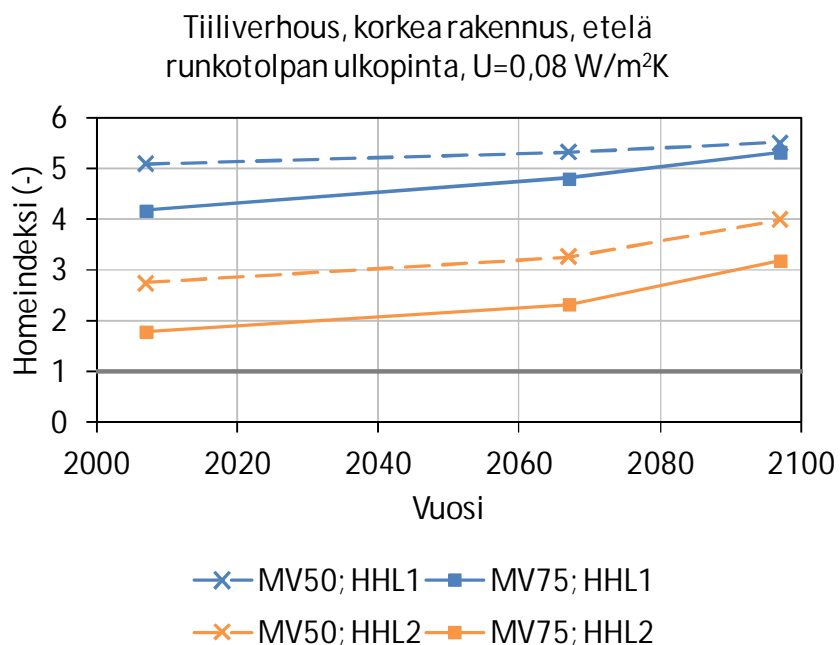
Kuva 13. Homeen kasvu runkotolpan ulkopinnassa matalassa tiiliverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään mineraalivillalevyä ja seinän runkomateriaalina sahattua mäntyä (HHL1) tai höylättyä kuusta (HHL2).



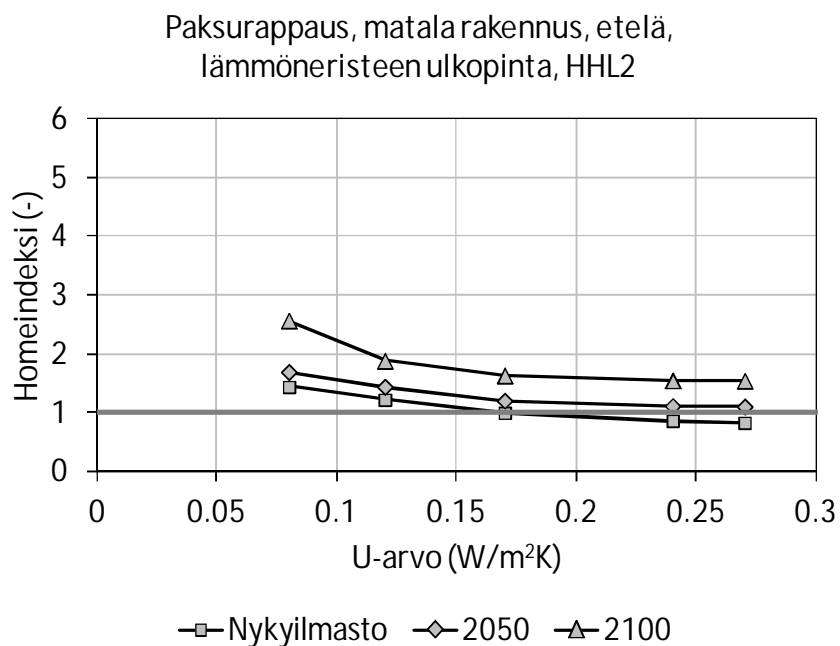
Kuva 14. Homeen kasvu runkotolpan ulkopinnassa korkeassa tiiliverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään mineraalivillalevyä ja seinän runkomateriaalina sahattua mäntyä (HHL1) tai höylättyä kuusta (HHL2).



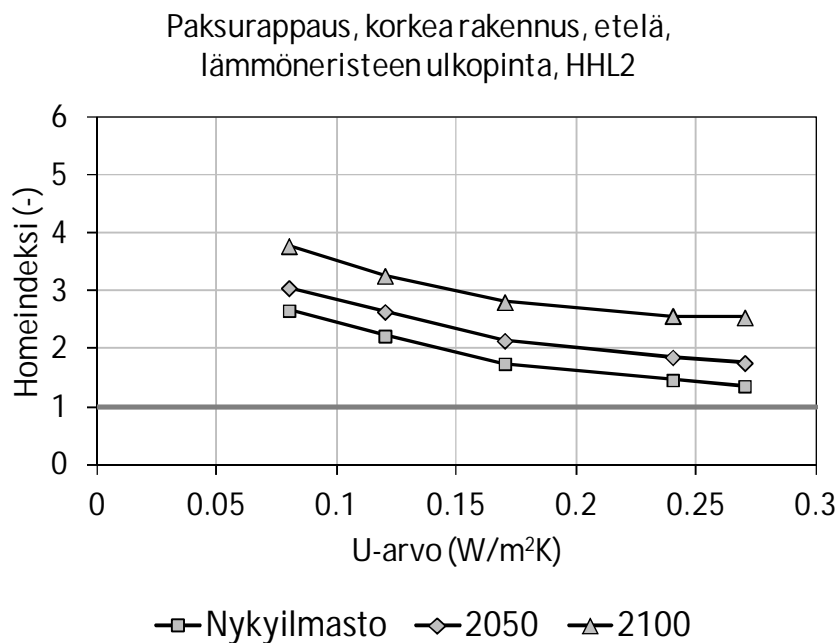
Kuva 15. Homeen kasvu runkotolpan ulkopinnassa matalassa tiiliverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään mineraalivillalevyä ja seinän runkomateriaalina sahattua mäntyä (HHL1) tai höylättyä kuusta (HHL2).



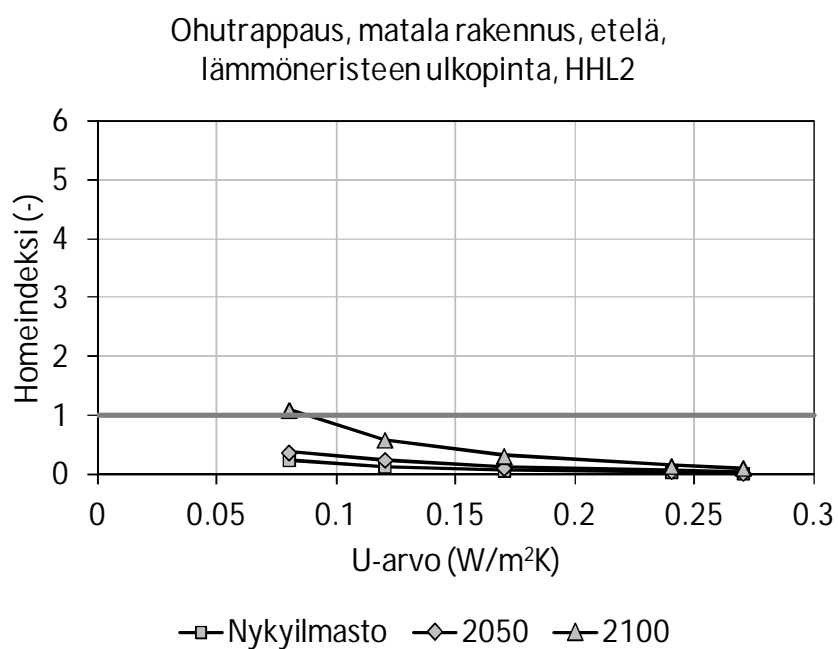
Kuva 16. Homeen kasvu runkotolpan ulkopinnassa korkeassa tiiliverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään mineraalivillalevyä ja seinän runkomateriaalina sahattua mäntyä (HHL1) tai höylättyä kuusta (HHL2).



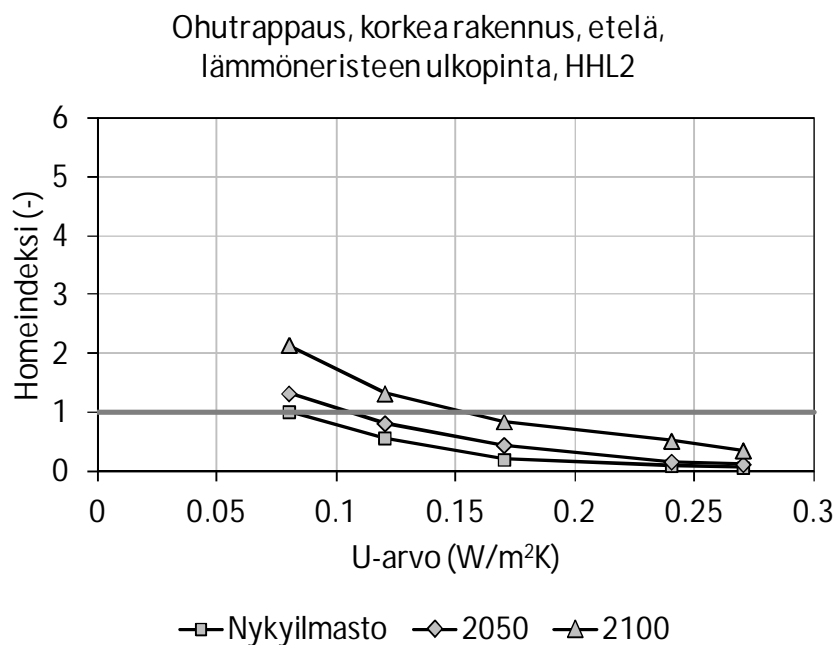
Kuva 1. Homeen kasvu lämmöneristeen ulkopinnassa matalassa eristerapatussa rankaseinässä, kun rappauksena käytetään jalolaastilla päällystettyä paksurappausta.



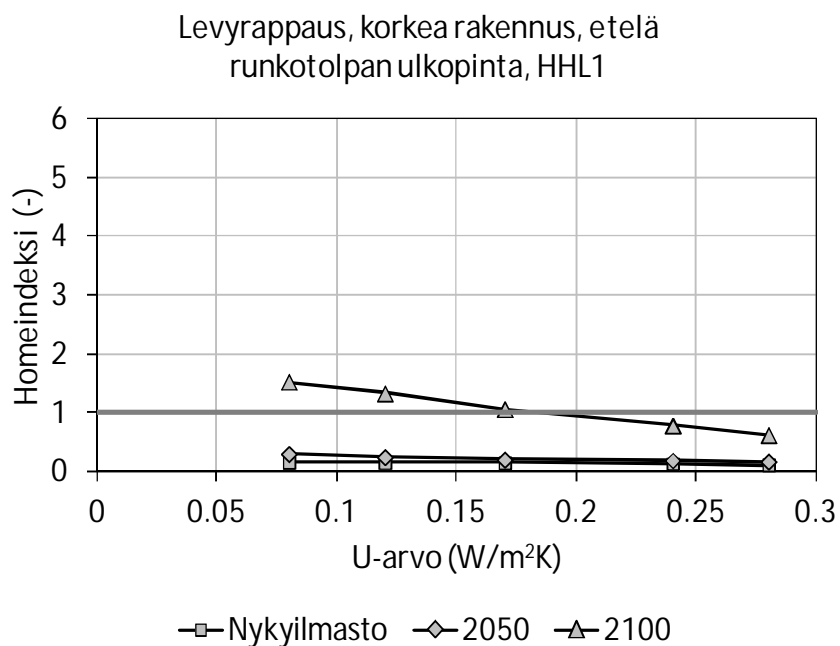
Kuva 2. Homeen kasvu lämmöneristeen ulkopinnassa korkeassa eristerapatussa rankaseinässä, kun rappauksena käytetään jalolaastilla päällystettyä paksurappausta.



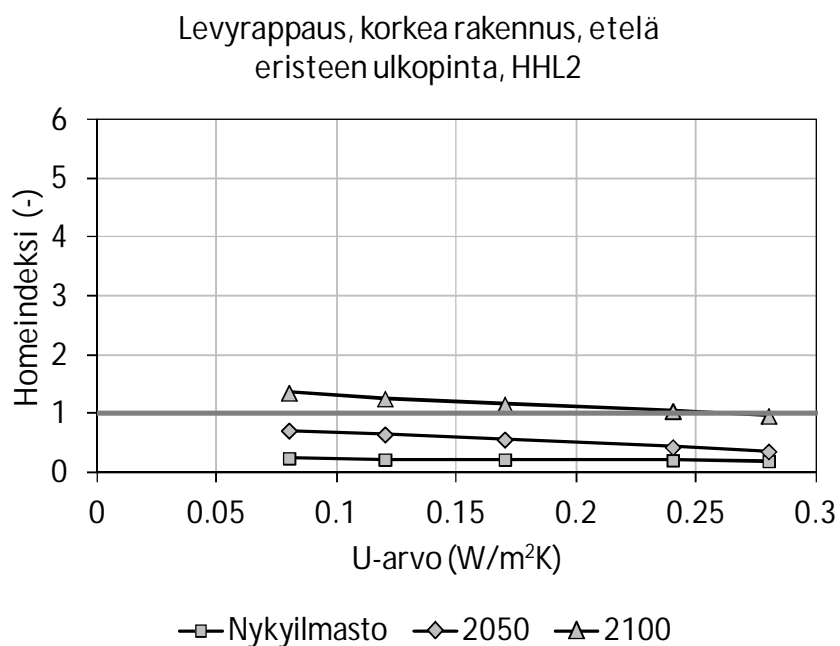
Kuva 3. Homeen kasvu lämmöneristeen ulkopinnassa matalassa eristerapatussa rankaseinässä, kun rappauksena käytetään hiertopinnoitteella päällystettyä ohutrappausta.



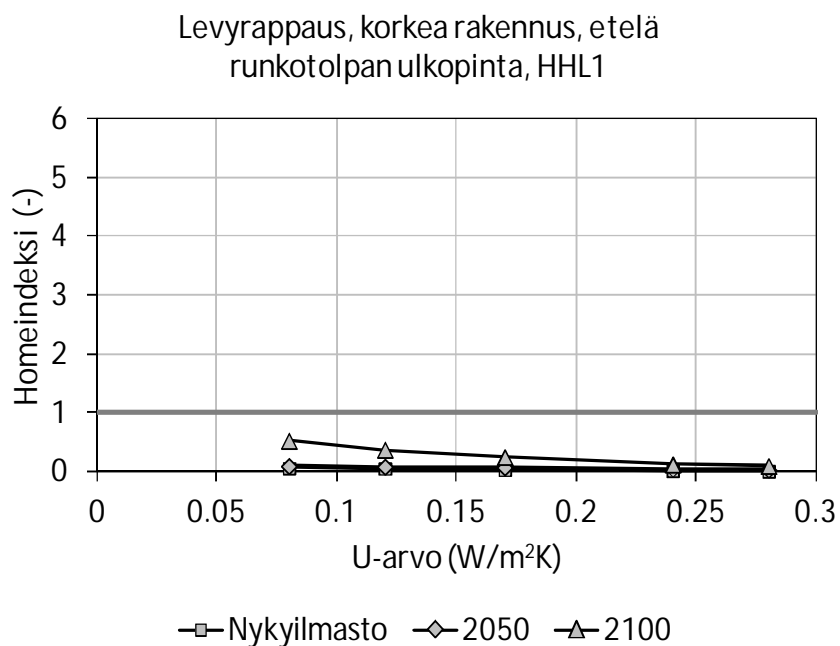
Kuva 4. Homeen kasvu lämmöneristeen ulkopinnassa korkeassa eristerapatussa rankaseinässä, kun rappauksena käytetään hiertopinnoitteella päällystettyä ohutrappausta.



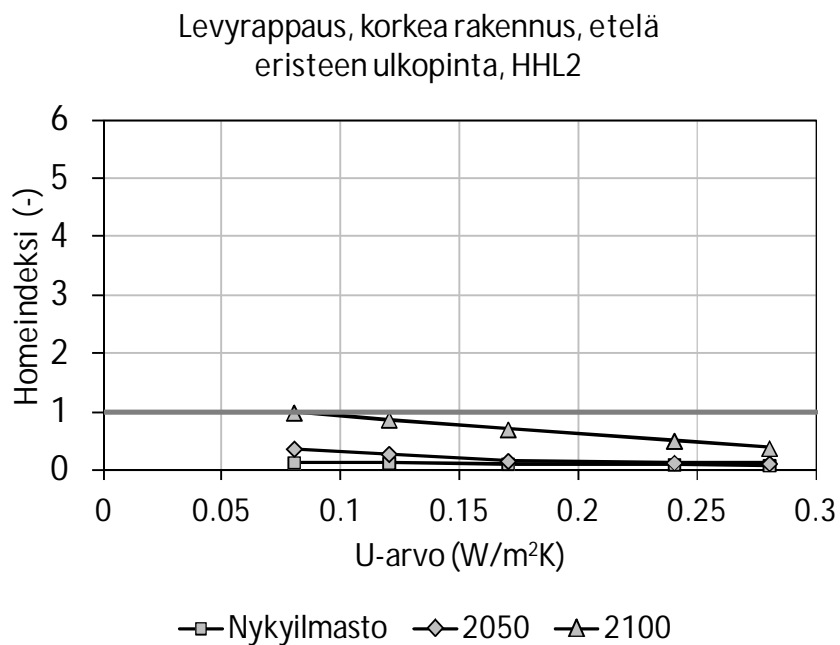
Kuva 1. Homeen kasvu runkotolpan ulkopinnassa korkeassa levyrapatussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään 9 mm paksua tuulensuojakipsilevyä (A1).



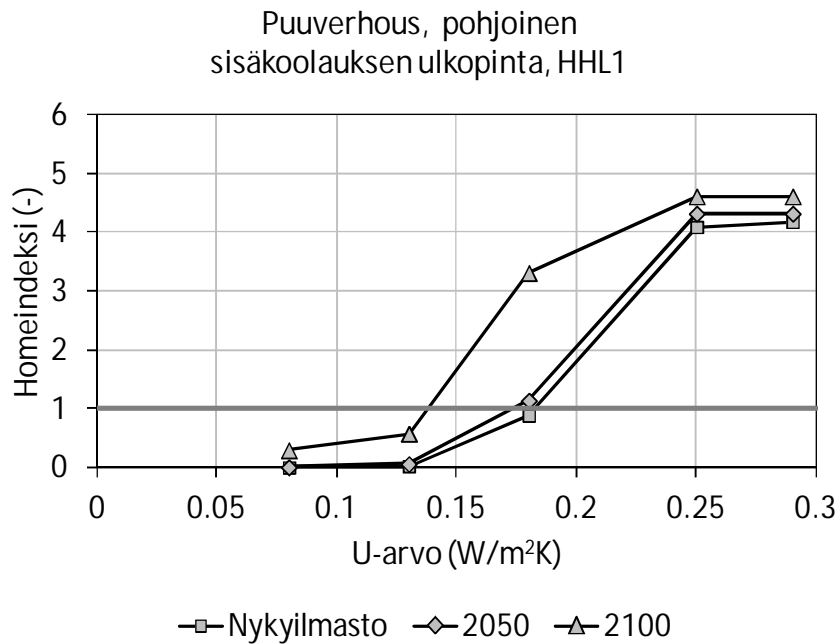
Kuva 2. Homeen kasvu lämmöneristeen ulkopinnassa korkeassa levyrapatussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään 9 mm paksua tuulensuojakipsilevyä (A1).



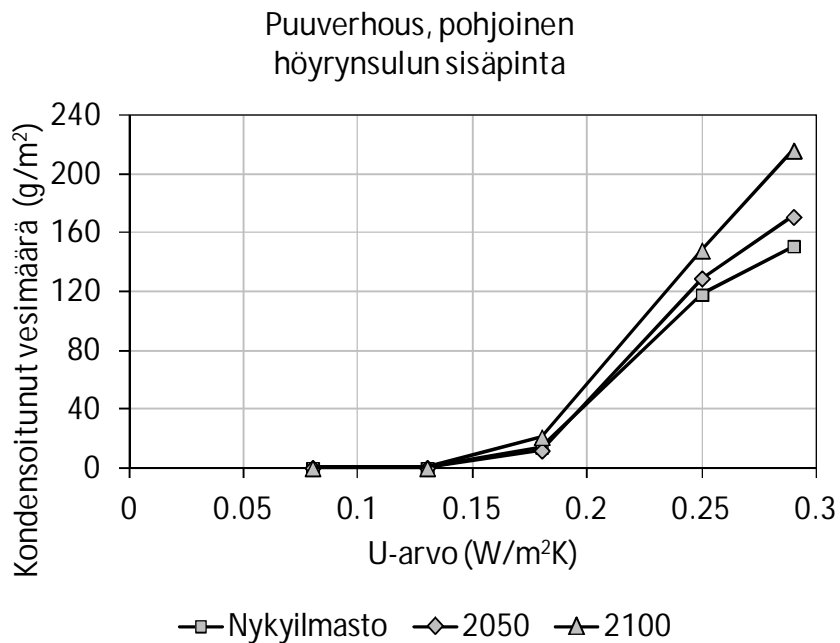
Kuva 3. Homeen kasvu runkotolpan ulkopinnassa korkeassa levyrapatussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään 12 mm paksua huokoista puukuitulevyä (A13).



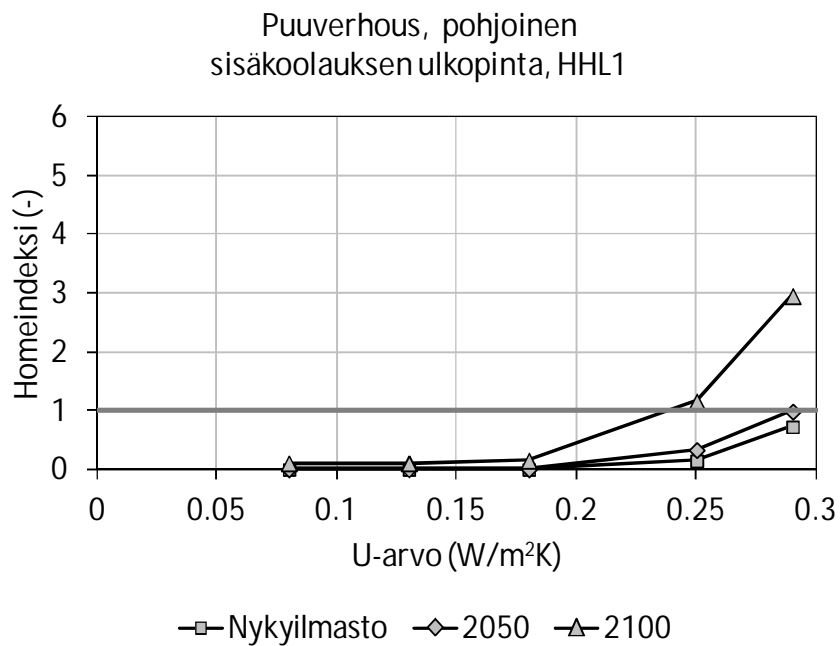
Kuva 4. Homeen kasvu lämmöneristeen ulkopinnassa korkeassa levyrapatussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään 12 mm paksua huokoista puukuitulevyä (A13).



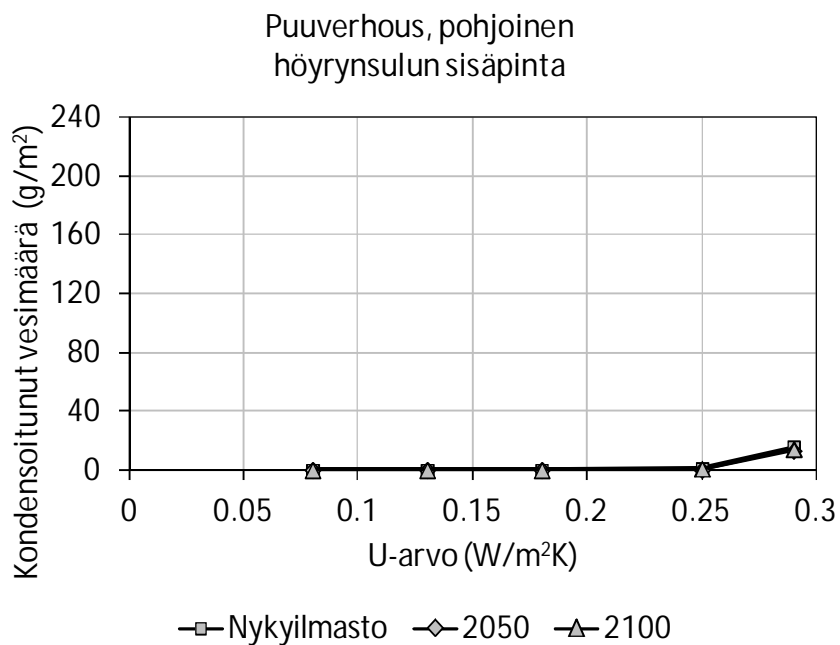
Kuva 1. Homeen kasvu sisäpuolisen vaakakoolauksen ulkopinnassa pystyrungon kohdalla, kun tuulensuojana käytetään tuulensuojakalvoa (B1).



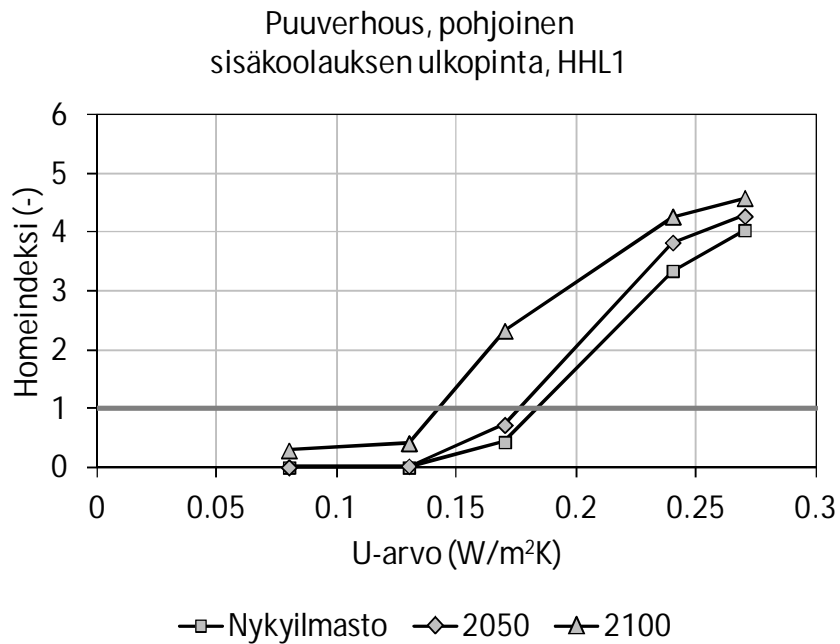
Kuva 2. Kondenssi höyrinsulun sisäpinnassa pystyrungon kohdalla, kun tuulensuojana käytetään tuulensuojakalvoa (B1) ja sisäpinnassa vaakakoolausta.



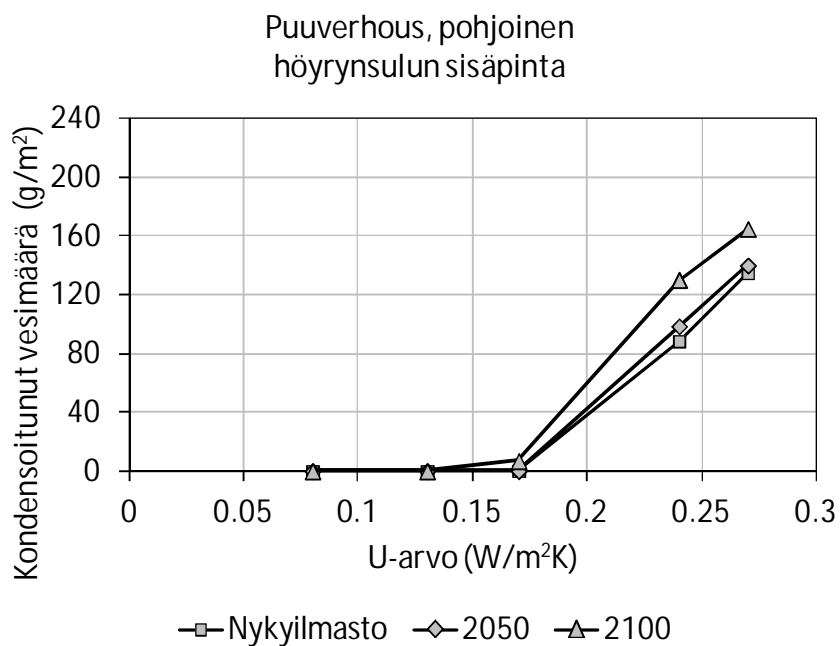
Kuva 3. Homeen kasvu sisäpuolisen pystykoolauksen ulkopinnassa pystyrungon kohdalla, kun tuulensuojana käytetään tuulensuojakalvoa (B1).



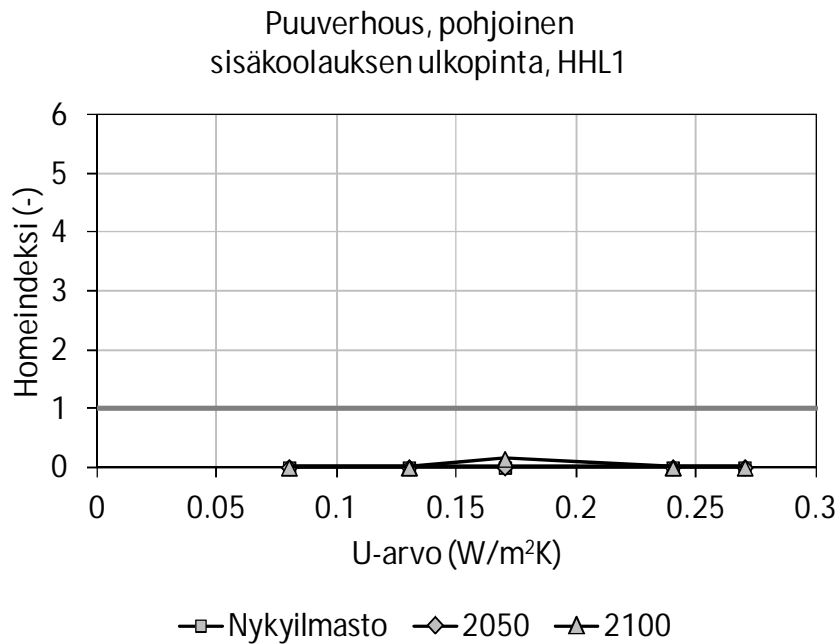
Kuva 4. Kondenssi höyrinsulun sisäpinnassa pystyrungon kohdalla, kun tuulensuojana käytetään tuulensuojakalvoa (B1) ja sisäpinnassa pystykoolausta.



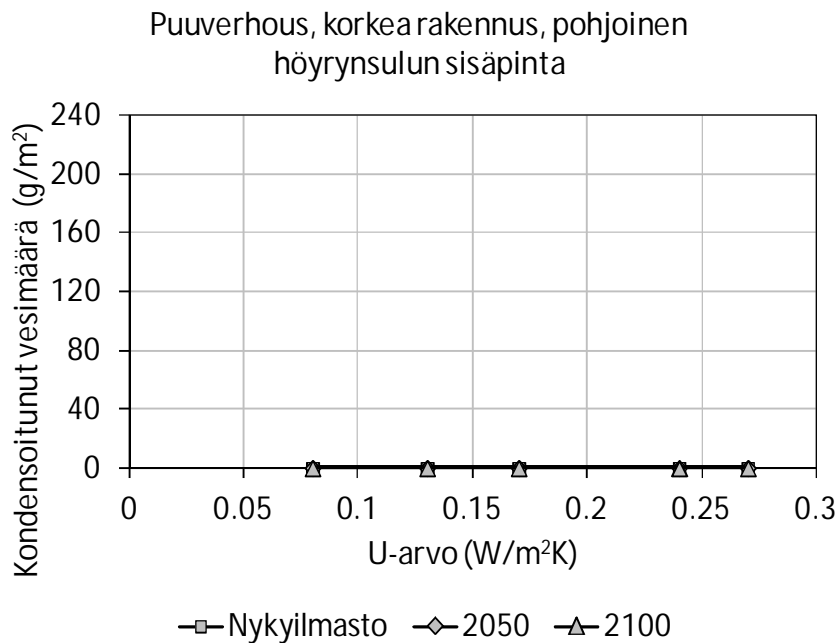
Kuva 5. Homeen kasvu sisäpuolisen vaakakoolauksen ulkopinnassa pystyrungon kohdalla, kun tuulensuojana käytetään 12 mm paksua huokoista puukuitulevyä (A13).



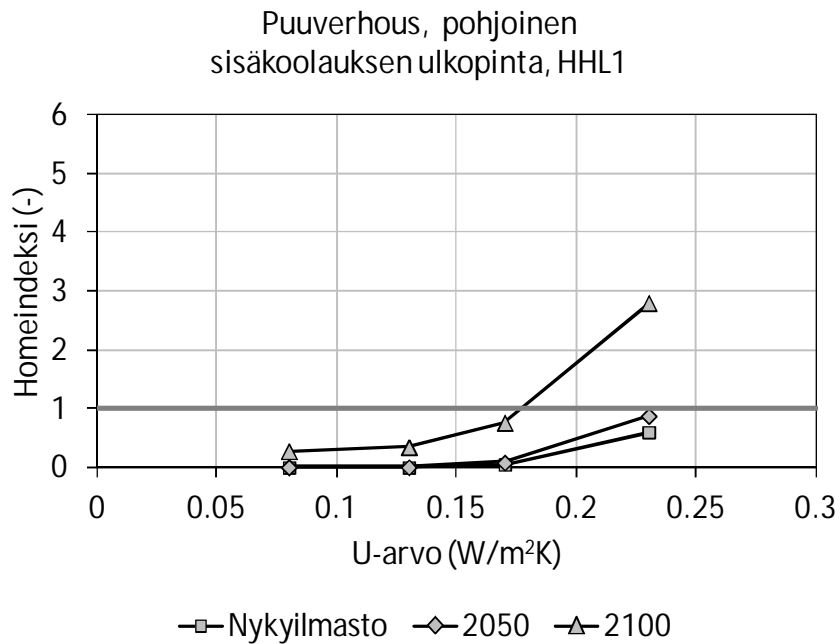
Kuva 6. Kondenssi höyrynsulun sisäpinnassa pystyrungon kohdalla, kun tuulensuojana käytetään 12 mm paksua huokoista puukuitulevyä (A13) ja sisäpinnassa vaakakoolautta.



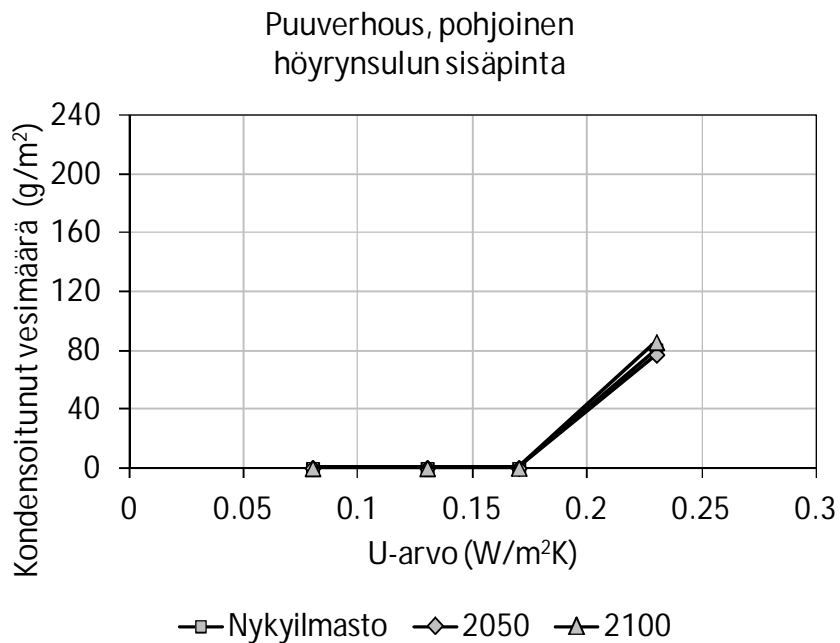
Kuva 7. Homeen kasvu sisäpuolisen pystykoolauksen ulkopinnassa pystyrungon kohdalla, kun tuulensuojana käytetään 12 mm paksua huokoista puukuitulevyä (A13).



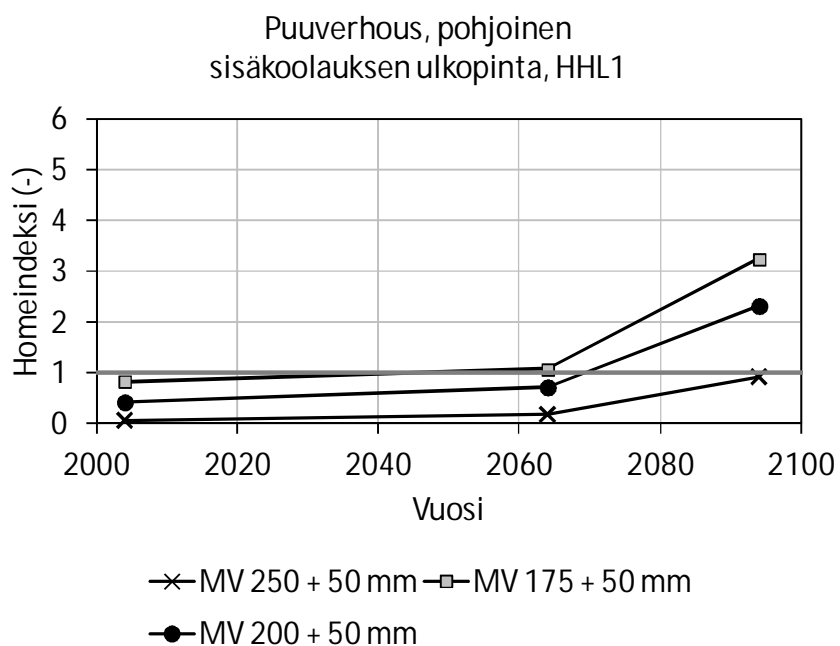
Kuva 8. Kondenssi höyrynsulun sisäpinnassa pystyrungon kohdalla, kun tuulensuojana käytetään 12 mm paksua huokoista puukuitulevyä (A13) ja sisäpinnassa pystykoolausta.



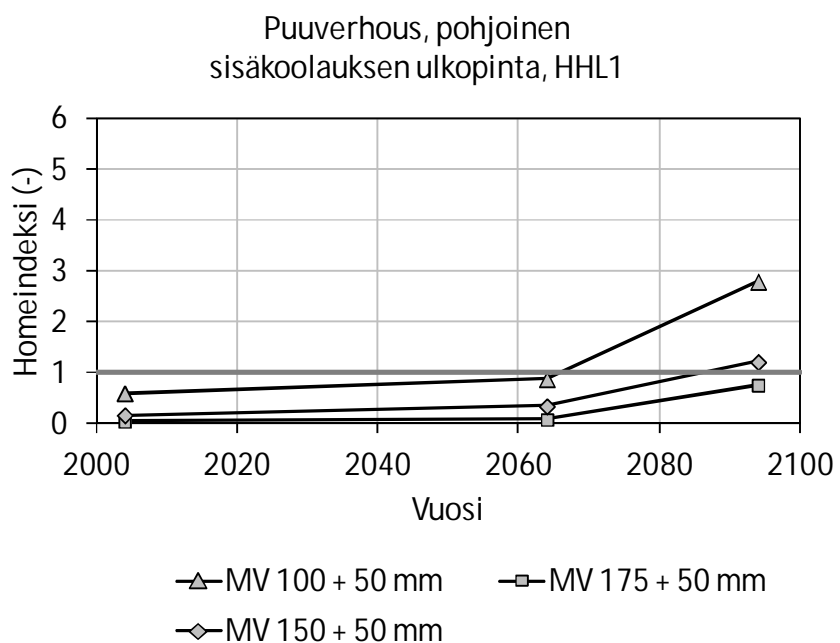
Kuva 9. Homeen kasvu sisäpuolisen vaakakoolauksen ulkopinnassa pystyrungon kohdalla, kun tuulensuojana käytetään 30 mm paksua mineraalivillalevyä (A3).



Kuva 10. Kondenssi höyrynsulun sisäpinnassa pystyrungon kohdalla, kun tuulensuoja-
na käytetään 30 mm paksua mineraalivillalevyä (A3) ja sisäpinnassa vaakakoolausta.



Kuva 1. Homeen kasvu sisäpuolisen vaakakoolauksen ulkopinnassa pystyrungon kohdalla, kun tuulensuojana käytetään 12 mm paksua huokoista puukuitulevyä (A13).



Kuva 2. Homeen kasvu sisäpuolisen vaakakoolauksen ulkopinnassa pystyrungon kohdalla, kun tuulensuojana käytetään 30 mm paksua mineraalivillalevyä (A3).