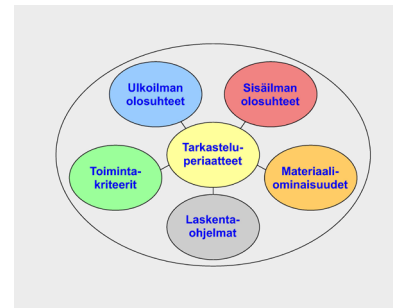


Juha Vinha, Anssi Laukkarinen, Mikael Mäkitalo, Sakari Nurmi, Petteri Huttunen, Tomi Pakkanen, Paavo Kero, Elina Manelius, Jukka Lahdensivu, Arto Köliö, Kimmo Lähdesmäki, Jarkko Piironen, Vesa Kuhno, Matti Pirinen, Anu Aaltonen, Jommi Suonketo, Juha Jokisalo, Olli Teriö, Anssi Koskenvesa & Tuomas Palolahti

**Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset
vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja
rakennusten energiankulutuksessa**



Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Rakennetekniikka.
Tutkimusraportti 159
Tampere University of Technology. Department of Civil Engineering. Structural
Engineering. Research Report 159

Juha Vinha, Anssi Laukkarinen, Mikael Mäkitalo, Sakari Nurmi, Petteri Huttunen, Tomi Pakkanen, Paavo Kero, Elina Manelius, Jukka Lahdensivu, Arto Köliö, Kimmo Lähdesmäki, Jarkko Piironen, Vesa Kuhno, Matti Pirinen, Anu Aaltonen, Jommi Suonketo, Juha Jokisalo, Olli Teriö, Anssi Koskenvesa & Tuomas Palolahti

Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa

ISBN 978-952-15-2948-1 (painettu)
ISBN 978-952-15-2949-8 (PDF)
ISSN 1797-9161



Juha Vinha, Anssi Laukkarinen, Mikael Mäkitalo, Sakari Nurmi, Petteri Huttunen, Tomi Pakkanen, Paavo Kero, Elina Manelius, Jukka Lahdensivu, Arto Köliö, Kimmo Lähdesmäki, Jarkko Piironen, Vesa Kuhno, Matti Pirinen, Anu Aaltonen, Jommi Suonketo, Juha Jokisalo, Olli Teriö, Anssi Koskenvesa, Tuomas Palolahti

ILMASTONMUUTOKSEN JA LÄMMÖNERISTYKSEN LISÄYKSEN VAIKUTUKSET VAIPPARAKENTEIDEN KOSTEUSTEKNISESSÄ TOIMINNASSA JA RAKENNUSTEN ENERGIANKULUTUKSESSA

Tutkimusraportti 159, 354 s. + 43 liites.

Kesäkuu 2013

Hakusanat: ilmastonmuutos, lämmöneristys, vaipparakenteet, kosteustekninen toiminta, analysointimenetelmä, laskennallinen tarkastelu, testivuosi, homeen kasvu, kosteuden kondensoituminen, sisäinen konvektio, energiankulutus, sisäilman olosuhteet, rakennustyömaa, kosteudenhallinta

Tiivistelmä

Tämä tutkimusraportti liittyy vuosina 2009–2012 toteutettuun FRAME-tutkimusprojektiin, jonka keskeisenä tavoitteena on ollut selvittää ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutuksia vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa Suomen ilmastossa. Tavoitteena on ollut myös selvittää millä rakenteellisilla tai muilla teknisillä ratkaisuilla vaipparakenteiden kosteusteknistä toimintaa voidaan parhaiten parantaa. Tutkimuksen muina tavoitteina on ollut selvittää ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutuksia vaipparakenteiden lämpötekniisessä toiminnassa, sisäilman olosuhteissa ja LVI-järjestelmien käytössä sekä laatia uusia ohjeistuksia rakennustyömaan kosteudenhallintaa varten. Tutkimuksessa on keskitytty tavanomaisten tai riskialttiiksi tiedettyjen rakenteiden toiminnan tarkasteluun.

Tutkimuksen yhteydessä Tampereen teknillisessä yliopistossa on saatu valmiiksi uusi rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmä, jolla voidaan aiempaa luotettavammin tarkastella rakenteissa ilmeneviä kosteusriskejä sekä nykyisessä että tulevaisuuden ilmastossa. Suurin osa tämän tutkimuksen tuloksista perustuu tällä menetelmällä tehtyihin laskentatarkasteluihin. Menetelmällä saatujen tulosten avulla rakenteet voidaan suunnitella jatkossa siten, että ne kestävät myös poikkeuksellisen rasittavien sääolojen vaikutukset muuttuvassa ilmastossa.

Tärkeä osa uutta analysointimenetelmää ovat ulkoilman rakennusfysikaaliset testivuodet Suomen ilmastossa. Nämä testivuodet määritettiin TTY:llä Ilmatieteen laitoksen mittaaman ja määrittämän säädäntä avulla sekä nykyilmastossa että tulevaisuuden ilmastossa (vuosien 2050 ja 2100 ilmastot). Jokaisesta ilmastosta määritettiin kaksi testivuotta, joiden avulla voidaan tarkastella lähes kaikkien vaipparakenteiden kosteusteknistä toimintaa kriittisissä kosteusolosuhteissa. Tulevaisuuden ilmastoista määritetyt testivuodet perustuvat A2-ilmastonmuutoskennärioon, jonka perusteella Ilmatieteen laitos on laatinut ennusteen ulkoilman olosuhteiden muuttumisesta.

Ilmastonmuutos ja lämmöneristyksen lisäys heikentävät useiden nykyisellä tavalla toteutettujen vaipparakenteiden kosteusteknistä toimintaa ja vikasietoisuutta, koska rakenteiden sisällä lämpötila- ja kosteusolosuhteet muuttuvat. Osassa rakenteita muutos on erittäin suuri.

Ennustetun ilmastonmuutoksen seurauksena ulkolämpötilat nousevat, sademäärät kasvavat ja pilvisuus lisääntyy. Myös ulkoilman suhteellinen kosteus voi nousta ja tuulisuus lisääntyä jossain määrin. Nämä kaikki tekijät lisäävät homeen kasvua ja kosteuden kondensoitumista varsinkin rakenteiden ulko-osissa ja joissakin tapauksissa myös muualla rakenteessa. Lisäksi rakenteiden kuivuminen hidastuu ja kuivumisajat pitenevät.

Lämmöneristyksen lisäys vähentää puolestaan lämmön siirtymistä vaipparakenteiden läpi, jolloin lämpötila laskee rakenteen ulko-osassa ja suhteellinen kosteus nousee. Myös tämä asia lisää homeen kasvua ja kosteuden kondensoitumista rakenteen ulko-osassa. Rakenteiden vikasietoisuus heikkenee samasta syystä, koska sisältä tuleva lämpö ei pysty kuivattamaan rakenteita samalla tavoin, jos niihin pääsee ylimääräistä kosteutta ajoittaisen kosteusvuodon tai poikkeuksellisten sääolojen seurauksena.

Rakenteiden kosteusriskit lisääntyvät myös rakenneratkaisujen, lämmöneristetyyppien ja toteutustapojen muutosten seurauksena. Muutosten vaikutus rakenteiden kosteustekniseen toimintaan on tunnettava, joten rakennusalalla tarvitaan näihin asioihin liittyen jatkossa paljon koulutusta.

Rakenteiden vikasietoisuuden heikkeneminen korostaa jatkossa entisestään rakennusaikaisen kosteudenhallinnan merkitystä. Rakenteet ja materiaalit tulee suojata sadeveden vaikutuksilta niin hyvin kuin mahdollista, ja rakenteille on varattava riittävästi kuivumisaikaa ennen tiiviiden pinnoitteiden tai kuvumista hidastavien peittävien rakenteiden asentamista. Varsinkin puurakenteiset talot on suositeltavaa tehdä suojateltan sisällä.

Lähes kaikki vaipparakenteet saadaan toimiviksi myös seuraavan 100 vuoden aikana rakenteellisten muutosten ja toteutusohjeiden muutoksien avulla. Puurakenteiden kosteusteknistä toimintaa voidaan parantaa merkittävästi laittamalla kantavien rakenteiden ulkopuolelle lämmöneristystä. Betoni- ja kivirakenteiden kuivumiseen on puolestaan varattava lisää aikaa, jos niiden ulkopuolella käytetään lämmöneristeenä solumuovieristeitä. Liitosten ja detaljien toimivuuteen tulee kiinnittää erityistä huomiota. Niillä on oleellisen merkitys koko rakenteen toimivuudelle.

Uudet betonirakenteet ovat kosteusteknisesti toimivia, jos ne tehdään nykyisten ohjeiden mukaisesti. Raudotteiden sijainti tulee olla normien ja toleranssien mukainen ja ruostumattomien terästen käyttö julkisivuissa on suositeltavaa (erityisesti pieliteräkset). Pakkaskestävyyden suhteen nykyinen vaatimustaso on riittävä, jos betoni lisähuokostetaan ohjeiden mukaisesti. Pakkasrapautumisvaurioita saattaa kuitenkin alkaa esiintyä vanhassa rakennuskannassa myös sisämaassa ilmastonmuutoksen myötä. Lämmöneristyksen lisäys ei vaikuta betonijulkisivun kosteustekniseen toimintaan.

Massiivirakenteet, kuten hirsi- ja kevytbetonirakenteet, tulisi lämmöneristää aina ulkopuolelta hyvin vesihöyryä läpäisevällä eristeellä. Jos rakenteita eristetään sisäpuolelta, niiden on päästävä kuivumaan riittävästi ennen sisäpuolisen lämmöneristeen ja höyrynsulun laitoa. Höyrynsululta vaadittava vesihöyrynvastus riippuu oleellisesti sisäpuolisen lämmöneristyksen lämmönvastuksesta.

Matalassa tiiliverhotussa puurunkoisessa ulkoseinässä tarvitaan erittäin hyvin lämpöä eristävä tuulensuoja puurakenteen ulkopuolella. Korkeassa tiiliverhotussa ulkoseinässä (>10 m) puurakenteen ja tiiliverhouksen väliin on laitettava kummaltakin puolelta tuuletettu höyrynsulkukerros, joka estää kosteuden siirtymisen diffuusiolla verhouksesta takana olevaan seinärakenteeseen. Tämä höyrynsulkukerros toimii samalla rakennusaikaisena sääsuojana.

Puurakenteen päälle tehtävän eristerappauksen käytöstä on syytä luopua kokonaan, koska sadevesi pääsee tunkeutumaan herkästi ulkoverhouksen liitos- ja läpivientikohdista rakenteeseen ja sen kuivuminen on hidasta. Rappauspinta voidaan tehdä puurakenteisiin ulkoseiniin kuitenkin tuuletettua levyrappausta käyttämällä.

Puurakenteisiin tuuletettuihin yläpohjiin tulisi laittaa lämmöneristystä kantavien puurakenteiden yläpuolelle. Tämä voidaan toteuttaa esimerkiksi lämpöä eristävän aluskatteen tai tuulensuojan avulla. Aluskatteen on täytettävä myös kaikki muut sille asetetut vaatimukset.

Ryömintätilaisissa alapohjissa maanpinnan tulee olla kauttaaltaan lämmöneristetty varsinkin puurakenteista alapohjaa käytettäessä. Myös sepelikerroksen käyttö maanpinnalla parantaa ryömintätilaisen alapohjan kosteusteknistä toimintaa merkittävästi. Kantavien puurakenteiden alapuolella olevan tuulensuojan tulee olla kosteutta kestävä ja hyvin lämpöä eristävä.

Uusien talojen vaipparakenteet voidaan myös tulevaisuudessa toteuttaa niin, että erillisiä teknisiä laitteita ja järjestelmiä (kuivaimet, lämmittimet tai ilmanvaihtojärjestelmät) ei tarvita rakennuksen käytön aikana rakenteiden kosteusteknisen toiminnan varmistamisessa. Sen sijaan korjausten yhteydessä tehtävän lisäeristämisen seurauksena joidenkin rakenteiden toiminta voi edellyttää näiden laitteiden käyttöä.

Kosteuden tiivistyminen ja huurtuminen ikkunoiden ulkopintaan lisääntyy voimakkaasti, jos ikkunoiden lasiosien lämmönläpäisykerrointa eli U-arvoa parannetaan nykyisestä tasosta. Kosteuden tiivistyminen on ajoittain ongelmana jo nykyisissäkin ikkunoissa. Ikkunan ulkopintaan laitettava selektiivipinnoite poistaa tämän ongelman.

Yläpohjien lämmöneristekerroksessa tapahtuvat ilmavirtaukset heikentävät paksujen puhalluseristeiden lämmöneristyskykyä merkittävästi. Ilmavirtausten vähentäminen edellyttää puhalluseristeiden ilmanläpäisevyyden pienentämistä esimerkiksi tiheyttä kasvattamalla tai käyttämällä eristeen joukossa sideainetta. Ulkoseinärakenteissa ilmavirtausten vaikutus rakenteiden toimintaan on nykyisillä eristepaksuuksilla oleellisesti vähäisempi.

Vaipparakenteiden lämmöneristysten lisääminen Suomen rakentamismääräysten nykyisestä vertailutasosta ei ole enää taloudellisesti kannattavaa kerrostaloissa ja toimistorakennuksissa. Pientaloissa kannattavuus riippuu siitä, kuinka pitkä takaisinmaksuaika lisäeristämislle hyväksytään. Tämä johtuu lisäeristämällä saavutettavan energiansäästön vähenemisestä ja rakennusten jäähdystarpeen kasvusta. Jo vuoden 2007 lämmöneristysmääräykset olisivat olleet kerrostaloissa ja toimistorakennuksissa varsin riittäviä.

Tutkimuksen yhteydessä on laadittu matalaenergia- ja passiivitalojen rakenteille ja liitoksille suunnitteluohjeet, joissa esitetään keskeisiä toteutusperiaatteita ja huomioon otettavia asioita vaipparakenteita suunniteltaessa ja toteutettaessa. Ohjeessa on keskitytty tavanomaisimpien ja tyypillisimpien rakenteiden tarkasteluun.



Juha Vinha, Anssi Laukkarinen, Mikael Mäkitalo, Sakari Nurmi, Petteri Huttunen, Tomi Pakkanen, Paavo Kero, Elina Manelius, Jukka Lahdensivu, Arto Köliö, Kimmo Lähdesmäki, Jarkko Piironen, Vesa Kuhno, Matti Pirinen, Anu Aaltonen, Jommi Suonketo, Juha Jokisalo, Olli Teriö, Anssi Koskenvesa, Tuomas Palolahti

EFFECTS OF CLIMATE CHANGE AND INCREASING OF THERMAL INSULATION ON MOISTURE PERFORMANCE OF ENVELOPE ASSEMBLIES AND ENERGY CONSUMPTION OF BUILDINGS

Research report 159, 354 p. + 43 p. app.

June 2013

Keywords: climate change, thermal insulation, envelope assemblies, moisture behaviour, analysis method, computational examination, test year, mould growth, moisture condensation, internal convection, energy consumption, indoor climate, building site, moisture control

Abstract

This research report relates to the FRAME-project carried out during the years 2009–2012. The most essential objective of this research was to study the influences of climate change and increase of thermal insulation on moisture behaviour of envelope structures and energy consumption of buildings in Finnish climate. The goal was also to investigate how the moisture behaviour of envelope structures can be best improved by structural and technical solutions. The impacts of climate change and increase of thermal insulation on the thermal behaviour of envelope structures, indoor air conditions and the use of HVAC-systems were also studied. In addition, new guidelines have been developed for the moisture control on building site. The research concentrated on the behaviour of conventional structures and high-risk structures.

During the research Tampere University of Technology (TUT) finished the development of a new analysis method designed for the study of moisture behaviour of structures. The analysis method enables a more reliable research on structural moisture risks in present and future climate. The majority of the results accomplished in this research are based on this analysis method. With the help of these results, structures can be designed to endure the exceptionally stressful weather conditions.

An important part of the new analysis method is the building physical test years for the Finnish climate. These test years were chosen from current and future climate data provided by The Finnish Meteorological Institute FMI. Two test years were selected from each climate (present and future years 2050 and 2100), which can be used to investigate the critical moisture behaviour of almost all structure types. The test years for the future climate are based on A2 emission scenario. The Finnish Meteorological Institute has predicted according to this scenario how the outdoor climate will change during the next 100 years.

Climate change and the increase of thermal insulation weakens the moisture behaviour and fault tolerance of several present-day envelope structures due to changes in heat and moisture conditions. In some of these structures the changes are significant.

As a consequence of the predicted climate change, outdoor air temperature rises and the amount of rainfall and cloudiness increases. Also the outdoor air relative humidity is predicted to rise and windiness to increase. All these factors increase moisture load and mould growth especially in the outer parts of envelope structures, but also in other sections of structures. These changes slow down drying of structures and increase drying times.

Increase of thermal insulation decreases heat flow through the envelope structures, which causes temperature to decrease and relative humidity to increase in the outer parts of envelope structures. This increases the amount of conditions favourable for mould growth and moisture condensation. The fault tolerance of structures decreases, because the heat flow coming from inside does not dry structures as effectively as before in case of moisture leak or exceptional weather conditions.

Also alterations made on structural solutions, execution and type of thermal insulation increase the risk for moisture damage. It is essential that designers and builders are aware of these changes and therefore a lot of training and education is needed in the building sector.

Moisture control on building site will gain importance because of decrease in fault tolerance. Structures and materials must be properly protected against rain and structures need to be allowed to dry before applying vapour tight coatings or other structures that slow down drying. Especially wooden houses are recommended to make inside rain-protective structure.

Almost all envelope structures can be functional during the next 100 years with the help of structural changes and changes in execution instructions. The moisture behaviour of timber framed structures can be substantially improved by applying thermal insulation outside of bearing structures. As for concrete and stone structures, more time has to be reserved for drying, if cellular plastic thermal insulation is used on the outer side. Specific attention needs to be put to the functionality of connections and details of envelope structures. They contribute essentially to the functionality of the whole building.

New concrete structures are hygrothermally functional, if they are made according to the current guidelines. Steel reinforcements need to be installed with sufficient concrete cover, taking position tolerances into account. The use of stainless steel bars in concrete facades is recommended, especially e.g. in edges and corners. For frost resistance the current guidelines are sufficient, as long as air entrainment of concrete succeeds. Nevertheless, freeze-thaw damages might begin to appear in old buildings in inland due to the climate change. Increase of thermal insulation doesn't affect the hygrothermal behaviour of concrete facades.

Massive structures, such as log and aerated concrete, should be thermally insulated on the outer side with a vapour open thermal insulation material. If the structure is insulated on the inner side, it must be sufficiently dried before applying the inner insulation layer and vapour retarder. The water vapour resistance of the vapour retarder depends on the thermal resistance of the inner insulation layer.

A low rise brick facing timber frame wall requires a well-insulated windbreak on the outer side of the timber frame. On a high rise wall on the other hand a vapour tight layer ventilated

on both sides is required between the timber frame and the brick cladding. The vapour tight layer prevents the moisture movement by diffusion towards the wall structure. This vapour tight layer also acts as a weather shield during the construction.

Rendering on a wooden structure shouldn't be used at all because rain water easily penetrates the exterior facing through joints and ducts and the drying out is very slow. Ventilated rendering can be used on a wooden structure instead.

Thermal insulation should be used above the bearing structures in ventilated timber roofs. This can be executed with a thermally insulating underlay or windbreak. The underlay must also fulfil it's all other requirements.

In a crawl space the surface of the ground must be thermally insulated especially when using a timber base floor. Using a layer of gravel on the ground surface also improves the hygrothermal behaviour of crawl space. The sheathing board underneath the bearing structures must be moisture resistant and thermally insulating.

The envelope structures of a new building can be executed in a way that no technical appliances or systems (dryers, heaters or ventilation systems) are needed to ensure the proper moisture behaviour. Renovation actions which include additional insulation may require such appliances.

Moisture condensation and frosting on the outer side of a window may increase heavily if the U-value of the glass is improved from the usual level. Already in current windows moisture condensation is occasionally a problem. A selective layer on the outer surface of a window removes the moisture condensation and frosting problem.

The thermal resistance of thick blown-in roof insulation is decreased by internal convection occurring inside the insulating layer. Internal convection can be reduced by decreasing the air permeability of the thermal insulation. Air permeability can be decreased by increasing the density or by using binders among the thermal insulation. In wall structures the effect of internal convection on thermal resistance of insulation is significantly lower when considering present insulation layer thicknesses.

It is not financially profitable to increase the thermal insulation thickness of envelope structures from the present reference level in multi-storey and office buildings. In one-family houses the profitability depends on maximum allowable repayment period. This results from the fact that energy savings potential decreases and cooling energy demand increases. The reference insulation level in the 2007 National Building Code of Finland would have already been sufficient for multi-storey and office buildings.

Design and execution instructions for low energy and passive house structures and joints were also developed during the research. These instructions demonstrate the most essential execution details and structural considerations when designing and executing low energy envelope structures. It concentrates on the most typical and conventional structure types.

Alkusanat

Tämä julkaisu on ”Future Envelope Assemblies and HVAC Solutions (FRAME)” - tutkimusprojektin loppuraportti. FRAME-projektissa tutkittiin ilmastomuutoksen ja lämmöneristyksen lisäämisen vaikutuksia vaipparakenteiden rakennusfysikaaliseen toimintaan sekä rakennusten energiankulutuksen ja sisäilman olosuhteisiin. Projektin rahoittajina olivat TEKES, Ympäristöministeriö, Rakennusteollisuus RT ry:n toimialaliitot sekä yksittäisistä yrityksistä Finnfoam Oy, Suomen Kuitulevy Oy ja Fibratus Oy.

Tutkimus toteutettiin TTY:n Rakennustekniikan laitoksen (rakennetekniikka ja rakennustuotanto ja -talous), Aalto-yliopiston Energiatekniikan laitoksen (LVI-tekniikka), Ilmatieteen laitoksen sekä Mittaviiva Oy:n yhteistyöprojektina. Projektin kokonaisorganisoinnista vastasi TTY:n Rakennustekniikan laitos, tutkimusjohtaja Juha Vinhan johtamana. Eri lukujen kirjoitustyöstä ovat vastanneet seuraavat henkilöt:

- luku 1: tekn. kand. Elina Manelius (TTY) ja tekn. toht. Juha Vinha,
- luku 2: dipl.ins. Anu Aaltonen (TTY) ja tekn. kand. Elina Manelius (TTY),
- luku 3: tekn. toht. Juha Vinha (TTY),
- luku 4: tekn. toht. Juha Vinha (TTY), tekn. toht. Jukka Lahdensivu (TTY) ja tekn. kand. Anssi Laukkarinen,
- luku 5: tekn. kand. Anssi Laukkarinen (TTY) ja tekn. toht. Juha Vinha
- luku 6: tekn. toht. Jukka Lahdensivu (TTY), dipl.ins. Arto Köliö (TTY), dipl.ins. Sakari Nurmi (TTY), tekn. kand. Vesa Kuhno (TTY), dipl.ins. Mikael Mäkitalo (TTY), tekn. kand. Anssi Laukkarinen (TTY), dipl.ins. Paavo Kero (TTY) ja tekn. toht. Juha Vinha,
- luku 7: tekn. kand. Petteri Huttunen (TTY), dipl.ins. Tomi Pakkanen (TTY) ja tekn. toht. Juha Vinha (TTY),
- luku 8: tekn. toht. Juha Jokisalo (Aalto-yliopisto),
- luku 9: tekn. lis. Olli Teriö (TTY), dipl.ins. Anssi Koskenvesa (Mittaviiva Oy) ja dipl.ins. Tuomas Palolahti (Mittaviiva Oy),
- luku 10: kaikki edellä mainitut kirjoittajat.

Tutkimuksen yhteydessä on uusittu myös ”Rakennusten lämmöneristysohjeet” RakMK C4 (2012), joissa annetaan ohjeita vaipparakenteiden lämmönläpäisykertoimien eli U-arvojen laskemisesta sekä rakenteiden lämmöneristämisestä. Tähän päivitystyöhön TTY:ltä osallistuivat tekn. toht. Juha Vinha ja dipl.ins. Virpi Leivo.

Samanaikaisesti FRAME-projektin kanssa on ollut käynnissä lisäksi ”Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeiden” RIL 107 (2012) uudistustyö. Näihin ohjeisiin on koottu paljon myös FRAME-projektin yhteydessä saatua tutkimustietoa. Tähän päivitystyöhön TTY:ltä osallistui tekn. toht. Juha Vinha.

Tutkimukseen liittyen on TTY:n rakennetekniikan julkaisusarjassa julkaistu myös matalaenergia- ja passiivitalojen rakenteiden ja liitosten suunnittelu- ja toteutusohjeet, joissa esitetään ohjeita ja huomioon otettavia asioita hyvin eristettyjen vaipparakenteiden käytännön toteutuksessa. Tässä julkaisussa on hyödynnetty FRAME-projektin tutkimuksissa saatuja tuloksia.

Tutkimuksen yhteydessä on Suomen ilmastoon määritetty nykyilmastoa sekä tulevaisuuden ilmastoja vuosina 2050 ja 2100 kuvaavat rakennusfysikaaliset testivuodet, jotka vastaavat rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kanalta kriittisiä ulkoilman mitoitusolosuhteita homeen kasvun ja kosteuden kondensoitumisen osalta. Testivuotia voidaan käyttää tarkasteltaessa vaipparakenteiden kosteusteknistä toimintaa rakennusfysikaalisten laskentaohjelmien avulla. Testivuodet ja niihin liittyvät ohjeet ovat saatavilla Ilmatieteen laitoksen internetsivuilla. Tässä tutkimusraportissa esitetyt eri rakenteiden kosteusteknisen toiminnan tarkastelut perustuvat pääosin näillä testivuosilla tehtyihin laskentatarkasteluihin.

Projekti on ollut varsin laaja ja tieteellisesti haastava. Rakenteiden kosteusteknisen toiminnan tarkastelut on toteutettu uudella analysointimenetelmällä, jota on kehitetty TTY:llä yli kymmenen vuoden ajan. Rakennusfysikaalisten testivuotien määrittäminen täydensi analysointimenetelmän osat ja mahdollisti rakenteiden kosteusteknisen toiminnan tarkastelun sekä nykyisessä että lähitulevaisuuden ilmastossa. Vastaavan tyyppisellä menetelmällä ei ole arvioitu rakenteiden toimintaa aikaisemmin muualla maailmassa.

Tästä tutkimusraportista on aiemmin 20.6. julkaistu TTY:n verkkosivuilla sähköinen versio, jota on täydennetty tässä nykyisessä raportissa joitakin osin. Täydennyksiä on tehty tutkimuksessa käytetyn säädäntä kuvauksiin luvussa 4 ja liitteessä 4 sekä tuuletettujen yläpohjien ja ryömintätilaisten alapohjien osalta säteilylämmönsiirron laskentaan liittyviin reunaehtoihin luvuissa 6.4 ja 6.5. Ylä- ja alapohjarakenteiden laskentatuloksia on myös tarkennettu muutamassa kohdassa. Lisäksi on tarkennettu joitakin merkintöjä ja termien määritelmiä sekä korjattu kirjoitusvirheitä ja luvun 7.2 ja 7.3 kuvien teksteissä olleet virheet.

Tutkimuksen johtoryhmään kuuluivat:

<i>Tero Karislahti, puheenjohtaja</i>	YIT Oyj
<i>Tiina Suonio, varapuheenjohtaja</i>	RTT ry, Muuratut rakenteet
<i>Sini Uttu</i>	TEKES
<i>Olli-Pekka Nordlund</i>	TEKES
<i>Teppo Lehtinen</i>	Ympäristöministeriö
<i>Katja Outinen</i>	Ympäristöministeriö
<i>Jani Kemppainen</i>	Talonrakennusteollisuus ry
<i>Arto Suikka</i>	RTT ry, Betoniteollisuus
<i>Kimmo Rautiainen</i>	RTT ry, Pientaloteollisuus PTT
<i>Markku Leinos</i>	Rakennusteollisuus RT ry

<i>Ilkka Salo</i>	LVI-talotekniikkateollisuus ry
<i>Tuuli Kunnas</i>	EPS-rakennuseristeteollisuus/ Rakennustuoteteollisuus RTT ry
<i>Ahti Syrjäaho</i>	Fenestra Oy
<i>Heidi Huhtamella</i>	Fibratus Oy
<i>Henri Nieminen</i>	Finnfoam Oy
<i>Kimmo Järvinen</i>	Finnish Wood Research Oy
<i>Minna Korpi</i>	H+H Finland Oy
<i>Jan-Erik Järventie</i>	Lammi-Kivitalot Oy
<i>Antti Pirhonen</i>	NCC-Rakennus Oy/ Asuminen
<i>Heikki Sarin</i>	Parma Oy
<i>Jyrki Kesti</i>	Rautaruukki Oyj
<i>Jussi Jokinen</i>	Saint-Gobain Rakennustuotteet Oy
<i>Kati Alakoski</i>	Saint-Gobain Weber Oy Ab
<i>Jyrki Jaskari</i>	Skaala Ikkunat ja Ovet Oy
<i>Toni Tuomola</i>	Skanska Talonrakennus Oy
<i>Tero Niemelä</i>	Skanska Talonrakennus Oy
<i>Pasi Käkelä</i>	SPU Oy
<i>Peter Lind</i>	Suomen Kuitulevy Oy
<i>Pekka Peltomäki</i>	Tiivituote Oy
<i>Juha Karilainen</i>	Wienerberger Oy
<i>Risto Aurola</i>	Sosiaali- ja terveysministeriö
<i>Anne Hyvärinen</i>	Terveyden ja hyvinvoinnin laitos THL
<i>Kirsti Jylhä</i>	Ilmatieteen laitos
<i>Juha Jokisalo</i>	Aalto-yliopisto, Energiatekniikan laitos/ LVI-tekniikka
<i>Juha Vinha</i>	TTY, Rakennustekniikan laitos/ rakennetekniikka
<i>Ralf Lindberg</i>	TTY, Rakennustekniikan laitos/ rakennetekniikka

Kiitämme johtoryhmän jäseniä ja heidän sijaisiaan, tutkimuksen rahoittajia sekä kaikkia tutkimuksen toteutuksessa avustaneita henkilöitä.

Tampereella

29.7.2013

Tekijät

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	1
Abstract	4
Alkusanat	7
Sisällysluettelo	10
Merkinnät ja lyhenteet	15
Määritelmät	17
1 Johdanto	25
2 Ilmastonmuutokseen ja rakennusten lämmöneristykseen liittyviä tarkasteluja muissa maissa	28
2.1 Rakennusten lämmöneristystasoja eri maissa v. 2012.....	28
2.1.1 U-arvovaatimusten kehittyminen Suomessa.....	28
2.1.2 Eri maiden U-arvovaatimusten vertailua	29
2.1.3 Matalaenergia- ja passiivitalojen U-arvot.....	31
2.2 Rakentaminen ja ilmasto-olosuhteet Ruotsissa	34
2.2.1 Ruotsin ja Suomen ilmasto-olojen vertailu.....	34
2.2.2 Rakentamiskulttuuri.....	38
2.2.3 Määräykset ja ohjeet	39
3 Rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmä	42
3.1 Yleistä.....	42
3.2 Analysointimenetelmän kuvaus.....	43
3.2.1 Ulkoilman olosuhteet.....	44
3.2.2 Sisäilman olosuhteet	46
3.2.3 Materiaaliominaisuudet	49
3.2.4 Laskentaohjelmat	50
3.2.5 Toimintakriteerit	52
3.2.6 Tarkasteluperiaatteet	60
3.3 Analysointimenetelmän uutuusarvot	65
4 Rakennusfysikaalisten testivuosien määrittäminen Suomen ilmastossa	67
4.1 Yleistä.....	67
4.2 Ilmastonmuutoksen vaikutukset rakenteiden toiminnassa.....	69
4.3 Testivuosien valintaperiaatteet FRAME-tutkimuksessa.....	70
4.4 Testivuosien määrittäminen ulkoilman olosuhteiden avulla.....	80
4.5 Testivuosien määrittäminen testirakenteiden avulla	82

4.5.1	Yleistä	82
4.5.2	Eri tekijöiden vaikutus vuosien kriittisyystasoon nykyilmastossa	84
4.5.3	Testivuosien määrittäminen nykyilmastossa	89
4.5.4	Testivuosien määrittäminen tulevaisuuden ilmastossa	95
4.5.5	Testivuosien olosuhteisiin tehdyt tarkennukset ja muutokset.....	99
4.6	Kriittisten olosuhteiden määrittäminen betonirakenteiden korroosion ja betonin pakkasrapautumisen tarkastelua varten	101
4.6.1	Yleistä betonirakenteiden vaurioitumisesta	101
4.6.2	Kriittiset sääolosuhteet.....	103
4.6.3	Kriittisyystarkastelujen toteutus	106
4.7	Yhteenveto ulkoilman testivuosien määrittämisestä.....	107
5	Laskentatulosten tarkkuus ja laskentaohjelmien verifiointi	108
5.1	Stokastinen ja deterministinen laskenta rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa	109
5.2	Laskentatulosten tarkkuuteen vaikuttavat tekijät.....	110
5.3	Laskentaohjelmien ja -mallien tarkkuus	112
5.4	Materiaalikokeiden tarkkuus	116
5.5	Laskentatulosten vertailu puurunkoisten ulkoseinien laboratorioeteloksiin	118
5.5.1	Yleistä	118
5.5.2	WUFI-ohjelmalla tehdyt vertailut.....	119
5.5.3	Delphin-ohjelmalla tehdyt vertailut.....	122
5.5.4	Tulosten arviointia	124
5.6	Laskentatulosten vertailu ylä- ja alapohjien kenttämittaustuloksiin.....	125
5.6.1	Yleistä	125
5.6.2	Tuulettuvien yläpohjien olosuhteiden vertailut	127
5.6.3	Ryömintätilaisten alapohjien olosuhteiden vertailut.....	130
5.6.4	Tulosten arviointia	135
6	Vaipparakenteiden kosteusteknisen toiminnan tarkastelut	138
6.1	Betonirakenteiset ulkoseinät.....	138
6.1.1	Betonirakenteiden vaurioituminen muuttuvassa ilmastossa.....	138
6.1.2	Betonisandwich-rakenteen kosteusteknisen toiminnan laskennalliset tarkastelut.....	148
6.1.3	Eristerapatun ulkoseinän kosteusteknisen toiminnan laskennalliset tarkastelut.....	157
6.2	Rankarakenteiset ulkoseinät	166
6.2.1	Yleistä	166
6.2.2	Puu- ja levyverhotut rankaseinät.....	168

6.2.3	Tiiliverhottu rankaseinä	174
6.2.4	Eriste- ja levyrapatut rankaseinät.....	180
6.3	Sisäpuolelta lisäeristetyt massiivirakenteiset ulkoseinät	182
6.3.1	Yleistä	182
6.3.2	Sisäpuolelta lisäeristetty hirsiseinä	184
6.3.3	Sisäpuolelta lisäeristetty kevytbetoniseinä	186
6.4	Tuulettuvat yläpohjat	189
6.4.1	Yleistä	189
6.4.2	Laskentatarkastelujen toteutus.....	193
6.4.3	Tulokset	194
6.4.4	Tulosten tarkastelu	203
6.5	Ryömintätilaiset alapohjat	206
6.5.1	Yleistä	206
6.5.2	Laskentatarkastelujen toteutus.....	211
6.5.3	Tulokset	212
6.5.4	Tulosten tarkastelu	219
6.6	Ikkunat	221
6.6.1	Yleistä	221
6.6.2	Taivaan tehollisen lämpötilan määrittäminen	224
6.6.3	Laskentatarkastelujen toteutus.....	228
6.6.4	Tulokset	229
6.6.5	Yhteenveto ja johtopäätökset.....	234
7	Vaipparakenteiden sisäisen konvektion tarkastelut.....	236
7.1	Yleistä.....	236
7.2	Koejärjestelyt.....	238
7.3	Ulkoseinärakenteiden tarkastelut.....	243
7.3.1	Laboratoriokokeet.....	243
7.3.2	Laskennalliset tarkastelut.....	259
7.3.3	Johtopäätökset.....	267
7.4	Yläpohjarakenteiden tarkastelut	268
7.4.1	Yleistä	268
7.4.2	Koelaitteisto	271
7.4.3	Materiaaliominaisuuksien määrittäminen	273
7.4.4	Laboratoriokokeet.....	274
7.4.5	Koetulokset	276
7.4.6	Koetulosten tarkastelu.....	286

8	Rakennusten energiatehokkuuden ja sisäilman olosuhteiden tarkastelu.....	291
8.1	Yleistä.....	291
8.1.1	Energialaskennan testivuodet	291
8.1.2	Laskentamenetelmä	292
8.1.3	Tutkitut rakennustyypit.....	293
8.2	Rakennusten lämmöneristystaso.....	294
8.2.1	Laskennan lähtötiedot	294
8.2.2	Tulokset	295
8.2.3	Yhteenveto	300
8.3	Rakennusten terminen massa.....	302
8.3.1	Laskennan lähtötiedot	302
8.3.2	Tulokset	303
8.3.3	Yhteenveto	307
8.4	Vaihtoehtoiset jäähdytysratkaisut.....	308
8.4.1	Laskennan lähtötiedot	308
8.4.2	Tulokset	309
8.4.3	Yhteenveto	310
8.5	Sisäilman kosteus.....	311
8.5.1	Laskennan lähtötiedot	311
8.5.2	Tulokset	312
8.5.3	Yhteenveto	314
9	Työmaan rakennusaikainen kosteudenhallinta	315
9.1	Yleistä.....	315
9.2	Hankesuunnittelu	316
9.2.1	Yleistä	316
9.2.2	Hankeaikataulu	317
9.2.3	Suunnittelu aikataulu	318
9.3	Toteutussuunnittelu.....	319
9.3.1	Suunnitteluohjeet	319
9.3.2	Kosteusteknisesti turvalliset rakenneratkaisut	319
9.4	Rakennusvaihe	320
9.4.1	Kosteudenhallinnasta kuivana pitoon	320
9.4.2	Rakennustyömaan kosteus- ja lämpöolosuhteet	321
9.4.3	Lämmitä työmaata – älä ulkoilmaa.....	322
9.5	Tuotannon suunnittelu ja ohjaus.....	323

9.5.1	Aikataulut.....	323
9.5.2	Sopimukset.....	324
9.5.3	Riskien hallinta	324
9.6	Laadunvarmistus.....	326
10	Yhteenveto	328
10.1	Vaipparakenteiden kosteustekninen toiminta.....	328
10.1.1	Betonirakenteet	328
10.1.2	Rankarakenteiset puuseinät.....	330
10.1.3	Massiiviset rakenteet.....	331
10.1.4	Tuulettuva yläpohja ja ryömintätilainen alapohja	332
10.1.5	Ikkunat	333
10.2	Sisäinen konvektio vaipparakenteissa	334
10.3	Rakennusten energiankulutus ja sisäilmasto	335
10.4	Rakennusaikainen kosteudenhallinta.....	336
	Lähteet.....	338
	Liitteet	354

Merkinnät ja lyhenteet

α	auringonsäteilyn absorptiokerroin	-
α	viistosadekerroin rakennuksen pinnalla	s/m
β	kerroin	-
δ_v	vesihöyrynläpäisevyys	m ² /s
ε	emissiviteetti	-
ε_p	huokoisuus	-
η	viistosadesuhde (catch ratio)	-
η_a	ilman dynaaminen viskositeetti	$\approx 17,5 \times 10^{-6}$ Pa·s, N·s/m ²
θ	kulma	rad, °
κ	viistosadekerroin avoimella paikalla	s/m
κ_a	ilmanläpäisevyys	m ³ /(m·s·Pa)
λ	lämmönjohtavuus	W/(m·K)
μ	vesihöyryn diffuusiovastuskerroin	-
ν	vesihöyrypitoisuus	kg/m ³ , g/m ³
ρ	tiheys	kg/m ³
σ	Stefan-Boltzmannin säteilyvakio	$5,67 \times 10^{-8}$ W/(m ² ·K ⁴)
φ	ilman suhteellinen kosteus	% RH
Φ	lämpövirta	W
c_p	ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa	J/(kg·K)
d	paksuus, halkaisija	m, mm
g	putoamiskiihtyvyyys	9,81 m ² /s
g	auringonsäteilyn kokonaisläpäisykerroin	-
k	karbonatisoitumiskerroin	mm/a ^{1/2}
k_a	materiaalin permeabiliteetti ilmalle	m ²
m	massa	kg
n	ilmanvaihtokerroin	1/h
n_{50}	ilmanvuotoluku (50 Pa paine-erolla)	1/h
p	paine	Pa
q	lämpövirran tiheys	W/m ²
s_d	suhteellinen diffuusiovastus	m
t	aika	s, h, d, a
w	kosteuspitoisuus	kg/m ³
x	karbonatisoitumissyvyys	mm
z	korkeus maanpinnasta	m
A	pinta-ala	m ²
A_w	veden imeytymiskerroin (kapillariteettikerroin)	kg/(m ² ·h ^{1/2})
C	kerroin	-
$C_{b,eff}$	rakennuksen sisäpuolinen tehollinen lämpökapasiteetti	Wh/(m ² ·K)
D_w	kosteusdiffusiviteetti	m ² /s

D_{ws}	kapilaarivirtauksen kosteusdiffusiviteetti	m^2/s
DRF	sadepisaran terminaalinopeuden käänteisluku	s/m
K_a	ilmanläpäisykerroin	$m^3/(m^2 \cdot s \cdot Pa)$
L	pituus, paksuus	m
M	homeindeksi	-
M_a	ilman molekyyli massa	28,96 kg/kmol
Nu	Nusseltin luku	-
O	kerroin	-
P	teho	W
R	lämmönvastus	$m^2 \cdot K/W$
R	sateen intensiteetti	mm/h
R	yleinen kaasuvakio	8314,3 kmol/K
R_a	ilman ominaiskaasuvakio	287,1 J/(kg·K)
R_{bal}	kokonaissäteilytase	W/m ²
R_{am}	modifioitu Rayleigh'n luku	-
RAF	kerroin	-
ST	suoran auringonsäteilyn läpäisykerroin	-
T	lämpötila	°C, K
U	lämmönläpäisykerroin	W/(m ² ·K)
U	tuulen vaakasuuntainen nopeus	m/s
V	sadepisaran terminaalinopeus	m/s
W	kerroin	-
WDR	viistosademäärä (wind-driven rain)	mm
Z_v	vesihöyrynvastus (vesihöyrypitoisuuseron suhteen)	s/m
Z_p	vesihöyrynvastus (vesihöyryn osapaineen suhteen)	$m^2 \cdot s \cdot Pa/kg$
CFD	virtauslaskenta (computational fluid dynamics)	
CHB	kalibroitu lämmönläpäisylaitteisto (calibrated hot box)	
EPS	paisutettu polystyreeni (expanded polystyrene)	
GHB	suojakammioilla varustettu kalibroitu lämmönläpäisylaitteisto (guarded hot box)	
HHL	homeutumisherkkyyssluokka	
HTL	homekasvun taantumaluokka	
IEA	Kansainvälinen energiajärjestö (International Energy Agency)	
MLP	maalämpöpumppu	
MRY	rakennusfysikaalinen testivuosi (moisture reference year)	
PU	polyuretaani (polyurethane)	
SRES	IPCC:n (Intergovernmental Panel on Climate Change) raportti ilmastonmuutosskenaarioista (special report on emissions scenarios)	
TRY	energielaskennan testivuosi (thermal reference year)	
VOC	haihtuva orgaaninen yhdiste (volatile organic compound)	
W/C	betonin vesisementtisuhde (water-cement ratio)	
XPS	suulakepuristettu polystyreeni (extruded polystyrene)	

Määritelmät

Adiabaattinen	Adiabaattisella prosessilla tarkoitetaan lämpöopissa tapahtumaa, jossa lämpöä ei siirry tapahtuman kohteena olevaan aineeseen tai poistu siitä. Toisin sanoen adiabaattisen prosessin lämpöenergian määrä on vakio.
Diffuusio	Diffuusio on kaasumolekyylien liikettä, joka pyrkii tasoittamaan kaasuseoksessa olevia yksittäisen kaasun pitoisuuksia (tai osapaine-eroja). Diffuusiosta kaasu siirtyy korkeammasta pitoisuudesta alemmaksi pitoisuutta kohtaan.
Energialaskennan testivuosi	Energialaskennan testivuosi (TRY) on synteettinen vuosi, joka on laadittu rakennusten energiankulutuksen laskentaa varten. Testivuosi kuvaa energiankulutustarkastelujen kannalta keskimääräisiä ilmasto-olosuhteita. Testivuodet on muodostettu kahdestatoista kuukauden pituisesta ajanjaksosta, jotka on valittu 30 vuoden ilmastodatasta. Energialaskennan testivuosia on määritetty Suomeen kolmelle eri ilmastovyöhykkeelle sekä nykyisessä että vuosien 2030, 2050 ja 2100 ilmastoissa.
Homehtumisherkkyyssluokka	Homehtumisherkkyyssluokalla (HHL) kuvataan rakennusmateriaalin homehtumisherkkyyttä VTT–TTY homemallissa. Rakennusmateriaalit on jaettu neljään eri homehtumisherkkyyssluokkaan. Materiaalille valittavaan homehtumisherkkyyssluokkaan vaikuttaa sekä homehtumisen alkamisajankohta että lopullisen homekasvuston määrä materiaalin pinnalla homeen kasvulle otollisissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa.
Homeindeksi	Homeindeksi (M) kuvaa tarkasteltavan materiaalin pinnalla esiintyvien homeiden peittämää pinta-alaa suhteessa pinnan kokoalaan näköhavaintoon perustuen. Indeksillä vaihtelee välillä 0–6. Indeksillä määritettäessä ei erotella eri homelajeja toisistaan.
Homekasvun taantumaluokka	Homekasvun taantumaluokalla (HTL) kuvataan homekasvuston määrän vähenemistä sekä homeen kasvussa tapahtuvaa viivettä rakennusmateriaalin pinnalla VTT–TTY homemallissa. Rakennusmateriaalit on jaettu neljään eri homekasvun taantumaluokkaan. Materiaalille valittavaan homekasvun taantumaluokkaan vaikuttaa sekä homeen määrän vähenemisnopeus materiaalin pinnalla epäedullisissa lämpötila- ja

kosteusolosuhteissa että homeen kasvussa tapahtuvan viiveen suuruus, kun olosuhteet muuttuvat uudestaan homeen kasvulle otollisiksi.

Hygrokalvo	Hygrokalvo on muovipohjainen höyrynsulkukalvo, jonka vesihöyrynvastus riippuu ympäröivän ilman suhteellisesta kosteudesta. Hygrokalvon vesihöyrynvastus pienenee merkittävästi ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden noustessa lähelle 100 % RH:ta.
Hygroσκοoppisuus	Hygroσκοoppisuus tarkoittaa huokoisen aineen kykyä sitoa itseensä kosteutta ilmasta ja luovuttaa sitä takaisin ilmaan.
Höyrynsulku	Höyrynsulku on ainekerros, jonka pääasiallisena tehtävänä on estää vesihöyryn haitallinen diffuusio rakenteeseen tai rakenteessa.
Ilmanläpäisevyys	Ilmanläpäisevyys (κ_a) ilmoittaa ilman tilavuuden, joka stationääritilassa laminaarisena virtauksena läpäisee kohtisuorasti pinta-alayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen, kun ainekerroksen eri puolilla olevien ilmatilojen paine-ero on yksikön suuruinen.
Ilmanläpäisykerroin	Ilmanläpäisykerroin (K_a) ilmoittaa ilman tilavuuden, joka stationääritilassa laminaarisena virtauksena läpäisee kohtisuorasti pinta-alayksikön suuruisen rakennusosan, kun rakennusosan eri puolilla olevien ilmatilojen paine-ero on yksikön suuruinen.
Ilmansulku	Ilmansulku on ainekerros, jonka pääasiallisena tehtävänä on estää haitallinen ilmavirtaus rakenteen läpi.
Isotrooppinen	Isotrooppinen tarkoittaa suunnasta riippumatonta ja sen vastakohta on anisotrooppinen. Esimerkiksi rakennusmateriaalit voivat olla isotrooppisia tai anisotrooppisia rakennusfysikaalisten ominaisuuksien suhteen.
Johtuminen	Johtumisessa lämpöenergia siirtyy materiaalin molekyylien välityksellä tapahtuvan sisäisen värähtelyn vaikutuksesta korkeammasta lämpötilasta matalampaan.
Kapillaarisuus	Kapillaarisuus tarkoittaa materiaalin kykyä siirtää vettä ohuissa materiaalihuokosputkiin vaikuttavien kapillaarivoimien (adheesio ja koheesio) vaikutuksesta huokosputkien täyttyessä kokonaan vedellä. Kapillaarivoimat synnyttävät huokosputken

vesipintaan kapillaari-imupaineen, jonka ansiosta vesi siirtyy huokosputkessa eteenpäin. Ylöspäin mentäessä kapillaarinen kosteuden siirtyminen loppuu, kun huokosputkessa olevan veden synnyttämä painovoima alaspäin kumoo kapillaari-imuvoiman vaikutuksen.

Kapillaarivirtauksen kosteusdiffusiviteetti	Kapillaarivirtauksen kosteusdiffusiviteetti (D_{ws}) ilmoittaa stationääritilassa homogeenisen materiaalikerroksen läpi kapillaari-imupaineen (ja pintadiffuusion) vaikutuksesta siirtyvän kosteusvirran tiheyden ja materiaalin pintojen välisen kosteuspitoisuusgradientin suhteen kosteusvirran suunnassa. Kapillaarivirtauksen kosteusdiffusiviteetti on materiaaliominaisuus, joka kuvaa materiaalin kosteuspitoisuuserojen tasoittumisnopeutta kapillaarisella alueella ja se on osa kosteusdiffusiviteetin arvoa.
Kondensoituminen	Kondensoituminen tarkoittaa vesihöyryn tiivistymistä rakenteen sisällä tai pinnalla vedeksi tai jääksi, kun ilman vesihöyrypitoisuus on saavuttanut kyseisessä kohdassa kyllästyskosteuspitoisuuden ($\varphi = 100\% \text{ RH}$).
Konvektio	Konvektio syntyy, kun kaasu tai neste virtaa ulkopuolisen voiman (pakotettu konvektio, esimerkiksi tuuli tai ilmanvaihtolaitteisto) tai lämpötilaerojen aiheuttamien tiheyserojen (luonnollinen konvektio) vaikutuksesta. Lämpö ja vesihöyry siirtyvät konvektiolla virtaavan ilman mukana.
Kosteusdiffusiviteetti	Kosteusdiffusiviteetti (D_w) ilmoittaa stationääritilassa homogeenisen materiaalikerroksen läpi siirtyvän kosteusvirran tiheyden ja materiaalin pintojen välisen kosteuspitoisuusgradientin suhteen kosteusvirran suunnassa. Kosteusdiffusiviteetti on materiaaliominaisuus, joka kuvaa materiaalin kosteuspitoisuuserojen tasoittumisnopeutta ja sen arvossa on mukana kaikkien kosteuden siirtymismuotojen vaikutus.
Kosteuspitoisuus	Kosteuspitoisuus (w , u , ψ) ilmoittaa materiaalin sisältämän kosteuden kokonaismäärän eri olomuodoissa joko kuivatilavuuteen tai kuivapainoon suhteutettuna.
Kriittinen RH	Kriittinen RH (φ_{crit}) on ilman suhteellisen kosteuden raja-arvo, jota ei saa ylittää, jotta homeen kasvu tai jokin muu rakenteessa tapahtuva haitallinen ilmiö voidaan ehkäistä. Arvo voi riippua

muun muassa tarkasteltavasta ilmiöstä, ympäröivistä olosuhteista (esimerkiksi lämpötila) sekä tarkasteltavasta materiaalista.

Kyllästyskosteuspitoisuus	Kyllästyskosteuspitoisuus (v_{sat}) ilmoittaa vesihöyrypitoisuuden, joka ilmaan mahtuu tietyssä lämpötilassa. Ilman kyllästyskosteuspitoisuus voidaan ilmoittaa myös vesihöyryn osapaineen avulla (p_{sat}).
Lämmönjohtavuus	Lämmönjohtavuus (λ) ilmoittaa lämpömäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pinta-alayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen, kun ainekerroksen eri puolilla olevien tilojen lämpötilaero on yksikön suuruinen.
Lämmönläpäisykerroin	Lämmönläpäisykerroin (U) ilmoittaa lämpömäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pinta-alayksikön suuruisen rakennusosan, kun rakennusosan eri puolilla olevien tilojen lämpötilaero on yksikön suuruinen. Rakennusosan U -arvo on kokonaislämmönvastuksen käänteisarvo, jossa ovat mukana myös rakennusosan sisä- ja ulkopinnan pintavastukset.
Lämmönvastus	Lämmönvastus (R) ilmoittaa stationääritilanteessa ainekerroksen tai rakennusosan eri puolilla olevien isotermisten pintojen lämpötilaeron ja ainekerroksen tai rakennusosan läpi kulkevan lämpövirran tiheyden suhteen. Homogeenisen ainekerroksen lämmönvastus saadaan jakamalla kerroksen paksuus sen lämmönjohtavuudella $R = d/\lambda$.
Nusseltin luku	Nusseltin luku (Nu) ilmoittaa ainekerroksen tai rakennusosan läpi konvektiolla ja johtumalla siirtyvän yhteenlasketun lämpövirran tiheyden suhteen pelkästään johtumalla siirtyvään lämpövirran tiheyteen. Nusseltin luku kuvaa rakenteen läpi konvektiolla siirtyvän lämpövirran osuutta ja se saa pienimmillään arvon 1 silloin, kun rakenteen läpi ei siirry lämpöä konvektiolla.
Passiivinen jäähdytysratkaisu	Passiivisilla jäähdytysratkaisuilla tarkoitetaan sellaisia rakenteellisia tai ikkunalasitukseen liittyviä ratkaisuja, joiden avulla voidaan ehkäistä rakennuksen sisätilojen lämpenemistä kesäaikaan ja samalla vähentää koneellisen jäähdytyksen tarvetta rakennuksessa. Tällaisia ovat mm. auringonsuojaikkunat, lipat, markiisit, säleiköt, sälekaihtimet ja faasimuutosmateriaalien käyttö.

Pintadiffuusio	Pintadiffuusiolla tarkoitetaan vesimolekyylien siirtymistä materiaalihuokosten pinnoilla enemmän vesimolekyyliä sisältävistä kohdista ”pomppimalla” vähemmän vesimolekyyliä sisältäviin kohtiin. Siirtyminen tapahtuu vesimolekyylin irrotessa huokosen pinnasta huokosilmaan ja siirtyessä takaisin pintaan kohdassa, jossa pinnan sidosvoimat vesimolekyyliin ovat suuremmat kuin alkuperäisessä paikassa.
Rakennusfysikaalinen testivuosi	Tässä tutkimuksessa rakennusfysikaalisella testivuodella (MRY) tarkoitetaan toteutuneita ulkoilman olosuhteita vuoden ajanjaksolta tietyltä paikkakunnalta, jotka vastaavat 30 vuoden tarkastelujaksolla vähintään noin 90 % kriittisyystasoa arvioitaessa vaipparakenteiden lämpö- tai kosteusteknistä toimintaa tietyn toimintakriteerin perusteella. Rakennusfysikaalisia testivuosia on määritetty kaksi kappaletta sekä nykyisessä että vuosien 2050 ja 2100 ilmastoissa. Samoja testivuosia voidaan käyttää koko Suomen alueella.
Sisäilman kosteuslisä	Rakennuksen sisä- ja ulkoilman vesihöyrypitoisuuksien erotus, kun sisäilman vesihöyrypitoisuus on suurempi tai yhtä suuri kuin ulkoilmassa. Jos sisäilman vesihöyrypitoisuus on pienempi kuin ulkoilmassa, sitä kutsutaan sisäilman kosteusvajeksi.
Sisäinen konvektio	Konvektiovirtaus ilmaa läpäisevän materiaalin sisällä. Sisäinen konvektio on yleensä lämpötilaeroista johtuvaa luonnollista konvektiota, mutta se voi sisältää myös tuulen aiheuttamaa pakotettua konvektiota.
Stationääritila	Stationääritilassa (= jatkuvuustilassa) olevaan systeemiin tuodaan ja sieltä poistuu vakiomäärä ainetta ja lämpöenergiaa samassa ajassa. Stationääritilassa lämpötilat ja eri aineiden pitoisuudet ovat saavuttaneet tasapainotilan eivätkä muutu ajan kuluessa.
Suhteellinen diffuusiovastus	Suhteellinen diffuusiovastus (s_d) ilmoittaa seisovan ilmakerroksen paksuuden, jonka vesihöyrynvastus on yhtä suuri kuin tarkasteltavan tasapaksun ainekerroksen tai tällaisista muodostuvan kerroksellisen rakenteen vesihöyrynvastus. Suhteellinen diffuusiovastus saadaan kertomalla ainekerroksen vesihöyryn diffuusiovastuskerroin ainekerroksen paksuudella $s_d = \mu \cdot d$.

Suhteellinen kosteus	Ilman suhteellinen kosteus (ϕ) ilmoittaa, kuinka paljon ilmassa on vesihöyryä kyllästyskosteuspitoisuuteen verrattuna tietyssä lämpötilassa.
Säteily	Lämpösäteilyllä tarkoitetaan lämpöenergian siirtymistä sähkömagneettisina aaltoina tai fotoneina kahden eri lämpötilassa olevan pinnan välillä. Lämpösäteilyä syntyy, kun aineen atomeissa ja molekyyileissä olevien elektronien paikat muuttuvat. Lämpösäteily voidaan jakaa pitkä- ja lyhytaaltoiseen säteilyyn. Kaikki aineet ja materiaalit lähettävät pitkäaaltoista lämpösäteilyä, kun niiden lämpötila on absoluuttisen nollapisteen yläpuolella. Hehkuvan kuumat kappaleet, kuten aurinko, lähettävät myös lyhytaaltoista lämpösäteilyä, josta osa on näkyvän valon aallonpituusalueella.
Säteilytase	Säteilytaseella tarkoitetaan kahden pinnan välistä lämmön nettosäteilyä. Kokonaissäteilytaseessa on mukana sekä lyhyt- että pitkäaaltoinen lämpösäteily.
Taivaan tehollinen lämpötila	Taivaan tehollinen lämpötila (T_{sky}) vastaa sellaisen taivaalla olevan kuvitteellisen pinnan lämpötilaa, joka aiheuttaisi samanlaisen pitkäaaltoisen nettosäteilyn rakennuksen ulkopintojen ja taivaan välillä kuin mitä todellisuudessa tapahtuu.
Toimintakriteeri	Rakenteen tai koko rakennuksen toimintaan liittyvä ilmiö tai asia, jolla on vaikutusta rakenteen/rakennuksen turvallisuuteen, terveellisuuteen, ympäristöystävällisyyteen, esteettisyyteen tai taloudellisuuteen. Usein toimintakriteerit kuvaavat erilaisia rakenteiden vaurioitumistapoja ja -ilmiöitä, kuten homeen kasvu, kosteuden kondensoituminen, rakenteiden halkeilu tai muodonmuutokset, mutta toimintakriteerinä voi olla myös esimerkiksi rakennuksen sisäilman laatu tai rakennuksen energiankulutus.
Toimintakriteerin raja-arvo	Määritetty lukuarvo tai ehto, jonka avulla voidaan tehdä päätös tarkastellun vaihtoehdon hyväksymisestä tai hylkäämisestä tietyn toimintakriteerin kannalta.
Tuulensuoja	Tuulensuoja on ainekerros, jonka pääasiallisena tehtävänä on estää tuulen aiheuttama haitallinen ilmavirtaus rakenteen lämmöneristyskerroksessa.
Vapaajähdytysratkaisu	Vapaajähdytysratkaisuilla viilennetään rakennuksen sisäilmaa käyttämällä hyödyksi luonnon omia kylmävarastoja, kuten

yöaikaista ilmaa, maata tai vesistöä. Ilmanvaihtoon perustuvia vapaajäähdytysratkaisuja ovat esimerkiksi tarpeenmukainen ilmanvaihto, yötuuletus ja ikkunatuuletus.

Vertailusuure	Tässä tutkimuksessa vertailusuureella tarkoitetaan rakenteelle tai koko rakennukselle valittua toimintakriteeriä kuvaavaa suuretta, joka voidaan määrittää laskennallisesti rakenteen/ rakennuksen laskennallisen simuloinnin tuloksena saatavien olosuhdearvojen perusteella. Vertailusuureen arvo määritetään valitun toimintakriteerin kannalta kriittisessä kohdassa rakennetta tai rakennusta. Tässä tutkimuksessa esimerkiksi rakenteessa tapahtuvaa homeen kasvua kuvaavana vertailusuureena käytetään homeindeksin maksimiarvoa vuoden aikana ja rakenteessa tapahtuvaa kosteuden kondensoitumista kuvaavana vertailusuureena kondensoituneen kosteuden maksimimäärää vuoden aikana.
Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin	Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin (μ) ilmoittaa paikallaan olevan ilman ja huokoisen aineen vesihöyrynläpäisevyyksien suhteen. Kerroin ilmoittaa myös tietyn paksuisen ainekerroksen ja yhtä paksun ilmakerroksen vesihöyrynvastuksien suhteen. Kertoimen arvoa määritettäessä paikallaan olevan ilman vesihöyrynläpäisevyytenä voidaan käyttää arvoa 195×10^{-12} kg/(msPa).
Vesihöyrynläpäisevyys	Vesihöyrynläpäisevyys (δ_v tai δ_p) ilmoittaa vesihöyrymäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pinta-alayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen, kun vesihöyrypitoisuusero (tai vesihöyryn osapaine-ero) ainekerroksen eri puolilla on yksikön suuruinen.
Vesihöyrynvastus	Vesihöyrynvastus (Z_v tai Z_p) ilmoittaa stationääritilassa ainekerroksen tai rakennusosan eri puolilla olevan vesihöyrypitoisuuseron (tai vesihöyryn osapaine-eron) ja ainekerroksen tai rakennusosan läpi kulkevan kosteusvirran tiheyden suhteen. Homogeenisen ainekerroksen vesihöyrynvastus saadaan jakamalla kerroksen paksuus sen vesihöyrynläpäisevyydellä $Z = d/\delta$.
Vesihöyrypitoisuus	Vesihöyrypitoisuus (v) tarkoittaa ilman sisältämän vesihöyryn määrää tilavuuteen suhteutettuna.

Viistosade

Viistosade (WDR) tarkoittaa sateen vaakasuuntaista komponenttia, joka syntyy tuulen vaikutuksesta. Maanpinnan suuntaisesti puhaltava tuuli kuljettaa myös ilmassa mahdollisesti olevia sadepisaroita mukanaan, jolloin ne liikkuvat maanpintaan nähden sekä alaspäin että vaakasuuntaisesti. Viistosade aiheuttaa kosteuskuormitusta pääasiassa rakennusten tuulenpuoleisille pystypinnoille.

1 Johdanto

Hiilidioksidipäästöjen lisääntyminen ja ilmastonmuutoksen uhkakuvat ovat nostaneet energiatehokkuuden ja ekologiset elämäntavat keskeiseksi puheenaiheeksi. Vuonna 2011 rakennusten lämmittämiseen kului 24 % Suomen primäärienergiankulutuksesta (Tilastokeskus 2012a), joten on luonnollista, että rakentamiselle kohdistuu suuria paineita energiankulutuksen vähentämiseksi. Rakennuksissa energiaa kuluu tilojen ja lämpimän käyttöveden lämmittämisen lisäksi sähkölaitteiden käyttöön ja valaistukseen. Energiankulutusta lisäävät rakennusvaipan läpi johtumalla sekä ilmanvaihdon ja viemärin kautta tapahtuvat lämpöhäviöt. Jotta energiansäästöä tapahtuisi, on kaikkiin osa-alueisiin paneuduttava. Siitä syystä vuosien saatossa on tehty paljon työtä energian säästämisen eteen. Lämpöhäviöitä on pyritty vähentämään rakennusvaipan lämmöneristepaksuuksia lisäämällä ja ilmanvaihdon lämmöntalteenottoa tehostamalla. Kodin sähkölaitteita on kehitetty energiatehokkaammiksi ja vedenkulutusta on pyritty vähentämään esimerkiksi asentamalla kerrostaloihin huoneistokohtaisia kulutusmittareita.

Rakennusten ulkovaipan lämmönläpäisykerroimen (U-arvon) määräystasoa on tiukennettu vuosikymmenten aikana useaan kertaan. Viimeaikoina määräysten kiristyminen on kiihtynyt ja se on tuonut muutospainetta rakennusalalla. Lämmöneristepaksuuden kasvattaminen aiheuttaa muutoksia rakenteiden kosteustekniseen käyttäytymiseen, kun lämpövuodot rakenteen läpi vähentyvät ja rakennusmateriaaleja korvataan uusilla tehokkaammin lämpöä eristävillä rakenteilla. Myös lämmöneristeiden paksuntamisen myötä tapahtuva rakenteiden dimensioiden muutos aiheuttaa uudistuksia rakenteiden suunnitteluun ja käytännön toteutukseen. Vaipan lämmöneristyskyvyn parantuminen voi näkyä rakennuksissa myös lisääntyvänä jäähdytystarpeena.

Lämmöneristepaksuuden kasvattamisen tuomien muutosten rinnalla ilmastonmuutos tuo haasteita rakenteiden kosteustekniseen toimivuuteen. Ilmatieteen laitos on arvioinut eri kasvihuonekaasuskenaarioiden perusteella ilmastonmuutoksen vaikutusta Suomen sääolosuhteisiin. Mallien perusteella vuoden keskilämpötilan ennustetaan olevan tämän vuosisadan loppuvuosikymmeninä 2–6 °C korkeampi kuin vertailujaksona 1971–2000. Ilmaston lämmitessä myös sademäärät lisääntyvät vuosisadan loppuun mennessä talvella 10–40 % ja kesällä 0–20 % jaksoon 1971–2000 verrattuna (Jylhä et al. 2009). Myös muut ilmastolliset osatekijät muuttuvat vieden Suomen olosuhteita homeen kasvulle otollisempaan suuntaan.

FRAME-projektin tavoitteena oli selvittää erityisesti sitä, miten lämmöneristykseen lisääminen ja ilmastonmuutos vaikuttavat rakenteiden kosteustekniseen toimintaan ja rakennusten energiankulutukseen. Kosteusteknisen toiminnan tarkasteluja varten määritettiin FRAME-projektin rinnakkaishankkeessa (REFI-B) Ilmatieteen laitoksen ja Tampereen teknillisen yliopiston yhteistyönä rakennusfysikaaliset testivuodet nykyilmastolle ja tulevaisuuden ilmastoille (vuosien 2050 ja 2100 ilmastot). Vastaavasti REFI-A -hankkeessa Ilmatieteen

laitos yhteistyössä Aalto-yliopiston Energiatekniikan laitoksen kanssa määrittivät rakennusten energialaskennan testivuodet. Rakennusfysikaalisilla testivuosilla tarkasteltiin yleisesti käytössä olevien rakenteiden kosteusteknistä toimintaa vaihtelevilla lämmöneristepaksuuksilla niin nykyilmaston kuin tulevaisuuden ilmastonkin olosuhteissa. Energialaskennan testivuotta käytettiin rakennusten energiankulutuksen tarkasteluun.

Tutkimuksen alkuperäiset tavoitteet on lueteltu alla. Näitä tavoitteita tarkennettiin jossain määrin tutkimuksen aikana. Pääpiirteissään tavoitteet olivat kuitenkin samat koko projektin ajan.

- Selvittää eri vaipparakenteiden rakennusfysikaalista toimintaa Suomen ilmastossa ottamalla huomioon odotettavissa olevan ilmastonmuutoksen ja rakenteiden lisäeristämisen vaikutukset.
- Määrittää vaipparakenteiden rakennusfysikaalisen toiminnan kannalta kriittisiä lämmöneristepaksuuksia ja U-arvoja niiltä osin kuin se on mahdollista.
- Selvittää millä rakenteellisilla tai muilla teknisillä ratkaisuilla vaipparakenteiden toimintaa voidaan parhaiten parantaa, jotta riskit kosteusongelmille vähenevät.
- Antaa suosituksia ja ohjeita tuleville rakennusmääräyksille koskien vaipparakenteiden lämmöneristemääräyksiä, lämpöhäviöiden ja energiakulutuksen laskentaohjeita ja vaipparakenteiden toteutusta.
- Antaa rakennusalalle suosituksia ja ohjeita vaipparakenteiden ja liitosten turvallisista toteutustavoista matalaenergia- ja passiivitaso rakennuksille Suomen ilmastossa.
- Antaa ohjeistusta rakennusprosessin toteutuksesta siten, että rakentamisessa saataisiin aikaan laatuhyppy rakennusaikaisen kosteudenhallinnan osalta.
- Selvittää mitä vaikutuksia ilmastonmuutoksella, lämmöneristyksen lisäämisellä ja LVI-järjestelmien toiminnalla on rakennuksen sisäilman olosuhteisiin sekä toisaalta LVI-järjestelmien käyttöön.
- Välittää kansainvälisissä julkisissa tutkimusprojekteissa saatua tietoa eri rakenteiden toiminnasta ja ilmastonmuutoksesta tärkeiden vientimaiden ilmastossa.

Vaipparakenteiden lämpötekniisten tarkastelujen osalta keskityttiin erityisesti rakenteiden sisäisen konvektion tarkasteluun, jonka merkitys kasvaa, kun avo- ja osittain avoisten lämmöneristeiden eristyspaksuuksia lisätään. Toisena tutkimusalueena vaipan lämpötekniisen toiminnan osalta oli Rakentamismääräyskokoelman C4 lämmöneristysohjeiden päivittäminen vastaamaan eurooppalaisten standardien mukaisia laskentaohjeita. Tätä työtä ei ole kuitenkaan käsitelty tarkemmin tässä julkaisussa.

Muissa maissa saatuja tutkimustuloksia rakenteiden kosteusteknisestä toiminnasta ja ilmastonmuutoksesta kerättiin erityisesti Ruotsista, koska siellä rakenteiden toteutus on hyvin samanlainen kuin Suomessa ja toisaalta siksi, että Etelä-Ruotsin ilmasto-olosuhteet vastaavat nykyisin niitä olosuhteita, joiden on ennustettu tulevan Suomeen muutaman kymmenen vuoden kuluttua.

Tutkimuksessa on tarkasteltu Suomen rakennuskannassa esiintyviä asuin- ja toimitilarakennuksien rakenteita. Tarkastelut on tehty pääosin laskennallisesti. Laskentaohjelmien ja -tulosten luotettavuutta on verifioitu laboratorio- ja kenttäkokeiden mittaustuloksien avulla. Laskennalliset tarkastelut pohjautuvat TTY:n kehittämään rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmään, jota varten on tehty tutkimustyötä useissa eri projekteissa runsaan kymmenen vuoden ajan. Tutkimuksessa on tarkasteltu tyypillisimpiä ja/tai riskialttiiksi arvioituja rakenteita. Rakenteita on tarkasteltu lähinnä käyttötilanteen sisäilman mitoitulosuhteissa ja lähinnä ideaalisilla rakenteilla, joissa ei tapahdu kosteusvuotoja. Ulkoilman testivuodet on määritetty nykyilmastossa sekä vuosien 2050 ja 2100 ilmastossa A2-kasvihuonekaasuskenaarion mukaan.

2 Ilmastomuutokseen ja rakennusten lämmöneristykseen liittyviä tarkasteluja muissa maissa

2.1 Rakennusten lämmöneristystasoja eri maissa v. 2012

2.1.1 U-arvovaatimusten kehittyminen Suomessa

Rakennusten ulkovaipan lämmönläpäisykerroimen (U-arvon) määräystasoa on Suomessa kiristetty vuosikymmenten aikana useaan kertaan, kuten taulukosta 2.1.1 voidaan huomata. Vuodesta 1976 lähtien rakennusosien lämmönläpäisykerroimien määräystasot on esitetty rakentamismääräyskokoelman osassa C3.

Taulukko 2.1.1 Rakennusosien lämmönläpäisykerroimien $[W/(m^2 \cdot K)]$ määräys-/vertailutason kehittyminen Suomessa.

	1962	1969	1976	1978	1985	2003	2007	2010 ⁵
Ulkoseinä	0,70 ¹	0,70 ¹	0,4	0,29	0,28	0,25	0,24	0,17
Yläpohja	0,47/0,41 ²	0,47/0,41 ²	0,35	0,23	0,22	0,16	0,15	0,09
Alapohja (maata vastaan oleva rakennusosa)	0,47/0,41 ³	0,47/0,35 ³	0,40	0,40	0,36	0,25	0,24	0,16
Ikkuna	-	3,14–2,44 ⁴	2,1	2,1	2,1	1,4	1,4	1,0
Ovi	-	3,14–2,44 ⁴	-	-	-	1,4	1,4	1,0

Lähde: RIY A43 (1962) RIL 66 (1969) RakMK RakMK RakMK RakMK RakMK RakMK

¹ Normaalin vaatimus pohjoiselle vyöhykkeelle

² Vaatimus kivirakenteiselle/ puurakenteiselle yläpohjalle pohjoisella vyöhykkeellä

³ Vaatimus lämmittämätöntä tilaa vasten / ulkoilmaa vasten

⁴ Vaihtelee ikkunan tai oven pinta-alan mukaan

⁵ Vuonna 2012 siirryttiin kokonaisenergiankulutustarkasteluun, U-arvon vertailuarvot säilyivät vuoden 2010 määräysten mukaisina

Maailmanlaajuinen energiakriisi oli 70-luvulla pääasiallisena syypäänä määräystason kiristymiseen ja U-arvojen muutos oli tämän jälkeen pitkään maltillisempaa. 2010 määräystasoa kiristettiin jälleen 30–40 %:a. Määräystason kiristykseen vaikutti pääasiassa Euroopan Unionin vuonna 2008 hyväksymä ilmasto- ja energiapaketti, joka velvoitti jäsenmaita ns. ”20–20–20”-tavoitteisiin. Vuoteen 2020 mennessä hiilidioksidipäästöjä tulee vähentää 20 %:a vuoteen 1990 verrattuna, energiatehokkuutta tulee parantaa 20 %:a ja uusiutuvien energialähteiden käyttöä lisätä 20 %:a. Energiasäästötavoitteet toivat paineita myös rakennusallalle, sillä esimerkiksi vuonna 2011 rakennusten lämmitykseen kului lähes neljäsosa koko Suomen primäärienergiankulutuksesta (Tilastokeskus 2012a).

2.1.2 Eri maiden U-arvovaatimusten vertailua

European Insulation Manufacturers Association teki vuonna 2007 laajan tutkimuksen, jossa selvitettiin 100 eurooppalaisen kaupungin senhetkiset U-arvovaatimukset seinä-, katto- ja lattiarakenteille. Mukana selvityksessä oli 31 valtiota. (EURIMA 2007). Viime vuosina energiatehokkuuden parantamisvaatimukset ovat olleet kuitenkin useimmissa maissa niin suuria, että vaatimukset ovat muuttuneet ja tilanteen päivittäminen on paikallaan.

EU:n rakennusten energiatehokkuuden yhteishankkeen (Concerted Action EPBD (Energy Performance of Buildings Directive)) internetsivuilla pidetään yllä maakohtaista tietokantaa, josta löytyvät myös useimpien EU-maiden U-arvovaatimukset, kirjoitushetkellä n. vuoteen 2010–2011 asti (Concerted Action EPBD 2012).

Taulukossa 2.1.2 on esitetty eri maiden U-arvovaatimuksia. Euroopasta vertailuun on valittu Ruotsi, Norja, Tanska, Saksa, Itävalta ja Iso-Britannia – niissä ilmasto-olosuhteet ja rakentamistavat muistuttavat Suomea niin, että vertailutulokset ovat jokseenkin yhteismitallisia. Samoilla perusteilla mukaan on otettu myös Kanada, USA, Japani ja Venäjä. Näiden osalta mukana tarkastelussa ovat vain pohjoiset, Suomen oloja parhaiten vastaavat ilmastovyöhykkeet. Taulukosta voidaan havaita, että Suomen rakentamismääräyskokoelman mukainen lämmönläpäisykertoimen vertailutaso on yksi tiukimmista kaikkien rakennusosien osalta.

Tässä tarkastelussa mukana ovat vain uudisrakennukset ja niistä pientalot; korjausrakentamisessa ja erityyppisissä rakennuksissa määräysten hajonta on niin runsas, että vertailu kävisi varsin vaikeaksi.

Useissa maissa rakennusten energiankulutusmääräykset ovat muuttuneet tai muuttumassa niin, että yksittäisille rakennusosille ei aseteta ehdottomia vaatimuksia, vaan rakennus käsitellään kokonaisuutena. Kuitenkin vaatimuksia rakennusosille annetaan edelleen ja niitä on selvyuden vuoksi käytetty tässä vertailussa. Rakennusosien kohdalla vaihtoehdot, esim. ryömintätilaisen ja maanvastaisen alapohjan erilaiset U-arvovaatimukset, eristeen sijainnista riippuvat vaatimukset tai testi- ja vähimmäisvaatimukset on pääosin esitetty vaihteluvälin avulla niitä erittelemättä, samoin kuin eräiden valtioiden kohdalla eri osavaltioiden tai ilmastovyöhykkeiden erilaiset arvot.

Taulukko 2.1.2 U-arvoja pohjoisen ilmaston maissa. [$W/(m^2 \cdot K)$]. Lähteet on esitetty liitteessä 5.

	Ulkoseinä	Yläpohja	Alapohja	Ikkuna	Voimaan
Suomi ¹	0,17	0,09	0,16–0,17	1,00	2012
Ruotsi ²	0,18	0,13	0,15	1,30	2011
	0,10	0,08	0,10	1,10	2011
Norja	0,18	0,13	0,15	1,20	2010
Tanska	0,15	0,10	0,10	1,40	2010
Saksa ³	0,28	0,20	0,35	1,30	2009
Itävalta	0,35	0,20	0,40	1,40	2011
Englanti ja Wales	0,30	0,20	0,25	2,00	2010
Skotlanti ⁴	0,25	0,18	0,20	1,80	2011
USA ⁵	0,28–0,44	0,12–0,15	0,15–0,30	1,99	2009
Kanada ⁶	0,22–0,48	0,11–0,20	0,20–1,14	1,20–1,80	2006–2010
Japani ⁷	0,35–0,39	0,17–0,32	0,24–0,38	2,33	1999
Venäjä ⁸	0,18–0,56	0,12–0,40	0,14–0,56	1,25–3,33	2003

¹ Vertailulämpöhäviölaskennassa käytettävät rakennusosakohtaiset arvot. Ehdoton enimmäisarvo lämpimissä tiloissa on $0,60 W/(m^2 \cdot K)$ seinille sekä ylä- ja alapohjille ja $1,80 W/(m^2 \cdot K)$ ikkunoille.

² Taulukon vähimmäisvaatimukset ovat vaihtoehtoisia kokonaistarkastelulle tietyin ehdoin. Ensimmäisiä arvoja voidaan käyttää lattia-alaltaan alle $100 m^2$:n rakennuksissa, kun lämmitystapa on muu kuin sähkölämmitys, ikkunoiden pinta-ala on korkeintaan 20 % lattia-alasta ja jäähdytystarvetta ei ole. Toiset arvot pätevät lattia-alaltaan $51–100 m^2$:n sähkölämmitetyle rakennukselle.

³ EnEV 2012/2013 tekeillä.

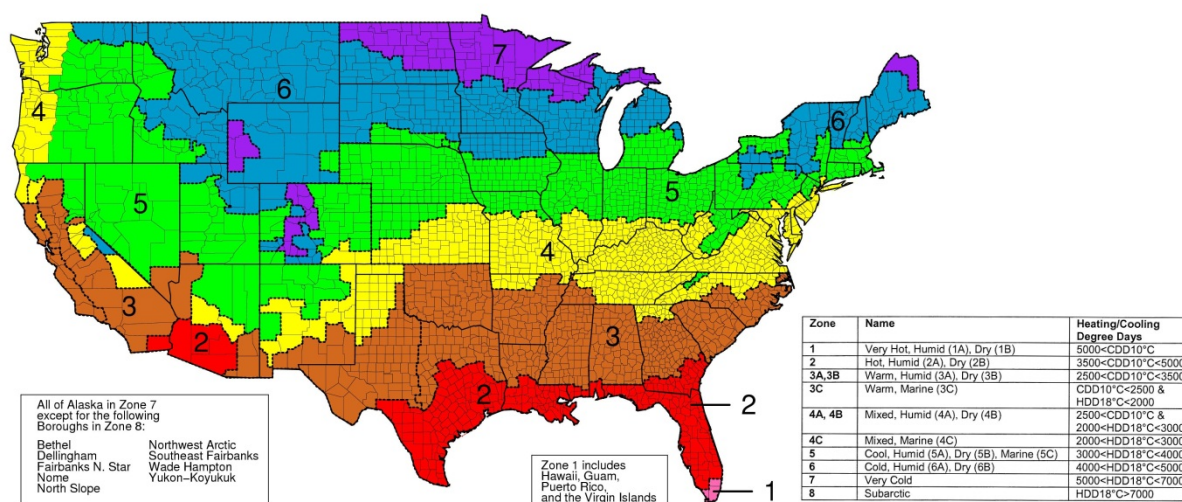
⁴ Pinta-alalla painotetut keskimääräiset rakennetyypin arvot. Ehdottomat yksittäisen rakenne-elementin enimmäisarvot ovat seinille ja alapohjille $0,70$, yläpohjille $0,35$ ja ikkunoille $3,3 W/(m^2 \cdot K)$.

⁵ Vyöhykkeet 4–7 (kuva 2.1.1).

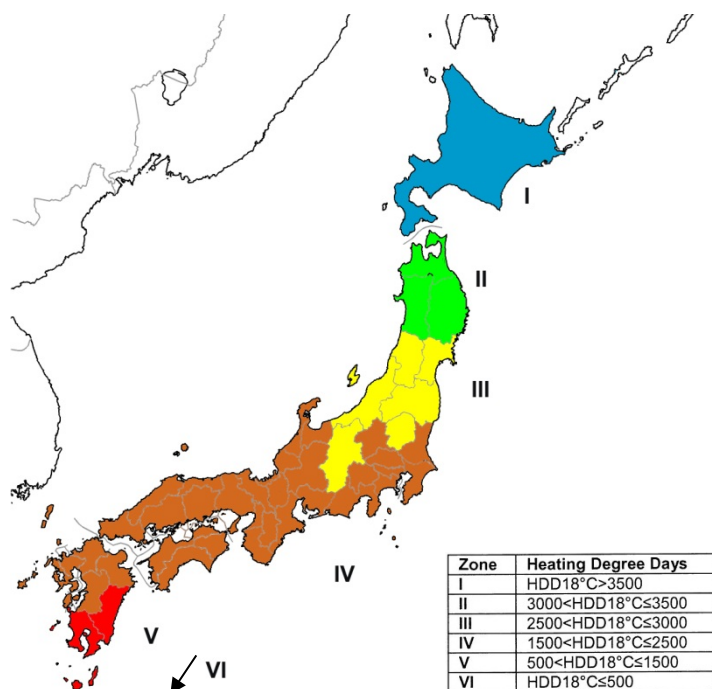
⁶ Territoriokohtaisia arvoja eri lähteistä. Syksyllä 2012 on ilmestymässä kansallinen normipäivitys, jossa esitetään suositeltuja arvoja.

⁷ Vyöhyke I (kuva 2.1.2).

⁸ Astepäiväluvun mukaisista vyöhykkeistä mukana vyöhykkeet $4\ 000–12\ 000\ ^\circ C \cdot d$.



Kuva 2.1.1 USA:n jako R-lukuvaatimusten mukaisiin vyöhykkeisiin (www.energycodes.gov).



Kuva 2.1.2 Japanin ilmastovyöhykkeet (residential climate zones). (Liite 5, Japani)

2.1.3 Matalaenergia- ja passiivitalojen U-arvot

Matalaenergia- ja passiivitalokonsepteista on Lundin yliopistossa tehty opinnäyte, jossa yhdeksän eurooppalaisen valtion määritelmistä, standardeista ja vaatimuksista on tehty yhteenveto ja vertailu (Thullner 2010). Tässä vertailussa on kuitenkin mukana vain passiivitaloja, joille on olemassa joksikin yhtenevät tavoitteet tarkastelluissa maissa.

Passiivitalokonseptin tavoitteena on suunnitella ja toteuttaa rakennus, joka kuluttaa merkittävästi vähemmän energiaa vastaavaan tavanomaisesti toteutettuun rakennukseen verrattuna. Useimmat passiivitalon määritelmät perustuvat kolmeen tunnuslukuun: tilojen lämmitysenergiantarve, kokonaisprimäärienergiantarve ja mittaukseen perustuva ilmanvuotoluku. Näiden tunnuslukujen suuruudet sekä se, miten tavoitellut tunnusluvut saavutetaan, vaihtelee valtiosta ja ilmastosta riippuen; esim. keskieuropalaiset määritelmät johtaisivat Pohjois-Euroopan ilmastossa mitoitukseltaan kohtuuttomiin rakenteisiin ja ikkunapinta-alojen liiallisiin rajoituksiin. Tämän vuoksi esim. Ruotsi, Suomi ja Norja ovat päätyneet omiin, kansallisiin kriteereihin. (Lylykangas & Nieminen 2009)

PEP (Promotion of European Passive Houses) on Euroopan Komission tukema yleiseurooppalainen projekti, joka pyrkii kehittämään passiivitalokonseptia periaate- ja ratkaisutasolla Euroopan eri alueilla ja ilmastoissa. Mukana ovat Itävalta, Belgia, Tanska, Saksa, Irlanti, Alankomaat, Norja, Iso-Britannia ja Suomi. Kuten edellä mainittiin, Norjaa ja Suomea lukuun ottamatta osallistujamaat ovat omaksuneet Saksan esikuvan mukaisen määrittelyn, joka on niin laajalle levinnyt, että sitä voisi kutsua jopa ”kansainväliseksi passiivitalostandardiksi” (Lylykangas & Nieminen 2009). Tämä määrittely on yleisesti

käytössä em. Euroopan maiden lisäksi myös USA:ssa, Kanadassa, Japanissa ja Venäjällä. (PEP 2012)

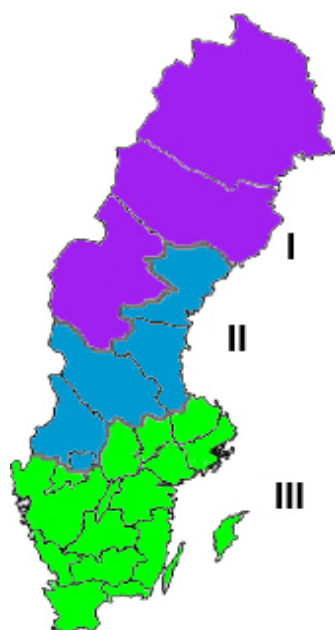
Passiivi- ja matalaenergiarakentamisen konseptien sovittamiseksi pohjoisen ilmaston vaatimuksiin käynnistettiin v. 2009 North Pass -projekti eli ”Promotion of Very Low-Energy House Concept to the North European Building Market”. Koordinaattorina toimi VTT ja siinä oli mukana tutkimuslaitoksia Suomesta, Ruotsista, Norjasta, Tanskasta, Virossa, Latviasta, Liettuasta ja Puolasta. Projekti on kestänyt vuoden 2012 toukokuuhun saakka. (North Pass 2012)

Passiivitalo on kokonaisratkaisu, jossa eri osatekijät kuten lämmitysjärjestelmä, rakenteiden valinta ja eristyspaksuudet riippuvat toisistaan ja vaikuttavat toisiinsa. Tämän vuoksi eri maiden käytäntöjä ja jopa eri hankkeita on vaikea verrata keskenään esim. pelkän U-arvon perusteella. Suositellut tai tyypilliset passiivitalon rakennusosien U-arvot ovat silti melko selkeä väline, jolla voi vertailla eri maiden tasoa keskenään sekä kunkin maan passiivitalojen tavoitetasoja tavanomaiseen rakentamiseen verrattuna.

Taulukko 2.1.3 Passiivitalojen U-arvosuosituksia. [$W/(m^2 \cdot K)$]. Lähteet on esitetty liitteessä 5.

	Ulkoseinä	Yläpohja	Alapohja	Ikkuna	Uiko-ovi
Suomi	< 0,15	< 0,08	< 0,15	< 0,80	< 0,40
Ruotsi	Ei rakennusosakohtaisia U-arvosuosituksia ¹			< 0,90	
Norja	≤ 0,15	≤ 0,13	≤ 0,15	≤ 0,80	≤ 0,80
Kansainvälinen passiivitalostandardi	≤ 0,15	≤ 0,15	≤ 0,15	≤ 0,80	≤ 0,80

¹ Ruotsin passiivitalon energiankulutusvaatimukset riippuvat talon sijainnista joko eteläisellä (ilmastovyöhyke III) tai pohjoisella (ilmastovyöhykkeet I ja II) vyöhykkeellä. Suurin osa toteutetuista passiivitaloista sijaitsee eteläisellä vyöhykkeellä (kuva 2.1.3.).



Klimatzon	Läner
I	Norrbottnens, Västerbottnens och Jämtlands län
II	Västernorrlands, Gävleborgs, Dalarnas och Värmlands län
III	Västra Götalands, Jönköpings, Kronobergs, Kalmar, Östergötlands, Södermanlands, Örebro, Västmanlands, Stockholms, Uppsala, Skåne, Hallands, Blekinge och Gotlands län

Kuva 2.1.3 Ruotsin ilmastovyöhykkeet (BBR 19 2011).

Taulukkoon 2.1.4 on koottu lyhyt, esimerkinomainen katsaus ulkomailla toteutettujen passiivitaloprojektien U-arvotasoista. Katsaukseen on valittu samoja maita, joiden normaalin rakentamisen U-arvomääräyksiä tarkasteltiin luvussa 2.1.2. Useimmat taulukon kohteet löytyvät kansainvälisestä tietokannasta, joka on eri saksalaisten ja kansainvälisten osapuolien ylläpitämä laaja tietokanta toteutuneista passiivitaloprojekteista (Datenbank für Passivhaus Projekte 2012). Tietokannan ulkopuolisten kohteiden lähdetiedot on esitetty taulukon alaviitteissä.

Taulukko 2.1.4 Esimerkkejä ulkomailla toteutettujen passiivipientalojen U-arvotasoista. [$W/(m^2 \cdot K)$].

		Ulkoseinä	Yläpohja	Alapohja	Ikkuna	Ulko-ovi
Ruotsi ¹	Lidköping	0,09	0,07	0,10	0,85	1,40
	Frillesås	0,11	0,11	0,08	0,70	1,00
	Värnamo	0,10	0,07	0,09	0,94	0,06
Norja	Sørumsand	0,11	0,102	0,095	0,68	0,75
	Oslo ²	0,10	0,10	0,08	0,77	0,75
Tanska	Ebeltoft	0,09	0,05	0,05	0,62	
Saksa	Droyssig	0,123	0,10	0,113	0,86	
	Radeberg	0,102	0,084	0,147	0,74	0,80
Itävalta	Ach	0,11	0,101	0,114	0,80	0,71
	Horn	0,10	0,09	0,13	0,80	
Iso-Britannia	Moreton-in-Marsh ³	0,117/0,153	0,085	0,146	0,74	0,72
	Dunoon ⁴	0,095	0,094	0,15	0,80	1,16
	Kirkless	0,113	0,096	0,104	0,79	0,79
USA	Hudson, WI	0,083	0,06	0,097	0,82	0,62
	Urbana, IL	0,092	0,082	0,106	1,00	0,544
	Eugene, OR	0,08	0,06	0,07	0,70	
Kanada	Wakefield, QC	0,118	0,114	0,15	1,00	
Japani	Kamakura	0,16	0,101	0,217	0,71	0,80

¹ <http://www.plea2009.arc.ulaval.ca/Papers/2.STRATEGIES/2.2%20Heating%20and%20Cooling/ORAL/2-2-04-PLA2009Quebec.pdf>

² http://biblioteket.husbanken.no/arkiv/presentasjoner/passivhuskonferanse_2008_artikkel_the_first_certified_passive_house_in_norway.pdf

³ <http://www.sphc.co.uk/underhill-data>

⁴ <http://www.sphc.co.uk/tigh-na-cladach-data>

⁵ <http://passivehouseprojects.wordpress.com/passive-house-projects/the-small-elegant-and-sustainable-urban-farmstead/>

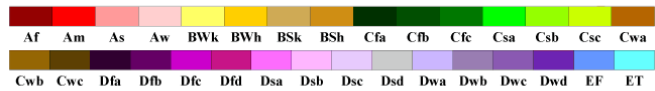
2.2 Rakentaminen ja ilmasto-olosuhteet Ruotsissa

2.2.1 Ruotsin ja Suomen ilmasto-olojen vertailu

Ilmatieteen laitoksen tekemien ilmastonmuutosmalliarvioiden perusteella Suomen keskilämpötila muuttuu vuosisadan viimeisillä vuosikymmenillä 2–6 °C lämpimämmäksi kuin vertailuajanjaksona 1971–2000. Ilmastonmuutoksen seurauksena myös sademäärät lisääntyvät (Jylhä et al. 2009). Suomen olosuhteet tulevat ilmastonmuutosmallien perusteella muistuttamaan eteläisempien ilmastovyöhykkeiden ilmasto-olosuhteita. Kuvassa 2.2.1 on esitetty maapallo jaettuna Köppen-Geiger ilmastoluokituksen perusteella erilaisiin ilmastovyöhykkeisiin. Jaottelu on tehty vuosina 1951–2000 seurattujen lämpötila- ja sademäärähavaintojen perusteella. Kuvassa 2.2.2 on puolestaan esitetty aikakauden 2076–2100 ilmastovyöhykkeiden jaottelu, joka perustuu IPCC:n A2-kasvihuonekaasuskenaarioon (Rubel & Kottek 2010). Kuvia vertailemalla voidaan saada viitteitä siitä, missä osassa maapalloa ilmasto-olosuhteet muistuttavat Suomen nykyilmastoa ja mihin suuntaan Suomen ilmastovyöhykkeet muuttuvat tulevaisuudessa. Kuvista nähdään että Suomen kaltaisia ilmasto-olosuhteita on pohjoismaissa, Venäjällä ja Pohjois-Amerikassa. Tulevaisuudessa Suomen ilmastotyyppi muistuttaa kasvihuonekaasuskenaarioiden perusteella Keski-Euroopan ilmastoa. Tätä tietoa ilmasto-olosuhteiden yhteneväisyyksistä voidaan käyttää hyödyksi, kun tehdään selvitystä muissa maissa tehdyistä rakentamiseen liittyvistä tutkimuksista. Ilmastorasitusten ollessa samantyyppisiä kuin Suomessa myös rakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa on yhteneväisyyksiä.

World Map of Köppen–Geiger Climate Classification

updated with CRU TS 2.1 temperature and VASCLimO v1.1 precipitation data 1951 to 2000



Main climates

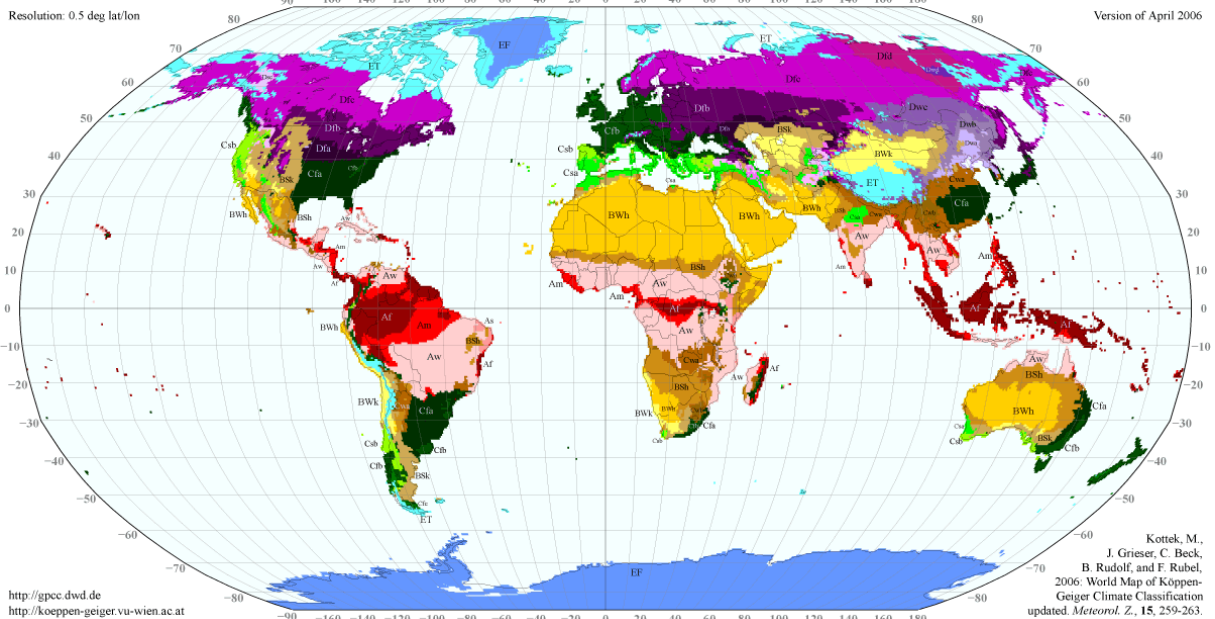
- A: equatorial
- B: arid
- C: warm temperate
- D: snow
- E: polar

Precipitation

- W: desert
- S: steppe
- f: fully humid
- s: summer dry
- w: winter dry
- m: monsoonal

Temperature

- h: hot arid
- k: cold arid
- a: hot summer
- b: warm summer
- c: cool summer
- d: extremely continental
- F: polar frost
- T: polar tundra

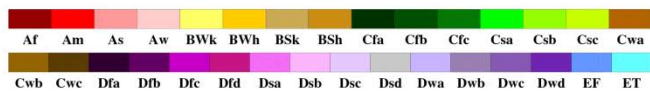


Kuva 2.2.1

Maapallo jaettuna Köppen-Geigerin ilmastoluokituksen mukaisiin luokkiin. Luokitus on tehty vuosien 1951–2000 lämpötila- ja sademäärätietojen perusteella.

World Map of Köppen–Geiger Climate Classification

projected using IPCC A2 Tyndall SC 2.03 temperature and precipitation scenarios, period 2076 to 2100



Main climates

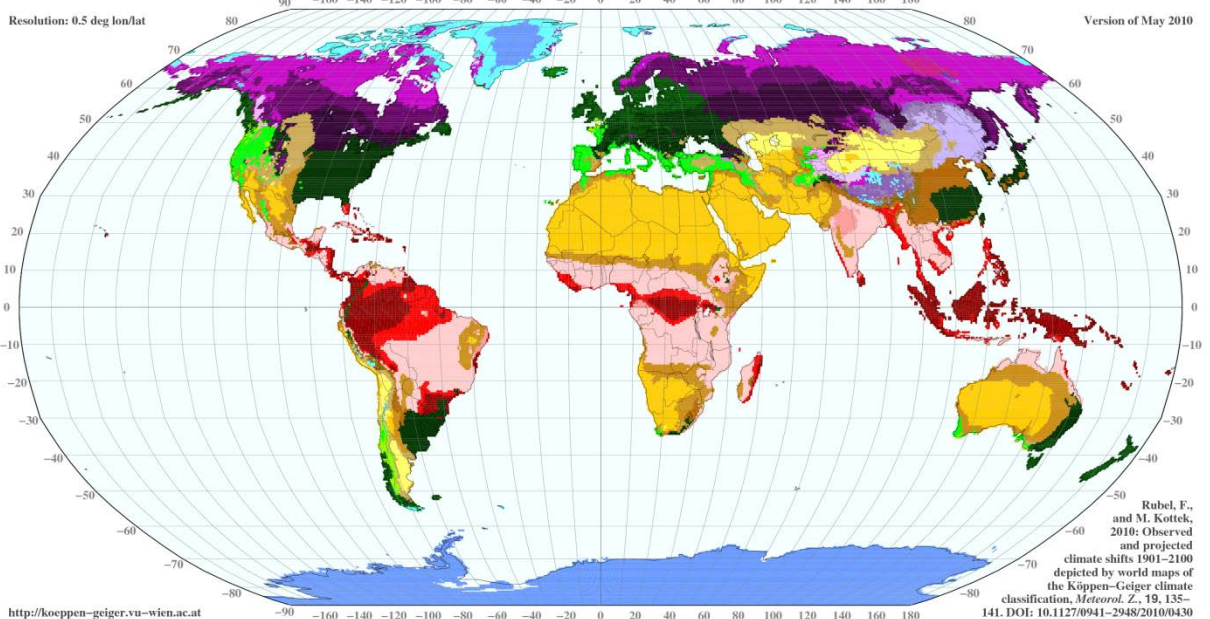
- A: equatorial
- B: arid
- C: warm temperate
- D: snow
- E: polar

Precipitation

- W: desert
- S: steppe
- f: fully humid
- s: summer dry
- w: winter dry
- m: monsoonal

Temperature

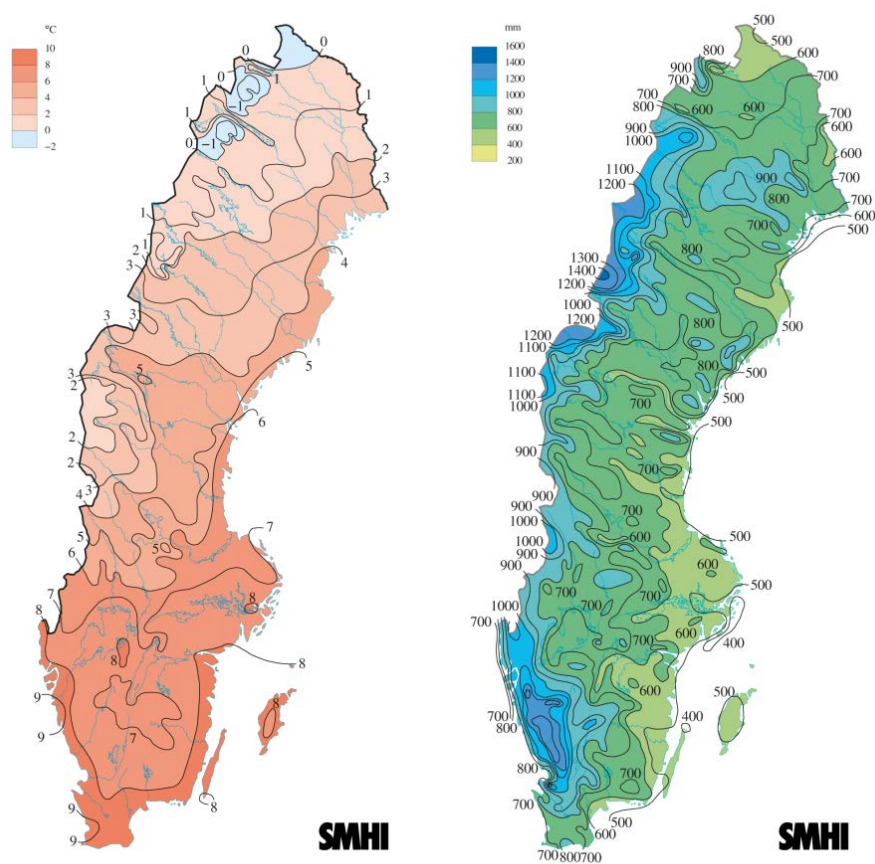
- h: hot arid
- k: cold arid
- a: hot summer
- b: warm summer
- c: cool summer
- d: extremely continental
- F: polar frost
- T: polar tundra



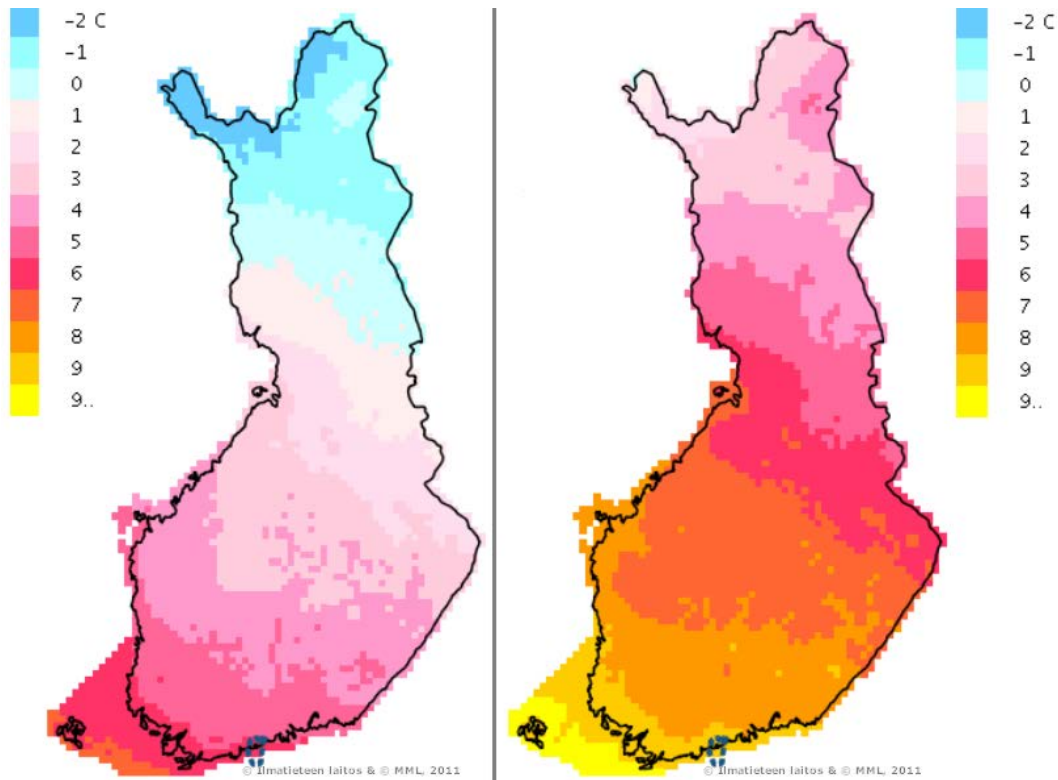
Kuva 2.2.2

Maapallo jaettuna Köppen-Geigerin ilmastoluokituksen mukaisiin luokkiin. Luokitus on tehty IPCC:n A2-kasvihuonenaaraskenaariota mukaisena ennusteena aikavälille 2076–2100.

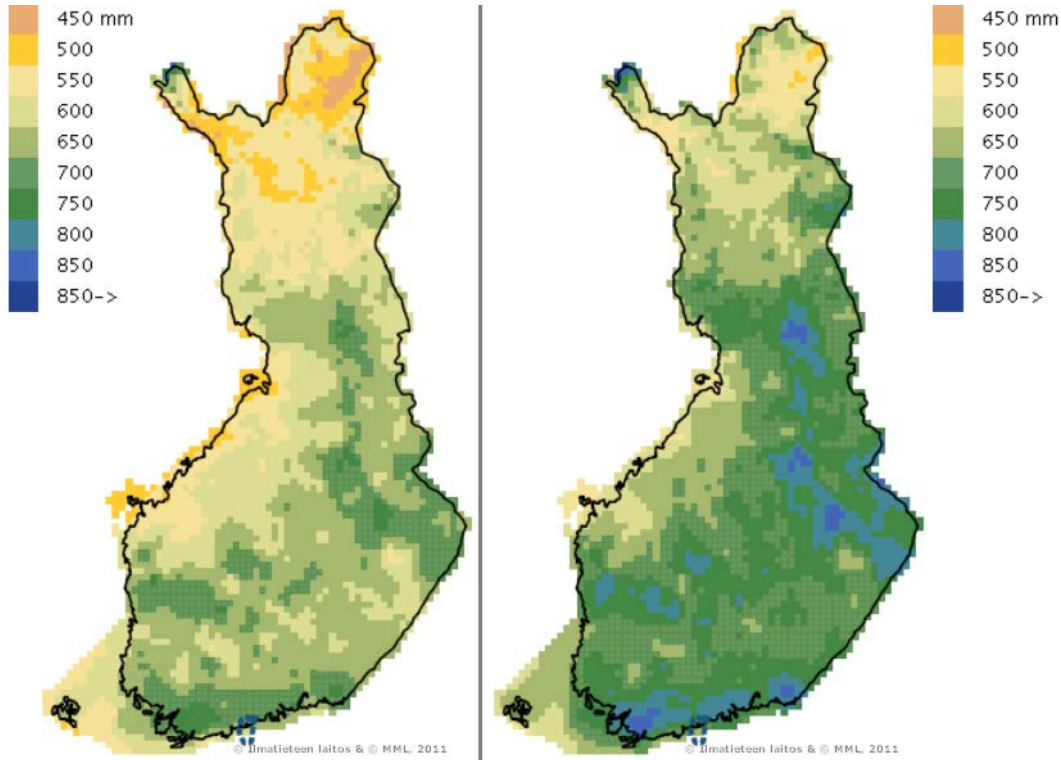
Rakennustekniseltä kannalta katsottuna ilmastotyyppiltään samanlaisista alueista kiinnostavin on Ruotsi. Ilmastorasitusten samankaltaisuuden sekä yhteisen historian vuoksi maiden rakennuskulttuurit ovat hyvin samantyyliisiä. Tämän lisäksi ilmastomuutosmallien perusteella Etelä-Suomen ilmasto muuttuu vähitellen kohti Etelä-Ruotsin ilmasto. Kuvasta 2.2.3 nähdään, että Etelä-Ruotsissa vuotuinen keskilämpötila on vuonna 2011 ollut 7–9 °C. Vuotuinen sademäärä on vaihdellut 600 mm:stä yli 1000 mm:iin. Ilmatieteen laitoksen ennusteen mukaan keskilämpötila Etelä-Suomessa tulee olemaan aikakaudella 2051–2080 Etelä-Ruotsin vuoden 2011 keskilämpötilaa vastaava 7–9 °C (ks. kuva 2.2.4). Tämän lisäksi vuotuiset sademäärät tulevat vastaamaan myös Etelä-Ruotsin olosuhteita (ks. kuva 2.2.5).



Kuva 2.2.3 Keskilämpötilojen ja sademäärien jakautuminen Ruotsin eri osissa. Vasemmalla on esitetty Ruotsin keskilämpötilan jakaumat vuonna 2011. Oikealla on esitetty vuotuisen sademäärän jakaumat samana vuonna. (Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut – www.smhi.se)



Kuva 2.2.4 Suomen ilmastomuutoksen vaikutus lämpötilaan. Vasemmalla on esitetty vuoden keskilämpötila vertailuajankohtana 1971–2000. Oikealla on esitetty keskilämpötila tulevaisuuden ajankohtana 2051–2080. (Ilmatieteen laitos – Ilmasto-opas.fi – Kartat, kuvaajat ja datat – Mennyt ja tuleva ilmasto)



Kuva 2.2.5 Suomen ilmastomuutoksen vaikutus sademäärään. Vasemmalla on esitetty vuotuinen sademäärä vertailuajankohtana 1971–2000. Oikealla on esitetty vuotuinen sademäärä tulevaisuuden ajankohtana 2051–2080. (Ilmatieteen laitos – Ilmasto-opas.fi – Kartat, kuvaajat ja datat – Mennyt ja tuleva ilmasto)

Tulevaisuuden ilmaston yhteneväisyyksien sekä samankaltaisen rakentamiskulttuurin vuoksi Ruotsin rakentamisen seuraaminen antaa viitteitä myös Suomen rakentamisen tulevaisuuden tilasta. Tästä syystä FRAME-projektissakin tehtiin yhteistyötä ruotsalaisten yliopistojen kanssa järjestämällä tutkijavaihto Chalmersin ja Lundin yliopistoihin sekä yritysekskursio seminaarin ja työmaavierailujen muodossa.

2.2.2 Rakentamiskulttuuri

Samankaltaisen ilmastorasituksen ja rakennuskulttuurin sekä yhteisen historian vuoksi Suomessa ja Ruotsissa käytössä olevat rakenteet ovat monella tavoin samankaltaisia. Huomionarvoista on, että monet Suomessa ongelmallisiksi koetut rakenteet ovat aiheuttaneet päänvaivaa myös naapurimaassamme. Joidenkin rakenteiden osalta ollaan Ruotsissa jopa Suomea edellä. Ongelmat ovat olleet Ruotsissa jo tiedossa, kun rakennetta on vasta alettu Suomessa tuoda markkinoille. Tästä esimerkkinä on eristerapattu rankaseinä. Ruotsin rakentamiskokemusten seuraaminen antaa arvokasta tietoa rakentamisen tulevaisuuden haasteista Suomessa ja osaltaan auttaa estämään rakennusvirheiden ja kosteusongelmien syntymistä.

Ryömintätilainen alapohja sekä tuuletettu puurakenteinen yläpohja ovat esimerkkejä rakennetyypeistä, joiden kosteustekniseen toimintaan ilmastonmuutos tulee vaikuttamaan merkittävästi ja joiden ongelmallisuudesta on viitteitä myös Ruotsissa. Ryömintätilaisia alapohjia on tutkittu ja ohjeistuksia aiheesta on kirjoitettu Ruotsissa jo 70-luvulta lähtien (mm. Elmroth 1975; Bergström & Samuelsson 1985; Åberg 1999; Svensson 2001). Jo vuonna 1975 Elmroth totesi tutkimuksessaan, että riittävällä ilmanvaihdolla, maanpohjan lämmöneristämällä sekä ehkäisemällä kosteuden siirtymistä maaperästä ilmaan pystytään vaikuttamaan ryömintätilan olosuhteisiin myönteisesti. Puurakenteisia tuuletettuja yläpohjia on tutkittu esimerkiksi lähteissä Samuelsson (1998), Harderup & Arfvidsson (2008), Nik (2012). Harderup & Arfvidsson (2008) tutkivat lämmöneristävän aluskatteen, tuuletuksen rajoittamisen ja ulkoisten lämmittimien vaikutusta tuulettuvien puurakenteisten yläpohjien olosuhteisiin.

Puurankarakenteisten ulkoseinien kosteusteknistä toimivuutta on tutkittu Ruotsissa viime aikoina. Hägerstedt (2012) on todennut tutkimuksessaan, että hyvin eristetyt puurankaiset ulkoseinärakenteet ovat herkkiä home- ja kosteusvaurioille. Tutkimuksessa todettiin, että puurankaisten ulkoseinärakenteiden kosteusteknistä toimintaa voidaan parantaa lisäämällä tuulensuojan ja puurungon väliin yhtenäinen lämmöneristekerros, jonka paksuus riippuu varsinaisen lämmöneristekerroksen paksuudesta.

Eriaterapattun tuulettumattoman puurankaseinän käyttäminen ulkoseinärakenteena on aiheuttanut viimeisen vuosikymmenen aikana Ruotsissa mittavia vaurioita. Vaurioriskien arvioidaan koskevan jopa kymmeniätuhansia asuinrakennuksia. Kosteusvauriot ovat olleet seurausta rakennusaikana rakenteeseen päässeestä kosteudesta tai julkisivun epätiiviykskohdista rakenteen sisälle tunkeutuneesta sadevedestä. Rakenteen riskialttiudesta on

julkaistu Ruotsissa useita artikkeleita ja tutkimusraportteja (Samuelson et al. 2007, Samuelson & Jansson 2009, Jansson 2011). Ruotsissa tehtyjen havaintojen perusteella rapattu puurankaseinä tulisikin tehdä tuulettuvana rakenteena.

Vuonna 2009 Ruotsissa valmistui Boverketin tekemä laaja tutkimus Ruotsin rakennuskannan tilasta. Kyseisestä BETSI-tutkimuksesta ilmenee esimerkiksi missä rakennetyypeissä tai ikäryhmissä on vaurioita tai vaurioriski. Tutkimuksesta käy ilmi, että 69 % omakotitaloista ja 45 % asuinkerrostaloista on jossain määrin vaurioituneita. Vaurioaste ei kuitenkaan suuressa osassa tapauksista ole kovin suuri. Jos vauriot korjattaisiin heti, tulisi niiden korjaus maksamaan 230–330 miljardia Ruotsin kruunua (28–40 miljardia euroa). Tutkimuksesta saadaan selville myös eristerapatun puurankaseinän ongelmallisuus. Tutkimuksen mukaan 91 % eristerapatuista puurankaseinistä on vaurioituneita tai niissä on vaurioriski. (Boverket 2009, Boverket 2010a, Boverket 2010b)

2.2.3 Määräykset ja ohjeet

Ruotsin rakentamismääräyksiä toimii Regelsamling för byggande, BBR 19 (2011), joka on astunut voimaan vuoden 2012 alussa.

Rakennusfysiikan kannalta mielenkiintoinen yksityiskohta määräyksissä on, että rakenteissa käytettyjen materiaalien kriittinen kosteuspitoisuus homehtumisen tai vaurioitumisen kannalta tulee olla selvillä ja rakenteet eivät saa ylittää tätä arvoa käyttöikänsä aikana. Materiaalien kriittisen kosteuspitoisuuden puuttuessa on suunnitelmissa käytettävä raja-arvona 75 % RH:n suhteellista kosteutta. Tämä määräys on johtanut siihen, että materiaalien kosteudenkestävyyksiä ja kriittisiä kosteuksia tutkitaan Ruotsissa yhä tarkemmin. Myös rakenteiden kosteusteknisen toiminnan tarkastelu simulointiohjelmilla on tästä syystä yleisempää kuin Suomessa. Lisäksi rakennusmateriaalien rakennusaikaiset olosuhteet sekä kosteustekniseen toimintaan vaikuttavien detaljien toteutustavat tulisivat ohjeistuksen mukaan dokumentoida erikseen.

Ruotsissa rakennusten energiankulutusta on rajoitettu vuodesta 2006 lähtien määräämällä energiankulutukselle raja-arvoja. Suomessa vastaavaan kokonaisenergiankulutustarkasteluun siirryttiin vuonna 2012. Vuoden 2012 alusta voimaan tulleet uudet rakentamismääräykset (BBR 19 2011) rajoittavat asuinrakennusten ominaisenergiankulutusta ja vaipan keskimääräistä U-arvoa taulukoiden 2.2.1 ja 2.2.2 mukaisesti. Lisäksi määräyksissä on vastaavat raja-arvot muiden kuin asuinrakennusten energiankulutukselle ja vaipan keskimääräiselle U-arvolle. Alle 100 m² asuinrakennusten vaatimuksina voi vaihtoehtoisesti pitää taulukossa 2.1.2 esitetty U-arvotasoja.

Taulukoista 2.2.1 ja 2.2.2 nähdään, että Ruotsissa sähkölämmitteisille rakennuksille annetut raja-arvot eroavat muille rakennuksille annetuista arvioista. Suomen määräyksiä vastaavia energiamuotojen kertoimia ei Ruotsissa ole käytössä. Suomen määräyksistä poiketen Ruotsissa maa on myös jaettu kolmeen ilmastovyöhykkeeseen, joille kaikille on annettu

erilaiset ennalta määritetyt raja-arvot. Suomen rakentamismääräyskokoelman D3 (2012) mukaiset E-lukuvaatimukset on esitetty vertailun vuoksi taulukossa 2.2.3. On kuitenkin huomattava, että lukuarvot eivät ole sellaisenaan suoraan vertailtavissa edellä mainituista syistä ja koska Suomen määräyksistä poiketen Ruotsissa energiankulutukselle annetut raja-arvot eivät sisällä kuluttajalaitteiden ja valaistuksen sähkönkulutusta. Lisäksi laskentamenetelmät ja laskennan lähtöarvot (rakennuksen käyttö, lämpimän käyttöveden kulutus, lämpökuormien hyödyntämisaste) poikkeavat Suomen RakMK:n mukaisista ohjeista.

Huomionarvoista on myös se, että Ruotsissa ei ole annettu Suomen RakMK:n osan D5 kaltaisia ohjeita energiankulutuksen laskemiselle, vaan energialaskennan toteutustapa on suunnittelijan päätettävissä. Tämä on mahdollistanut energialaskennan kehittymisen, mutta myös aiheuttanut selviä eroavaisuuksia laskentatuloksissa. Ruotsin rakentamismääräyksissä toisaalta todetaan, että rakennuksen energiankulutus on pystyttävä mittaamaan rakennuksen valmistuttua ja varmistamaan siten laskelmien paikkansapitävyys. Määräyksissä on myös ohjeistettu käyttämään laskelmissa varmuuskertoimia, jotta määräystenmukaiset energiankulutuksen raja-arvot toteutuisivat todellisuudessakin.

Taulukko 2.2.1 Asuinrakennusten energiankulutusvaatimukset Ruotsissa, kun lämmitysjärjestelmänä on muu kuin sähkölämmitys (BBR 19 2011).

Säävyöhyke	I	II	III
Rakennuksen ominaisenergiankulutus [kWh/m ²]	130	110	90
Vaipan keskimääräinen U-arvo [W/(m ² ·K)]	0,40	0,40	0,40

Taulukko 2.2.2 Asuinrakennusten energiankulutusvaatimukset Ruotsissa, kun lämmitysjärjestelmänä on sähkölämmitys (BBR 19 2011).

Säävyöhyke	I	II	III
Rakennuksen ominaisenergiankulutus [kWh/m ²]	95	75	55
Lämmitykseen käytetty sähköteho [kW]	5,5	5,0	4,5
+lisäteho kun $A_{temp} > 130 \text{ m}^2$	$0,035(A_{temp} - 130)$	$0,030(A_{temp} - 130)$	$0,025(A_{temp} - 130)$
Vaipan keskimääräinen U-arvo [W/(m ² ·K)]	0,40	0,40	0,40

Taulukko 2.2.3 Suomen asuinrakennusten E-lukuvaatimukset (RakMK D3 2012).

	Rakennustyyppi	Lämmitetty nettoala A_{netto} [m ²]	E-luku [kWh/(m ² a)]
Luokka 1	Pientalo	$A_{\text{netto}} < 120 \text{ m}^2$	204
		$120 \text{ m}^2 \leq A_{\text{netto}} \leq 150 \text{ m}^2$	$372 - 1,4 \cdot A_{\text{netto}}$
		$150 \text{ m}^2 \leq A_{\text{netto}} \leq 600 \text{ m}^2$	$173 - 0,07 \cdot A_{\text{netto}}$
		$A_{\text{netto}} > 600 \text{ m}^2$	130
Luokka 1	Hirsitalo	$A_{\text{netto}} < 120 \text{ m}^2$	229
		$120 \text{ m}^2 \leq A_{\text{netto}} \leq 150 \text{ m}^2$	$397 - 1,4 \cdot A_{\text{netto}}$
		$150 \text{ m}^2 \leq A_{\text{netto}} \leq 600 \text{ m}^2$	$198 - 0,07 \cdot A_{\text{netto}}$
		$A_{\text{netto}} > 600 \text{ m}^2$	155
	Rivi- ja ketjutalo		150
Luokka 2	Asuinkerrostalo		130
Luokka 3	Toimistorakennus		170
Luokka 4	Liikerakennus		240
Luokka 5	Majoitusliikerakennus		240
Luokka 6	Opetusrakennus ja päiväkoti		170
Luokka 7	Liikuntahalli pois lukien uima- ja jäähalli		170
Luokka 8	Sairaala		450
Luokka 9	Muut rakennukset ja määräaikaiset rakennukset		Ei vaatimusta

3 Rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmä

3.1 Yleistä

Rakenteiden lujuustarkasteluissa on jo kymmeniä vuosia ollut käytössä mitoitusten menetelmiä, joilla on määritetty rakenteiden kantavuus ja kestävyys myös ääriolosuhteissa, mutta rakennusfysiikan puolella vastaavanlaisia menetelmiä ei ole ollut käytössä. Lujuustarkasteluissa mitoitusten menetelmien perustana on se, että rakenteiden mekaniikka ja statiikka sekä erilaiset murtumismekanismit tunnetaan erittäin hyvin samoin kuin rakennusmateriaalien lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet. Rakenteet mitoitetaan myös aina kestäväksi maksimikuormitukset ja niiden yhteisvaikutukset, jotka tunnetaan myös hyvin. Lisäksi rakenteiden luotettava toiminta varmistetaan aina käyttämällä mitoituksessa varmuuskertoimia.

Rakenteiden rakennusfysikaalinen mitoitus edellyttää vastaavien asioiden hallintaa rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan osalta. On tunnettava lämpö- ja kosteusfysiikan teoria, rakenteiden toimintakriteerit/vaurioitumismekanismit, rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet sekä rakenteille syntyvät rasitukset ja niiden yhdistelmät ääriolosuhteissa, jotta rakenteiden toimintaa voidaan arvioida luotettavasti. Toisaalta osa rakenteiden toimintakriteereistä ovat sellaisia, että niiden aiheuttamia rasituksia on perustellumpaa tarkastella keskimääräisissä olosuhteissa kuin ääriolosuhteissa.

Rakennusfysikaaliset mitoitustarkastelut ovat kuitenkin yleensä huomattavasti monimutkaisempia ja vaikeampia toteuttaa kuin lujuustarkastelut. Lämpö ja kosteus siirtyvät rakenteissa monilla eri tavoilla (ks. luku 3.2.4), jolloin tarkasteluissa on otettava huomioon kaikki keskeiset siirtymismuodot ja niiden yhteisvaikutukset. Rakenteille on olemassa myös paljon enemmän erilaisia toimintakriteereitä kuin lujuustarkasteluissa (ks. luku 3.2.5). Materiaaleilla on useita rakennusfysikaalisia ominaisuuksia, jotka vaikuttavat merkittävästi niiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan (ks. luku 3.2.3), mutta yleensä kaikkia näitä ominaisuuksia ei ole edes määritetty materiaaleille. Rakenteille kohdistuu myös paljon erityyppisiä kosteusrasituksia sekä sisä- että ulkoilmasta (ks. luvut 3.2.1 ja 3.2.2), mutta näiden rasitusten vaikutuksia rakenteiden kosteustekniseen toimintaan ei ole tunnettu varsinkaan ulkoilman olosuhteiden osalta riittävän hyvin. Tämä koskee sekä yksittäisiä olosuhdetekijöitä että ennen kaikkea eri tekijöiden yhteisvaikutuksia. Suurimpana haasteena ulkoilman olosuhdetekijöiden vaikutusten arvioinnissa on niiden keskinäinen suuri ja epäsäännöllinen vaihtelu.

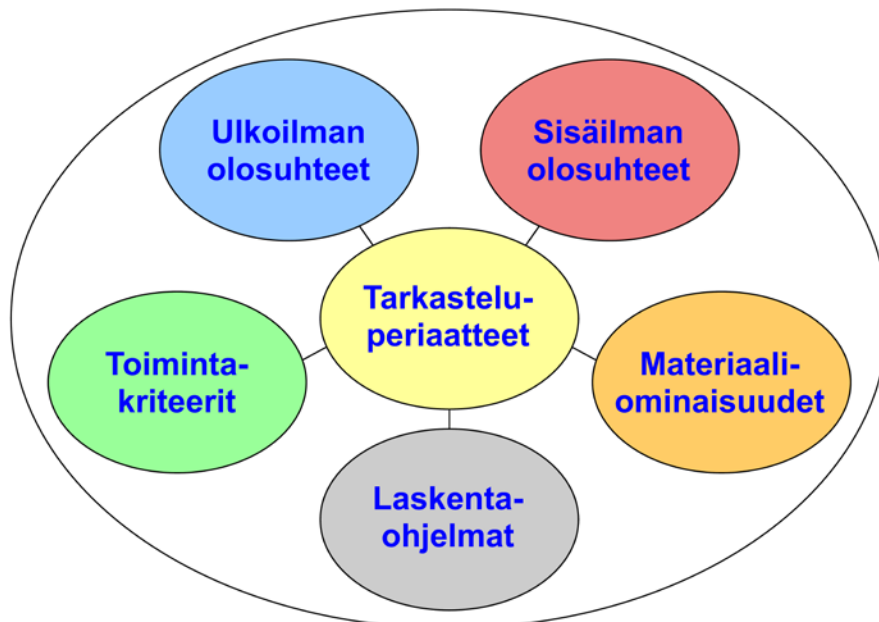
Tampereen teknillisessä yliopistossa on kehitetty yli kymmenen vuoden ajan rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmää, jossa on pyritty ottamaan kaikki edellä mainitut tekijät huomioon. Tavoitteena on ollut kehittää menetelmä, jolla voidaan arvioida

rakenteiden kosteusteknistä toimintaa eri olosuhteissa ja käyttää sitä apuna rakenteiden rakennusfysikaalisessa suunnittelussa ja mitoituksessa.

3.2 Analysointimenetelmän kuvaus

TTY:n kehittämässä analysointimenetelmässä rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä käyttäytymistä tarkastellaan laskennallisesti mitoittavissa sisä- ja ulkoilman olosuhteissa. Rakenteiden hyväksyttävää kosteusteknistä toimintaa arvioidaan erilaisten toimintakriteerien avulla. Laskentatarkasteluja varten valitaan sellaiset sisä- ja ulkoilman olosuhteet, jotka synnyttävät rakenteeseen kriittiset olosuhteet valitun toimintakriteerin osalta. Toimintakriteerin tulee olla sellainen, että lämpö- ja kosteusolosuhteiden ja niissä tapahtuvien muutosten vaikutukset valittuun kriteeriin voidaan kuvata matemaattisten kaavojen avulla.

Analysointimenetelmän rakenne ja osat on esitetty kuvassa 3.2.1.



Kuva 3.2.1 Periaatekuva laskennallisissa tarkasteluissa käytetystä rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmästä ja sen osista.

TTY:n analysointimenetelmä koostuu seuraavista osista:

- ulkoilman olosuhteet
- sisäilman olosuhteet
- materiaaliominaisuudet
- laskentaohjelmat
- toimintakriteerit
- tarkasteluperiaatteet

Seuraavissa luvuissa on käsitelty tarkemmin näitä osia.

FRAME-tutkimuksessa saatiin valmiiksi analysointimenetelmän viimeinen keskeinen osa-alue; ulkoilman rakennusfysikaaliset testivuodet, jotta menetelmää voitiin käyttää rakenteiden laskennallisessa mallinnuksessa. Menetelmän käyttöönotto on kuitenkin edellyttänyt myös sitä, että muita siihen liittyviä osia on tutkittu riittävästi jo useissa aikaisemmissa tutkimuksissa runsaan kymmenen vuoden aikana. Tässä tutkimuksessa esitettyjen laskentatulosten taustalla on siis suuri määrä pitkäjänteistä tutkimustyötä.

Menetelmässä on yhä monia kehitystarpeita, joiden avulla laskentatulosten tarkkuutta voidaan tulevaisuudessa parantaa entisestään. Sen avulla voidaan kuitenkin jo nyt saada huomattavasti aiempaa tarkempia tutkimustuloksia siitä, kuinka paljon rakenteiden kosteustekninen toiminta muuttuu eri osatekijöitä muutettaessa. Tällä on suuri merkitys suunniteltaessa jatkossa sekä uusia rakenteita että vanhojen rakenteiden korjausta.

3.2.1 Ulkoilman olosuhteet

Ulkoilman olosuhteiksi tulee valita rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta kriittiset olosuhteet, joita kuvataan erilaisten testivuosien avulla. Testivuosi voi olla todellinen vuosi tai se voi olla synteettinen vuosi, joka on luotu sovittamalla yhteen kriittisiä ajanjaksoja eri vuosilta. Valittava testivuosi riippuu niistä toimintakriteereistä, joita rakenteen toiminnalle asetetaan. Lähtökohtaisesti kullekin toimintakriteerille voidaan joutua valitsemaan oma testivuosi tai useampia testivuosia.

Rakennusfysikaalisissa laskentatarkasteluissa on aikaisemmin käytetty testivuotena esimerkiksi rakennusten energiankulutuksen määrittämiseen käytettyä testivuotta, jotakin muuta keskimääräisiä olosuhteita kuvaavaa vuotta tai satunnaista vuotta. Tästä johtuen valtaosa rakennusfysikaalisista tarkasteluista on tähän mennessä tehty olosuhteissa, jotka eivät ole edustaneet rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kanalta kriittisiä ulkoilman olosuhteita. Tämä johtuu mm. siitä, että tällaisten testivuosien määrittämiseen ei ole olemassa yleisesti hyväksytyjä menetelmiä vastaavalla tavalla kuin esimerkiksi energianlaskennan testivuoden määrittämiseen (SFS EN ISO 15927-4 2005). Lisäksi on erittäin haasteellista etsiä rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta mitoitettavaa vuotta, koska yleensä kaikki ulkoilman olosuhdetekijät ja niiden yhdistelmät vaikuttavat vuoden kriittisyytasoon (ks. luku 4).

Yhtenä FRAME-projektin keskeisenä tavoitteena oli määrittää vaipparakenteille mitoitettavia testivuosia sekä nykyisessä ilmastossa että tulevaisuudessa vuosien 2050 ja 2100 ilmastoissa. Testivuosien määrittämistä on kuvattu tarkemmin luvussa 4. Tutkimusosion lopputuloksena rakenteille määritettiin kaksi testivuotta nykyilmastossa: Jokioinen 2004 ja Vantaa 2007. Vastaavat vuodet valittiin testivuosiksi myös tulevaisuuden ilmastossa: Jokioinen 2050 ja Vantaa 2050 sekä Jokioinen 2100 ja Vantaa 2100. Nämä testivuodet osoittautuivat kriittisiksi silloin, kun rakenteiden toimintakriteereiksi valittiin tässä tutkimuksessa käytetyt homeen kasvu ja kosteuden kondensoituminen rakenteen sisällä.

Jokioisen testivuosiä käytetään mitoittavana vuotena niille vaipparakenteille, joiden kosteustekniseen toimintaan vaikuttaa ulkoilman kosteusolosuhteista lähinnä suhteellinen kosteus. Vantaan testivuosiä käytetään puolestaan vaipparakenteissa, joiden sisäosan kosteustekniseen toimintaan vaikuttaa RH:n lisäksi myös sade/ viistosade. Jokioisen testivuosiä käytettäessä seinärakenteiden tarkasteltava ilmansuunta on pohjoinen, jossa auringonsäteilyn lämmittävä ja kuivattava vaikutus on vähäisin. Vantaan testivuosiä käytettäessä tarkasteltava ilmansuunta on puolestaan etelä, koska siellä viistosade on voimakkainta ja myös auringonsäteily voimistaa ulkoverhoukseen sitoutuneen kosteuden siirtymistä rakenteen sisäosiin diffuusiolla. Taulukossa 3.2.1 on esitetty esimerkkejä eri vaipparakenteista ja niiden kosteusteknisissä tarkasteluissa käytettävistä ulkoilman testivuosiästä.

Taulukko 3.2.1 Esimerkkejä eri vaipparakenteiden kosteusteknisissä tarkasteluissa käytettävistä rakennusfysikaalisista testivuosiästä ja ilmansuunnista.

Rakennetyypit	Testivuosi		
	Nykyilmasto	2050 ilmasto	2100 ilmasto
Rakenteet, joissa ulkoilman suhteellinen kosteus vaikuttaa niiden sisäosan kosteustekniseen toimintaan. <u>Esimerkkirakenteita:</u> - puu- ja metalliverhotut ulkoseinät - betonisandwich-rakenteet ¹ - harkkorakenteet ¹ - sisäpuolelta eristetyt massiivirakenteet - yläpohjat, joissa on vesikate - ryömintätilaiset alapohjat	<i>Jokioinen 2004</i> ilmansuunta seinärakente-tarkasteluissa: <i>pohjoinen</i> ²	<i>Jokioinen 2050</i> ilmansuunta seinärakente-tarkasteluissa: <i>pohjoinen</i> ²	<i>Jokioinen 2100</i> ilmansuunta seinärakente-tarkasteluissa: <i>pohjoinen</i> ²
Rakenteet, joissa sade ja ulkoilman suhteellinen kosteus vaikuttavat niiden sisäosan kosteustekniseen toimintaan <u>Esimerkkirakenteita:</u> - tiiliverhotut ulkoseinät - eristerapatut ulkoseinät - betonisandwich-rakenteet ¹ - harkkorakenteet ¹ - käännetyt katot	<i>Vantaa 2007</i> ilmansuunta seinärakente-tarkasteluissa: <i>etelä</i>	<i>Vantaa 2050</i> ilmansuunta seinärakente-tarkasteluissa: <i>etelä</i>	<i>Vantaa 2100</i> ilmansuunta seinärakente-tarkasteluissa: <i>etelä</i>

¹ Rakenteesta riippuen kumpi tahansa testivuosiästä voi olla kriittisempi. Rakenteen toiminta on syytä tarkistaa kummallakin testivuodella.

² Rakenteen ulkopinnan kosteusteknistä toimintaa tarkasteltaessa kriittisin ilmansuunta voi olla myös joku muu kuin pohjoinen (ks. luku 4.5.3).

Osa vaipparakenteista on sellaisia, että sade vaikuttaa jossain määrin niiden kosteustekniseen toimintaan, mutta vaikutus ei ole kovin suuri. Tällaisia rakenteita tarkasteltaessa on tarpeellista tutkia niiden käyttäytymistä kummankin testivuoden avulla, jotta saadaan selville, kumpi niistä on rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta kriittisempi. Hyvä esimerkki tällaisesta rakenteesta on betoniulkokuorella varustettu seinärakenne. Betoniseen ulkokuoreen sitoutuu pinnoitteesta riippuen jonkin verran sadevettä, mutta se siirtyy rakenteen sisään kuitenkin suhteellisen hitaasti, koska betonin vesihöyrynläpäisevyys on yleensä pieni ja kapillaarinen siirtyminenkin on melko vähäistä.

Testivuosien käytössä huomioon otettavia asioita

Edellä mainittujen rakennusfysikaalisten testivuosien käytössä tulee ottaa huomioon mm. seuraavat asiat:

- Testivuodet eivät ole yleensä rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kanalta kaikkein kriittisimpiä. Joissakin tapauksissa ero kriittisimmän vuoden synnyttämiin olosuhteisiin rakenteen sisällä voi olla merkittävä.
- Testivuosien valinnassa ei ole otettu huomioon rakenteen ulkopinnasta taivaalle lähtevän lämpösäteilyn vaikutusta, koska siihen liittyvää mittaustietoa oli saatavilla vain osalle lähtöaineistona käytetyistä vuosista ja toisaalta säteilyarvojen määrittämiseen liittyi merkittäviä epävarmuustekijöitä (ks. luvut 4.3 ja 6.6).
- Testivuosi kuvaa sellaisia ulkoilman olosuhteita, jotka vaikuttavat avonaisella tasaisella paikalla sijaitsevaan rakennukseen. Rakennuksen ympärillä oleva mikroilmasto voi kuitenkin synnyttää huomattavasti kriittisemmät olosuhteet tiettyihin ulkovaipan kohtiin. Laskentaohjelmissa voidaan ottaa huomioon osa mikroilmastoon vaikuttavista tekijöistä.
- Tutkimuksessa määritetyt testivuodet eivät välttämättä ole kovin kriittisiä niissä rakenteissa, joissa ulkoilman kosteusolosuhteet eivät vaikuta rakenteen toimintaan lainkaan tai vaikutus on vähäinen (ks. luku 4.5.3). Tällaisia rakenteita ovat mm. teräsohutlevy-sandwichrakenteet ja vähän tuulettuvat ja tuulettumattomat kattorakenteet, joiden yläpinnassa on tiivis vesikate. Näiden rakenteiden osalta ei ollut kuitenkaan löydettävissä yhtä testivuotta, joka olisi synnyttänyt rakenteisiin kriittiset kosteusolosuhteet useissa eri tilanteissa. Toisaalta nämä rakenteet edustavat myös suhteellisen pientä osaa kaikista rakenteista, joten niille ei tässä tutkimuksessa määritetty erillistä testivuotta myöskään tästä syystä.

Edellä mainituista tekijöistä johtuen rakenteet on suositeltavaa suunnitella siten, että testivuosilla tehdyissä laskentatarkasteluissa homeen kasvulle tai kosteuden kondensoitumiselle valitut raja-arvot alitetaan rakenteen kriittisissä kohdissa selvästi.

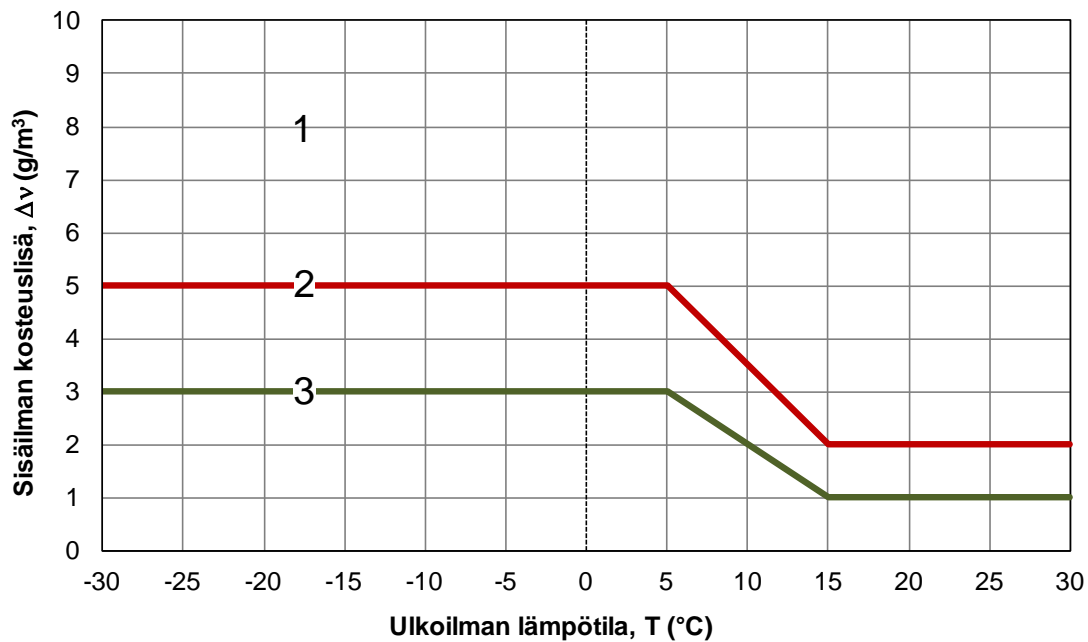
3.2.2 Sisäilman olosuhteet

Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa keskeiset sisäilman olosuhteet ovat sisäilman vesihöyrypitoisuus (tai kosteuslisä ulkoilmaan) sekä sisäilman lämpötila. Märkätiloissa rakenteiden toiminnassa tulee ottaa huomioon myös pesuvesien rakenteille muodostama kosteusrasitus. Tässä tutkimuksessa keskityttiin kuivien tilojen rakenteisiin, jolloin tarkasteltaviksi sisäilman olosuhteiksi valittiin sisäilman kosteuslisä ja lämpötila.

Rakennusten käyttöön ja asumiseen liittyvät eri toiminnot tuottavat sisäilmaan lähes aina lisäkosteutta, joka synnyttää vesihöyrypitoisuseron sisä- ja ulkoilman välille. Sisäilman kosteuslisä kertoo, kuinka paljon sisäilman vesihöyrypitoisuus on suurempi kuin ulkoilmassa. Vesihöyrypitoisusero (kg/m^3 tai g/m^3) voidaan esittää vaihtoehtoisesti myös vesihöyryn

osapaine-erona (Pa). Kesällä sisäilman kosteuslisä on pienempi, koska rakennusten käyttäjät ja asukkaat ovat enemmän poissa sisätiloista ja ovia ja ikkunoita pidetään enemmän auki. (RIL 107 2012)

TTY teki yhteistyössä Teknillisen korkeakoulun (TKK) kanssa vuosina 2002–2008 kaksi laajaa tutkimusta suomalaisissa asuinrakennuksissa, joissa tutkittiin mm. sisäilman lämpötila- ja kosteusolosuhteita pitkäaikaisilla seurantamittauksilla (Vinha et al. 2005a ja Vinha et al. 2009). Näiden tutkimusten pohjalta nykyiseen RIL 107:ään (2012) on määritetty sisäilman kosteuslisän ja lämpötilan mitoitusarvot erityyppisissä rakennuksissa käyttöolosuhteissa Suomessa (kuva 3.2.2 ja taulukko 3.2.2). RIL 107:ssä (2012) on esitetty muutenkin sisäilman olosuhteiden valintaan liittyvää ohjeistusta, joka on ollut lähtökohtana myös tässä tutkimuksessa.



Kuva 3.2.2 Sisäilman kosteuslisän mitoitusarvot eri kosteusluokissa ulkolämpötilan funktiona (RIL 107 2012).

Taulukko 3.2.2 Sisäilman kosteuslisän perusteella määritettyihin kosteusluokkiin kuuluvat rakennustyypit (RIL 107 2012).

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

¹ Kosteusluokan 1 rakennuskohteissa sisäilman kosteuslisä ja lämpötila on aina arvioitava kohdekohtaisesti erikseen mitoituksen yhteydessä. Kosteuslisä voi vaihdella rakennuksen käyttötarkoituksesta riippuen välillä 6–20 g/m³.

² Kosteusluokan 3 rakennuskohteissa kosteustekninen mitoitus tehdään käyttäen talvella kosteuslisän arvoa 3 g/m³, ellei voida luotettavasti osoittaa, että pienempikin kosteuslisä riittää tarkasteltavassa kohteessa.

³ Eri rakennustyyppisiin kuuluvia rakennuksia on lueteltu tarkemmin RakMK D3:ssa (2012).

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

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

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

Sisäilman kosteuslisälle on olemassa myös kansainvälisen SFS-EN ISO 13788 (2013) standardin mukainen luokitus, mutta se poikkeaa RIL 107:ssä (2012) annetuista arvoista mm. eri rakennustyypeille määritettyjen kosteuslisien sekä kosteusluokkien lukumäärän osalta. Lisäksi kuvan 3.2.2 mukaisessa luokituksessa kosteusluokan 1 rakennuksissa sisäilman kosteuslisä on arvioitava aina tapauskohtaisesti erikseen ja tarkastelu on tehtävä sekä kesä- että talviolosuhteissa. Standardissa SFS-EN ISO 13788 (2013) annetaan sen sijaan kaikille rakennuksille jokin mitoitussarvo (korkeimmassa kosteuslisäluokassa $\Delta v = 10 \text{ g/m}^3$ talviolosuhteissa) ja kesän kosteuslisäarvon oletetaan olevan kaikissa tapauksissa alhainen (korkeimmassa kosteuslisäluokassa $\Delta v < 2 \text{ g/m}^3$ kesäolosuhteissa). Tosin standardissakin kehoitetaan käyttämään suurimman kosteuslisäluokan rakennuksissa tarkempaa mittaustietoa, jos se vain on mahdollista.

Jos suunnitellaan rakennusta, jota ei ole mainittu taulukossa 3.2.2, on arvioitava, mitä taulukossa esitettyä rakennustyyppiä tarkasteltava rakennus vastaa sisäilman olosuhteiden osalta parhaiten ja valittava rakennuksen kosteusluokka sen mukaisesti. Epävarmoissa tapauksissa on suositeltavaa valita suuremman sisäilman kosteuslisän mitoitussarvon mukainen kosteusluokka. (RIL 107 2012)

Niissä rakennuksissa, joissa sisälämpötilana pyritään pitämään normaalia huonelämpötilaa, on laskennallisissa tarkasteluissa suositeltavaa käyttää sisäilman lämpötilana 21 °C ympäri vuoden, jotta tarkastelussa otetaan huomioon myös sisätilan jäähtymisen vaikutus kesäaikana. Muissa rakennuksissa on laskelmissa käytettävä sisäilman lämpötila arvioitava tapauskohtaisesti erikseen. (RIL 107 2012)

Rakennusaikaisissa olosuhteissa sisäilman kosteuslisä voi olla pitkiä aikoja suurempi kuin kuvassa 3.2.2 ja taulukossa 3.2.2 esitetyt arvot riippuen kosteutta tuottavien rakennusvaiheiden (esim. betonivalut ja muuraustyöt) tuomasta lisäkosteudesta ja rakennustyömaan kosteudenhallinnasta (esim. ilmanvaihto, kuivaimet ja suojaukset). Rakennustyömaan kosteudenhallinnan tulisi olla sillä tasolla, että sisäilman kosteuslisä ylittäisi vain lyhytaikaisesti kuvassa 3.2.2 ja taulukossa 3.2.2 esitetyt arvot. Tarvittaessa rakennusaikaisen kosteuslisän vaikutus on otettava vaipparakenteiden höyrinsulun mitoituksessa erikseen huomioon. Myös rakenteiden kuivumisaikojen laskennallisessa määrittämisessä on tarvittaessa käytettävä korkeampia kosteuslisän arvoja kuin kuvassa 3.2.2 ja taulukossa 3.2.2 esitetyt arvot. Tarkasteluissa on lisäksi otettava huomioon myös normaalista huonelämpötilasta poikkeavat sisälämpötilat. (RIL 107 2012)

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin tavanomaisia rakennuksia, jolloin tarkasteluihin valittiin kosteusluokan 2 mukaiset sisäilman kosteuslisän mitoitusarvot käyttöolosuhteissa. Sisälämpötila oli kaikissa tarkasteluissa 21 °C. Myös rakenteiden kuivumistarkasteluissa käytettiin samoja sisäilman olosuhteita.

3.2.3 Materiaaliominaisuudet

Rakennusfysikaalisten materiaaliominaisuuksien tunteminen on tärkeää, jotta laskentatulokset vastaavat riittävällä tarkkuudella rakenteen todellista toimintaa. Keskeisimmät materiaaliominaisuudet ovat:

- lämmönjohtavuus
- ominaislämpökapasiteetti
- ilmanläpäisevyys
- vesihöyrynläpäisevyys
- kosteudenläpäisevyys/ kosteusdiffusiviteetti
- tasapainokosteus
- pinnan emissiviteetti/ absorptiokerroin

Materiaaliominaisuudet vaihtelevat tuotteiden valmistuksesta ja raaka-aineiden vaihteluista johtuen aina jonkin verran. Materiaalien rakennetta ja koostumusta muutetaan usein myös tuotekehityksen tuloksena. Lisäksi materiaaliominaisuudet vaihtelevat tiheyden, lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mukaan. Samankin materiaalinimikkeen alla olevien materiaalien ominaisuudet voivat erota merkittävästi toisistaan.

Tästä syystä laskennassa tulisi käyttää mahdollisimman paljon kyseisessä maassa käytettävien rakennusmateriaalien ominaisuuksia. Materiaaliominaisuuksien tulisi olla lisäksi määritetty lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona, koska materiaalitiedot on jo nykyisin mahdollista syöttää laskentaohjelmiin tässä muodossa.

TTY:llä on määritetty Suomessa käytettävien rakennusmateriaalien rakennusfysikaalisia ominaisuuksia lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona jo yli kymmenen vuoden ajan. Laajin tutkimus tältä aihealueelta on tehty v. 2000–2005, jolloin määritettiin kaikkiaan n. 40 materiaalin keskeisimpiä ominaisuuksia (Vinha et al. 2005b). Tämän jälkeenkin ominaisuuksia on määritetty erilaisten tutkimuksien yhteydessä. Näiden materiaaliominaisuuksien määrittäminen on ollut yksi tärkeä peruste sille, että tässä tutkimuksessa on kyetty tarkastelemaan rakenteiden toimintaa laskennallisesti.

Materiaaliominaisuuksien riittävä tarkkuus tulee varmistaa vertailemalla niillä toteutettujen rakenteiden todellista lämpö- ja kosteusteknistä käyttäytymistä vastaavilla rakenteilla ja samoissa olosuhteissa tehtyyn laskennalliseen mallinnukseen. Tämä on yksi osa laskentaohjelmien verifiointia, jota on käsitelty tarkemmin luvussa 5 ja lisäksi myös luvuissa 6 ja 7. Myös tätä työtä on tehty TTY:llä jo yli kymmenen vuoden ajan. Keskeisenä vertailuaineistona on ollut puurunkoisilla ulkoseinärakenteilla tehdyt laboratoriokokeet (Vinha 2007; Vinha & Käkälä 2006). Tämän lisäksi laskennallista vertailua on tehty kenttätutkimuksissa saadun mittausdatan kanssa (Vinha et al. 2001). Tässä tutkimuksessa tehtiin myös lisää laboratorio- ja kenttämittauksia, joista saatua mittausdataa verrattiin laskennallisiin tuloksiin.

Aikaisemmin tehdyissä vertailulaskelmissa on todettu, että varsinkin kosteuden kapillaarisen siirtymisen tarkka mittaaminen hygroskooppisilla materiaaleilla on hyvin tärkeää, jotta laskentatulokset vastaisivat mitattuja tuloksia riittävän hyvin (Kalamees & Vinha 2003). Tämä on havaittu myös monissa ulkomaisissa tutkimuksissa (mm. Kunzel 1995 ja Grunewald et al. 2003). Materiaalien kapillaarisuusominaisuuksien tarkka mittaaminen on kuitenkin haasteellista, joten tähän asiaan on kiinnitettävä jatkossa erityistä huomiota.

3.2.4 Laskentaohjelmat

Rakennusfysikaaliset laskentaohjelmat eroavat merkittävästi toisistaan, vaikka lämmön- ja kosteudensiirron teorit ovatkin niissä pääpiirteittäin samanlaiset. Laskentaohjelmissa esiintyy mm seuraavia eroja:

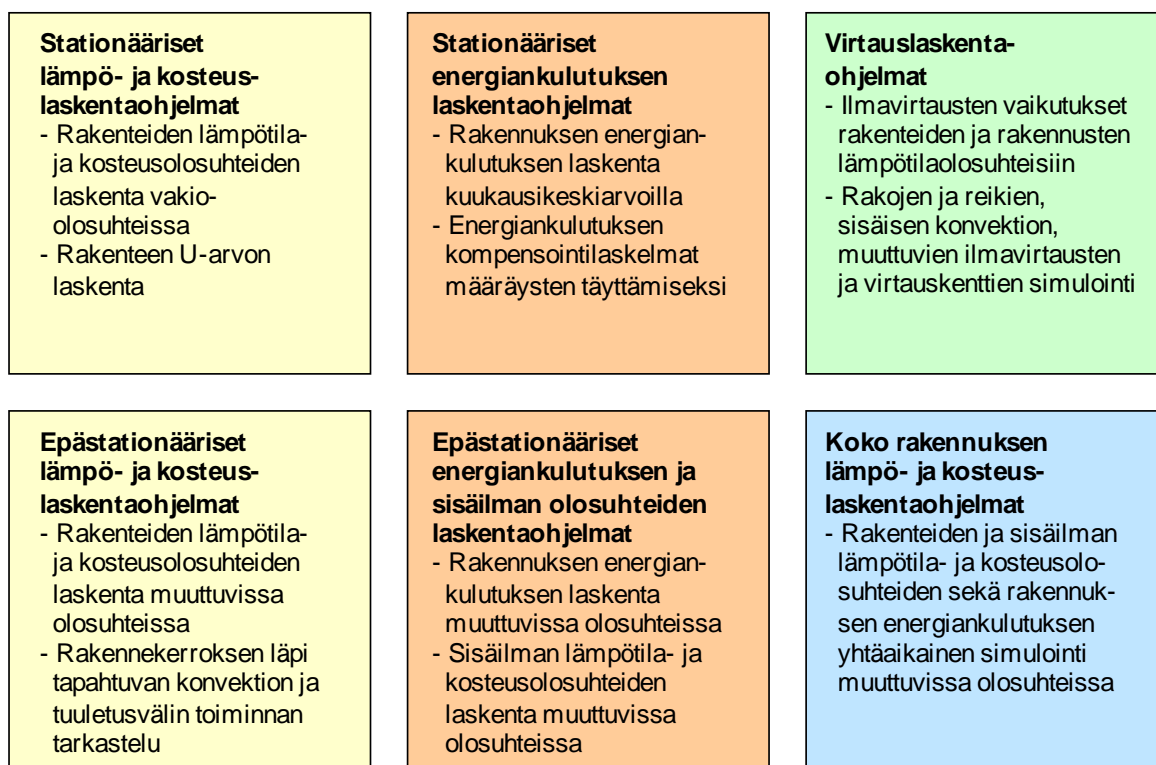
- ohjelmat ovat joko stationäärisiä tai epästationäärisiä (dynaamisia)
- ohjelmissa otetaan huomioon eri lämmön ja kosteuden siirtymismuotoja
- ohjelmissa otetaan huomioon eri ulkoilman olosuhdetekijöitä
- materiaaliominaisuudet syötetään ohjelmiin joko vakioarvoina tai lämpötilan ja/tai suhteellisen kosteuden funktiona
- ohjelmat voivat olla 1D-, 2D- tai 3D-ohjelmia

- laskentatarkasteluja voidaan tehdä yksittäisissä rakennusosissa tai koko rakennuksessa
- rakenteet ja niiden kerrokset voidaan mallintaa ohjelmiin eri tarkkuuksilla
- ohjelmista saatavat tulostustiedot vaihtelevat
- ohjelmien käytettävyys ja vaadittava laskentateho vaihtelevat suuresti

Edellä olevasta listasta nähdään, että laskentaohjelmien ominaisuudet on tunnettava erittäin hyvin, jotta kuhunkin laskentatapaukseen osataan valita siihen sopivin ohjelma ja tiedetään miten laskenta tapahtuu eri tilanteissa. Tämä edellyttää paljon kokemuksia ohjelman käytöstä. Ohjelmien laskentatuloksia on lisäksi verrattava mitattuihin koetuloksiin, jotta saadaan selville, mitkä tekijät vaikuttavat laskenta- ja koetulosten välisiin eroihin. Laskentaohjelmista aiheutuvia virheitä on tarkasteltu lähemmin luvussa (5.3).

Laskentaohjelman lisäksi laskenta- ja koetulosten välisiin eroihin vaikuttaa myös käytettyjen materiaaliominaisuuksien tarkkuus. Kenttäkokeissa mittaustuloksiin vaikuttaa myös rakennuksen ympärillä vallitseva mikroilmasto, joka voi poiketa oleellisesti esimerkiksi läheisellä säähavaintoasemalla mitatuista olosuhteista (ks. luku 4).

Rakennusfysikaaliset laskentaohjelmat voidaan luokitella kuuteen eri ryhmään, jotka on esitetty kuvassa 3.2.3.



Kuva 3.2.3 Laskentaohjelmien jako eri ryhmiin niiden toiminnan perusteella.

Tässä tutkimuksessa käytettiin laskennassa WUFI- ja Delphin-ohjelmia (epästationäärisen lämmön- ja kosteudensiirron laskenta), IDA-ICE-ohjelmaa (epästationäärisen energiankulutuksen laskenta) sekä Comsol Multiphysics -ohjelmaa (virtauslaskenta ja

epästationäärisen lämmönsiirron laskenta). WUFI- ja Delphin-ohjelmien laskentatulosten verifiointia on käsitelty tarkemmin luvussa 5. Comsol Multiphysics-ohjelman laskentatuloksia on puolestaan verifioitu ulkoseinärakenteiden sisäisen konvektion koetuloksien avulla luvussa 7.3.

3.2.5 Toimintakriteerit

Rakenteiden tai koko rakennuksen rakennusfysikaaliselle toiminnalle voidaan asettaa useita erilaisia toimintakriteerejä. Rakennusfysikaalisia toimintakriteerejä ovat esimerkiksi seuraavat asiat:

- kosteuden kondensoituminen
- homeen ja mikrobien kasvu
- puun lahoaminen
- hyönteisvauriot
- materiaalien emissiot (VOC)
- värimuutokset
- rapautuminen ja halkeilu
- maalipinnan hilseily
- liimojen ja maalien tartunnan pettäminen
- betonin karbonatisoituminen ja raudotteiden korroosio
- metalliosien korroosio
- materiaalien tai rakenteen lujuus
- muodonmuutokset ja painuminen
- maapohjan routiminen
- ikkunoiden huurtuminen
- haitallisten aineiden, hajujen tai mikrobien kulkeutuminen ulkoa tai maaperästä sisäilmaan
- vedon tunne
- sisäpintojen lämpötilat
- sisäilman lämpötilaolosuhteet
- sisäilman kosteusolosuhteet
- energiankulutus

Edellä mainittujen toimintakriteerien osalta eri ulkoilman olosuhdetekijät synnyttävät kriittisiä olosuhteita tai ilmiöitä rakenteisiin tai koko rakennukseen. Lähes kaikkien toimintakriteerien osalta ulkoilman olosuhteiden kriittisyyteen vaikuttaa lisäksi useat olosuhdetekijät ja niiden keskinäinen vaihtelu. Tästä johtuen kukin toimintakriteeri voi edellyttää yhden tai useamman ulkoilman testivuoden määrittämistä, joka on kriittinen juuri tarkasteltavan kriteerin kannalta. Taulukossa 3.2.3 on esitetty esimerkkinä joidenkin toimintakriteerien osalta kriittisten testivuosien valintaperusteita. Näille toimintakriteereille on tyypillistä se, että ne voivat aiheuttaa kriteerin kuvaaman ilmiön tai vaurion jo yhden vuoden kuluessa.

Taulukko 3.2.3 *Kriittisten testivuosien valintaperusteita erilaisille rakenteiden toimintakriteereille.*

Toimintakriteeri	Testivuosien valintaperusteita
kosteuden kondensoituminen	korkea RH, sateinen sää, nopeat lämpötilavaihtelut, alhainen lämpötila
homeen ja mikrobin kasvu, laho	lämmin ja kostea sää
liimojen tartunnan pettäminen	korkea RH, jäätyminen ja sulaminen
metalliosien korrosio	korkea RH, lämmin ja kostea sää, sateinen sää
kosteusmuodonmuutokset	RH:n suuri vaihtelu
lämpötilamuodonmuutokset	lämpötilan suuri vaihtelu
vedon tunne	tuulinen ja kylmä sää
ikkunoiden huurtuminen	vähäinen pilvisuus, korkea RH, nopeat lämpötilavaihtelut
materiaalien emissiot, VOC	korkea RH, sateinen sää

Vaikka rakenteille voidaan asettaa useita erilaisia toimintakriteereitä, voidaan niiden määrää käytännössä kuitenkin vähentää siksi, että rakenteen toimiessa hyväksyttävällä tavalla jonkun toimintakriteerin suhteen, se usein toimii hyväksyttävästi myös monen muun kriteerin kannalta. Esimerkiksi jos tarkastelukriteeriksi valitaan homeen kasvu ja rakenne toimii tässä suhteessa hyväksyttävästi, liiallisesta kosteudesta ei ole vaaraa myöskään puun lahoamisen ja rakenteiden lujuuden osalta. Lisäksi riskit vähenevät oleellisesti esimerkiksi kosteusmuodonmuutosten, materiaaliemissioiden ja liimojen tartunnan pettämisestä osalta.

Osa toimintakriteereistä ovat sellaisia, että niiden aiheuttamia vaikutuksia on perustellumpaa tarkastella keskimääräisissä olosuhteissa kuin ääriolosuhteissa. Näissä tapauksissa toimintakriteerin kuvaama ilmiö kehittyy vaurioksi hitaasti useiden vuosien kuluessa. Tällöin oleellista ei ole yksittäisen vuoden aiheuttama rasitus, vaan pitkäaikainen ulkoilman olosuhteiden synnyttämä vaikutus. Tällaisia toimintakriteerejä ovat esimerkiksi raudotteiden korrosio, pinnan rapautuminen, värimuutokset ja maalipinnan hilseily.

Toimintakriteerin käytön edellytys laskennallisessa mallinnuksessa on se, että lämpö- ja kosteusolosuhteiden ja niissä tapahtuvien muutosten vaikutukset valittuun kriteeriin voidaan kuvata jonkin vertailusuureen ja siihen liittyvien matemaattisten kaavojen avulla.

Vain hyvin harvan toimintakriteerin osalta on olemassa käyttökelpoisia laskentamalleja ja vertailusuureita, joilla voidaan luotettavasti arvioida, kuinka sisä- ja ulkoilman olosuhteet ja niiden vaihtelu vaikuttavat toimintakriteerin kuvaamaan ilmiöön tai vaurioitumistapaan rakenteessa. Homeen kasvulle tällainen malli on olemassa ja sitä on kehitetty VTT:n ja TTY:n toimesta (VTT–TTY homemalli). Siksi homeen kasvu valittiin rakenteiden toimintakriteeriksi myös tässä tutkimuksessa. Toinen valittu toimintakriteeri oli kosteuden kondensoituminen. Näitä toimintakriteerejä on tarkasteltu tarkemmin jäljempänä.

Betonirakenteiden tarkasteluissa käytettiin tässä tutkimuksessa toimintakriteereinä myös raudotteiden korrosiota sekä betonin pakkasrapautumista. Näihin tekijöihin liittyvät rakenteiden tarkastelut toteutettiin eri tavalla kuin muut laskennalliset tarkastelut. Kuten edellä todettiin, näiden toimintakriteerien tarkastelua varten ei ole perusteltua määrittää

testivuotia, vaan ilmastodatan perusteella tarkasteltiin näiden vaurioiden kehittymistä ajan kuluessa. Tehtyjä tarkasteluja on kuvattu tarkemmin luvussa 4.6.

Kosteuden kondensoituminen

Kosteuden kondensoituminen on sinänsä ilmiönä hyvin tunnettu ja sitä voidaan tarkastella laskennallisesti tietyin edellytyksin. Nykyiset laskentaohjelmat tosin eivät kuvaa kondensoitumisilmiötä oikealla tavalla kaikissa olosuhteissa. Laskentaohjelmissa vesi on sitoutuneena aina materiaaleihin (tai ilmaan), jolloin esimerkiksi kondensoituminen tietyssä materiaalikerrosten välisessä rajapinnassa havaitaan siten, että rajapinnan lähellä materiaalikerrosten kosteuspitoisuus nousee yli hygroskooppisen alueen. Tämä vastaa todellista tilannetta silloin, kun rajapinnassa olevat materiaalit ovat kapillaarisia ja tiiviissä kontaktissa toisiinsa ja lämpötila on yli 0 °C. Laskentaohjelmissa kapillaarinen kosteudensiirto toimii kapillaarisilla materiaaleilla kuitenkin kaikissa lämpötiloissa ja rakenteessa ei tapahdu jäätymisilmiötä, vaikka lämpötila laskee alle 0 °C.

Todellisessa tilanteessa kosteutta tiivistyy kuitenkin usein materiaalikerrosten välisiin rajapintoihin joko vedeksi tai jääksi lämpötilasta, materiaalien ominaisuuksista ja niiden välisestä kontaktista riippuen. Pintaan tiivistyvä kosteus voi puolestaan valua herkästi painovoimaisesti rakenteen alaosiin ja synnyttää sinne kosteuskertymiä. Tätä ilmiötä ei voida mallintaa nykyisissä laskentaohjelmissa siksi, että niissä vesi ei kerry materiaalien rajapintoihin ja toisaalta siksi, että ohjelmissa ei ole tyypillisesti mukana kosteuden painovoimaista siirtymistä.

Kosteuden kondensoitumisella on myös monia muita haittavaikutuksia, kuten puupohjaisten materiaalien lujuuden ja jäykkyyden heikkeneminen, lämmöneristeiden ja tuulensuojalevyjen muodonmuutoksien lisääntyminen (aiheuttaen mm. lisääntyneitä ilmavuotoja rakenteeseen), lämmöneristeiden lämmönjohtavuuden kasvu, metalliosien korroosion lisääntyminen ja naulojen höltyminen puurakenteissa (Vinha 2007).

Edellä kuvatuista syistä johtuen kosteuden kondensoitumista materiaalien rajapinnoissa on rajoitettava, vaikka laskennassa kosteus pystyisikin kuivumaan pois rakenteesta haittaa aiheuttamatta. Laskentaa voidaan kuitenkin tässä mielessä hyödyntää tarkastelemalla eri rajapintoihin kondensoituvan kosteuden kokonaismäärää tai yhtäjaksoista kondensoitumisaikaa.

Laskentateknisesti yhtäjaksoisen kondensoitumisajan määrittäminen on laskentatuloksista yleensä helpompaa, koska se on nähtävissä suoraan tarkastelupisteiden huokosilman suhteellisen kosteuden tai kosteuspitoisuuden arvoista. Materiaalien väliseen rajapintaan kondensoituneen kosteuden kokonaismäärän tarkastelu antaa kuitenkin vielä paremman kuvan kondensoitumisilmiön haitallisuudesta, koska veden valuminen rakenteiden alaosiin riippuu yleensä enemmän kondensoituvan kosteuden määrästä kuin kondenssin kestoajasta. Kondenssin kesto aika voi olla pitkä, mutta kondensoituvan kosteuden määrä niin alhainen,

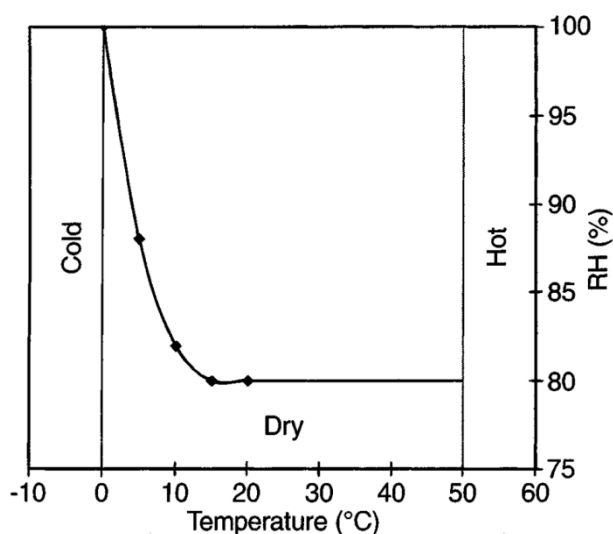
ettei sen kertymisestä rakenteeseen ole merkittävää haittaa. Sen sijaan kondensoituvan kosteuden määrän lisääntyessä tämä riski kasvaa oleellisesti.

Yleensä laskentaohjelmissa ei ole kuitenkaan automaattisesti saatavissa kondensoituvan kosteuden kokonaismäärää eli käytännössä rajapinnan eri puolilla oleviin materiaalikerroksiin sitoutuneen kapillaarisen kosteuden määrää. Kapillaarisen kosteuden määrä voidaan tällöin erikseen laskea, jos ohjelmasta on satavissa huokosilman suhteelliset kosteudet ja kosteuspitoisuudet kustakin ohuesta elementtikerroksesta, joiden avulla materiaalikerros on mallinnettu ohjelmaan. Tätä menetelmää sovellettiin mm. tässä tutkimuksessa WUFI- ja Delphin-ohjelmilla tehdyissä laskentatarkasteluissa. TTY:n analysointimenetelmässä kondensoitumisen vaikutuksia rakenteen sisällä arvioidaan siten kondensoituneen kosteuden kokonaismäärän avulla.

Ikunoiden kondensoitumistarkasteluissa (ks. luku 6.6) ei kuitenkaan käytetty vertailusuurena kondensoituneen kosteuden maksimimäärää vaan yhteenlaskettua kondensoitumisaikaa vuodessa, koska ikkunoiden osalta haitallista on nimenomaan se, kuinka pitkään kondensotunut kosteus pysyy ikkunan pinnassa.

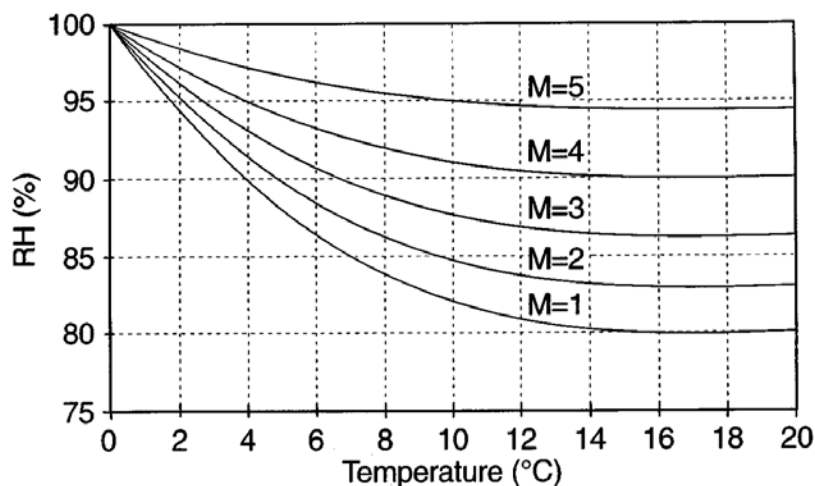
Homeen kasvu

Homehtumisriskin laskennallisen mallinnuksen kehittäminen aloitettiin VTT:llä jo 1980-luvun puolivälissä puumateriaalilla (Viitanen 1996, Hukka & Viitanen 1999). Laskentamallia varten homeen kasvun määrää tutkittiin visuaalisten havaintojen avulla puun pinnalta. Aiemmin homeen kasvua oli arvioitu idätyskokeiden avulla. Kokeiden tuloksena puumateriaalille kehitettiin 1990-luvulla homeen kasvun matemaattinen malli, jolla voitiin arvioida puun homehtumisriskiä muuttuvissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa ajan funktiona. Homehtumisriskimallin kehitystyön yhteydessä määritettiin myös homeen kasvun kannalta suotuisat lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvot (kuva 3.2.4).



Kuva 3.2.4 Homeen kasvun kannalta suotuisat kosteus- ja lämpötilaolosuhteet männyn pintapuussa (Hukka & Viitanen 1999).

Mallissa oli alun perin mukana kaksi puulajia (mänty ja kuusi) ja kummallekin kaksi eri pintavaihtoehtoa (alkuperäinen sahapinta ja uudelleen sahattu pinta). Materiaalin homehtumista kuvataan homeindeksillä, joka kuvaa homeen määrän lisääntymistä puumateriaalin pinnalla (kuva 3.2.5). Puulla tehtyjen kokeiden jälkeen VTT:llä on tarkasteltu myös muiden materiaalien homehtumista saman homeindeksiluokituksen mukaisesti.



Kuva 3.2.5 Homeen kasvulle suotuisat olosuhteet, joilla saavutetaan homeindeksien mukaiset maksimi-arvot puun pinnalla (Hukka & Viitanen 1999).

TTY:llä tehtiin laajoja tutkimuksia puurunkoisten ulkoseinien kosteusteknisestä käyttäytymisestä 1990-luvun lopulla ja 2000-luvun alussa (Vinha 2007). Tässä yhteydessä käytettiin myös olemassa olevaa homeen kasvun laskentamallia puurunkoisten ulkoseinien homehtumisriskin arvioinnissa.

Laskentamallia käytettäessä havaittiin, että siinä oli vielä monia puutteita ja epätäsmällisyyksiä, joita oli tarpeellista parantaa. Näitä olivat mm. seuraavat asiat:

- Homeiden käyttäytymistä oli systemaattisesti tutkittu lähinnä laboratoriossa, joten mallin toiminnasta käytännön olosuhteissa ja todellisissa rakenteissa puuttui tietoa.
- Homeen kasvua oli mallinnettu pinnoittamattomalla puumateriaalilla, joten muiden materiaalien, pinnoitteiden, materiaalien välisten rajapintojen ja rakenteiden merkitys oli tarpeellista ottaa tarkemmin huomioon.
- Homeiden kasvun dynamiikkaa ei oltu riittävästi tutkittu alhaisissa lämpötiloissa, etenkin vaihtelevasti pakkasen puolella käyvissä oloissa.
- Homeiden käyttäytymistä oli tutkittu pääasiassa lyhyiden, muutaman vuorokauden pituisilla sykleillä vaihtuvissa olosuhteissa. Pitkäaikaisten olosuhteiden vaihteluiden vaikutuksista ei ollut riittävästi tietoa. Myös kuivien olosuhteiden taantuma-arviot perustuivat lyhyisiin koejaksoihin.
- Materiaalin lämpö- ja kosteusteknisten ominaisuuksien vaikutusta pinnan olosuhteisiin ja homeen kasvuun vaihtelevissa olosuhteissa oli tarpeellista selvittää tarkemmin.

- Laskentamallilla saadaan erilainen homeen kasvu eri laskentaväleillä tehdyissä tarkasteluissa. Luotettavien tulosten edellytyksenä oli todellista homeenkasvua vastaavan laskentavälin määrittäminen.

Tästä johtuen TTY ja VTT aloittivat yhteisen kehitysprojektin v. 2005, jonka tavoitteena oli laskentamallin parantaminen ja kehittäminen käyttökelpoisemmaksi työkaluksi rakenteiden kosteusteknisen toiminnan arvioinnissa. Tämän projektin tuloksena saatiin aikaan parannettu homeriskimalli, josta käytetään nykyisin nimeä VTT–TTY homemalli. Tähän laskentamalliin on lisätty mukaan myös muut rakennusmateriaalit puun lisäksi. Materiaalit on jaettu niiden homehtumisherkkyyden perusteella neljään homehtumisherkkyydsluokkaan ja neljään homekasvun taantumaluokkaan (Vinha et al. 2013).

Parannetun homeriskimallin homeindeksien luokitusastot on kuvattu taulukossa 3.2.4. Homeindeksi ei ota kantaa eri homelajien esiintyvyyteen materiaalissa, vaan kuvaa ylipäätään homeen kasvua materiaalien pinnoilla. Näin ollen indeksin avulla ei voida päätellä esimerkiksi sitä kuinka toksisia ja ihmisen terveydelle haitallisia homeita materiaalissa kasvaa.

Rakennusmateriaalien jakautuminen eri homehtumisherkkyydsluokkiin on esitetty taulukossa 3.2.5. Joidenkin taulukossa 3.2.5 esitettyjen materiaalien, kuten esim. erilaisten muovipohjaisten materiaalien ja tiilien, kuulumista esitettyyn homehtumisherkkyydsluokkaan ei ole varmistettu kokeiden avulla.

Taulukko 3.2.4 VTT–TTY homemallin homeindeksin luokitusastot (Vinha et al. 2013).

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

Taulukko 3.2.5 Rakennusmateriaalien luokittelu VTT–TTY homemallin homeutumisherkkyyssluokkiin (Vinha et al. 2013).

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

¹ Kevytbetoni kuuluu homeutumisominaisuuksiltaan kahteen eri homeutumisherkkyyssluokkaan. Homeen kasvunopeus vastaa homeutumisherkkyyssluokkaa HHL2, mutta homeindeksin maksimiarvo jää homeutumisherkkyyssluokan HHL3 tasolle.

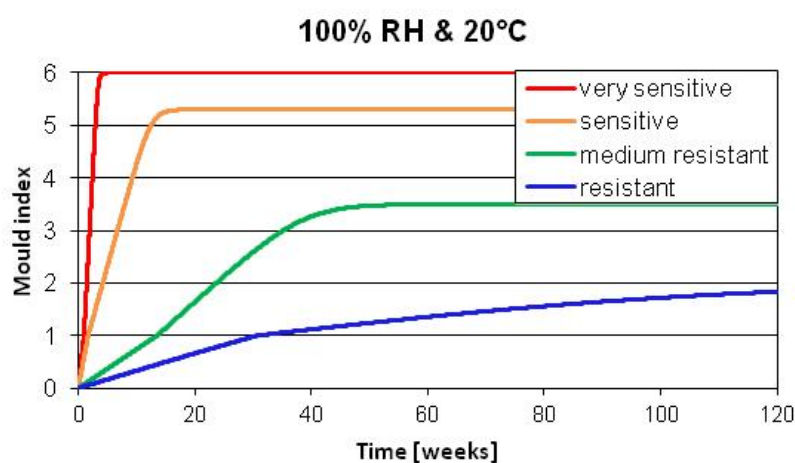
Materiaalin homeutumisominaisuuksia voidaan arvioida homeen kasvun liikkeelle lähdön, homeutumisen maksimitason ja homeen taantumisen avulla. Yleisesti ottaen voidaan todeta, että mitä nopeammin homeen kasvu lähtee materiaalin pinnalla liikkeelle, sitä korkeammaksi homeindeksi voi kohota ja sitä nopeammin home myös taantuu olosuhteiden muuttuessa kasvulle epäedullisiksi. Tästä on kuitenkin olemassa poikkeuksia, kuten taulukossa 3.2.5 on mainittu kevytbetonin osalta. Näin ollen eri materiaalien homeutumisherkkyyttä on tarpeellista tutkia myös jatkossa, jotta niiden luokittelu voidaan tehdä mahdollisimman luotettavasti.

Homeen kasvun taantumista kuvataan neljällä homekasvun taantumaluokalla: voimakas taantuma HTL1, merkittävä taantuma HTL2, kohtalainen taantuma HTL3 ja vähäinen taantuma HTL4. Alkuperäisessä mallissa puumateriaalissa tapahtuva homeen taantuma vastasi voimakasta taantumaa, mutta myöhemmät taantumakokeet ovat antaneet viitteitä siitä, että homeen taantuminen ei olisi näin nopeaa. Tästä syystä FRAME-projektissa homeen taantumisen osalta käytettiin rakennusmateriaaleilla ainoastaan taantumaluokkia HTL2–HTL4. Eri homeutumisherkkyyssluokkia vastaavat homekasvun taantumaluokat, joita käytettiin FRAME-projektissa, on esitetty taulukossa 3.2.6.

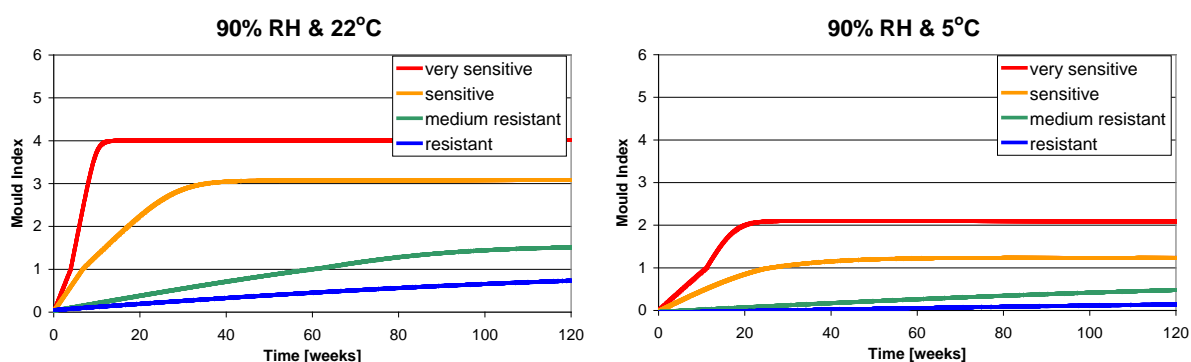
Taulukko 3.2.6 Rakennusmateriaalien homeutumisherkkyyssluokkaa tyypillisesti vastaava homekasvun taantumaluokka VTT–TTY homemallissa. Taulukossa esitetyjä taantumaluokkia käytettiin eri homeutumisherkkyyssluokkiin kuuluvien materiaalien homeutumiskasvun arvioinnissa FRAME-projektin laskentatarkasteluissa.

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

Kuvissa 3.2.6 ja 3.2.7 on esitetty esimerkkejä eri homehtumisherkkyyssluokkien vaikutuksesta homeen kasvunopeuteen ja homeindeksin maksimiin vakio-olosuhteissa.



Kuva 3.2.6 Homeindeksin kehittyminen eri homehtumisherkkyyssluokissa, kun lämpötila on 20 °C ja suhteellinen kosteus 100 % RH (Vinha et al. 2013).



Kuva 3.2.7 Homeindeksin kehittyminen eri homehtumisherkkyyssluokissa, kun lämpötila on 22 °C ja suhteellinen kosteus 90 % RH (vasen kuva) ja kun lämpötila on 5 °C ja suhteellinen kosteus 90 % RH (oikea kuva) (Vinha et al. 2013).

Kuvista 3.2.6 ja 3.2.7 havaitaan, että homeindeksin maksimiin jää eri tasoille eri homehtumisherkkyyssluokissa riippumatta homehtuvien olosuhteiden vaikutusajasta. Herkemmin homehtuvat materiaalit saavuttavat homeindeksin maksimiin nopeammin kuin homehtumista kestävämmät materiaalit. Lisäksi kuvista voidaan todeta, että sekä lämpötila että suhteellinen kosteus vaikuttavat homeindeksin kasvunopeuteen ja maksimiin. TTY:n ja VTT:n yhteistutkimuksessa havaittiin lisäksi, että homeen kasvu lakkaa lämpötilan pudotessa 0 °C alapuolelle (Vinha et al. 2013).

Rakenteissa homeen kasvua esiintyy tyypillisesti kahden materiaalin välisessä rajapinnassa, joten homekasvun arvioimiseksi on tunnettava eri homehtumisherkkyyssluokissa olevien materiaalien keskinäinen vaikutus homeen kasvuun niiden ollessa kontaktissa toisiinsa. Tutkimuksessa havaittiin, että rajapinnan homehtumisriskiä tulee tarkastella yleisesti ottaen

herkemmän materiaalin mukaan. Lisäksi herkemmin homehtuva materiaali lisää homeen kasvua tyypillisesti myös vähemmän herkässä materiaalissa (Vinha et al. 2013).

Poikkeuksena edellä mainittuun ovat homesuoja-aineita sisältävät materiaalit sekä alkalinen uusi betoni. Näiden materiaalien ja herkemmin homehtuvien materiaalien välisessä rajapinnassa homeen kasvua voidaan tarkastella HHL4 luokan mukaan edellyttäen, että rajapinnassa olevat materiaalit ovat kauttaaltaan kontaktissa toisiinsa. Käytännössä rajapinnoissa on kuitenkin usein erilaisia epätasaisuuksia, kuten koloja ja halkeamia, joissa home voi kasvaa. Lisäksi esimerkiksi puukuitueristeitä käytettäessä kontaktin ei voida olettaa olevan täydellinen johtuen asennuksesta sekä eristeen painumisesta ja muodonmuutoksista. Puukuitueristeiden kanssa homeindeksin määrittäminen tulee tehdä siis herkemmän rajapintamateriaalin mukaisesti. Puukuitueristeiden sisältämä homesuoja-aine antaa kuitenkin käytännössä rakenteen kosteustekniselle toiminnalle lisävarmuutta. Alkalisen betonin osalta on puolestaan huomattava, että ajan kuluessa betonin pinta voi karbonatisoitua, jos se pääsee kontaktiin ilman sisältämän hiilidioksidin kanssa ja tällöin betonin homehtumisherkyys muuttuu luokkaan HHL3.

Yleensä homeen kasvu tapahtuu ainoastaan materiaalien pinnoilla, mutta avohuokoisissa lämmöneristeissä, kuten esimerkiksi mineraalivilloissa, homea voi kasvaa myös eristeiden sisällä. Tällaisen materiaalin homehtuessa homeen kokonaismäärä voi olla huomattavasti suurempi kuin materiaalissa, jossa homehtumista tapahtuu vain pinnalla. Tämä tulee ottaa tarvittaessa huomioon arvioitaessa rakenteen homehtumisriskiä.

VTT–TTY homemallin kehitystyötä jatketaan myös parhaillaan käynnissä olevassa ENERSIS-projektissa (2010–2013). Projektissa pyritään edelleen parantamaan homeriskimallin tarkkuutta ja luotettavuutta. Esimerkiksi homekasvun taantuman voimakkuuden määrittäminen eri materiaaleilla vaatii edelleen tarkentamista.

3.2.6 Tarkasteluperiaatteet

TTY:n analysointimenetelmän tarkasteluperiaatteet kuvaavat sen proseduurin, jolla vaipparakenteen kosteusteknistä toimintaa arvioidaan laskennallisen mallinnuksen avulla eri tilanteissa. Tähän liittyy mm. seuraavat asiat:

- analysointimenetelmän eri osien käyttöä koskevat periaatteet
- toimintakriteerit ja kuvaaville vertailusuureille asetettavat raja-arvot
- kosteusvuotojen ja virheellisten rakenteiden mallintamisen periaatteet
- alkuolosuhteiden ja laskenta-ajan valinta
- tarkastelupisteiden valinta
- tulosten arviointi ja herkkyystarkastelut

Analysointimenetelmän eri osien käyttöä koskevat periaatteet

Ulkoilman olosuhteina käytetään laskelmissa FRAME-projektin yhteydessä määritettyjä testivuotia ja sisäilman olosuhteina RIL 107:ssä (2012) esitettyjä kosteuslisän ja lämpötilan mitoitusarvoja. Sisäilman olosuhteina käytetään näitä samoja arvoja myös rakenteiden rakennusaikaista kosteuskäyttäytymistä ja kuivumista arvioitaessa.

Rakennusmateriaalien rakennusfysikaalisina ominaisuuksina käytetään aina ensisijaisesti TTY:llä määritettyjä materiaaliominaisuuksia, joita täydennetään tarvittavilta osin kirjallisuudesta tai laskentaohjelmien tietokannoista saatavilla materiaaliominaisuuksilla.

Laskentaohjelmina käytetään ohjelmia, joiden toimintaa on verifioitu koetuloksien avulla ja joiden ominaisuudet ja puutteet tunnetaan hyvin. Ohjelmissa tulee olla mukana myös tarpeelliset lämmön- ja kosteuden siirtymismuodot ja niissä tulee voida ottaa huomioon tarpeelliset ulkoilman olosuhdetekijät.

Rakenteiden toimintakriteereinä käytetään tällä hetkellä homeen kasvua ja kosteuden kondensoitumista, koska niitä voidaan arvioida laskennallisesti kohtuullisen luotettavasti. Muita toimintakriteereitä voidaan kuitenkin tarvittaessa lisätä tarkasteluihin, jos niille saadaan kehitettyä luotettavia laskentamalleja.

Valituille toimintakriteereille tulee määrittää niitä kuvaavat vertailusuureet, joiden avulla rakenteiden toimintaa arvioidaan. Kuten luvussa 3.2.5 jo todettiin, kosteuden kondensoitumisen osalta vertailusuureeksi on valittu kondensoituneen kosteuden maksimimäärä (ikkunoiden kondensoitumistarkasteluja lukuun ottamatta), joka rakenteessa esiintyy testivuoden aikana. Homehtumisriskin osalta vertailusuureena käytetään homeindeksin maksimiarvoa testivuoden aikana. Näiden vertailusuureiden arvot saadaan laskettua rakenteen sisältä valituista tarkastelupisteistä saatavien lämpötilan ja huokosilman suhteellisen kosteuden avulla.

Toimintakriteerejä kuvaaville vertailusuureille asetettavat raja-arvot

Keskeinen osa analysointimenetelmän tarkasteluperiaatteissa on määrittää toimintakriteerejä kuvaaville vertailusuureille raja-arvot tai muut ehdot, joita ne eivät saa ylittää/ alittaa. Kuten luvussa 4 on esitetty, nämä raja-arvot riippuvat tarkasteltavasta rakenteesta sekä sisä- ja ulkoilman olosuhteista, joissa tarkasteluja tehdään. Jos rakennetta ympäröivät olosuhteet ovat homeen kasvulle tai kosteuden kondensoitumiselle hyvin suotuisat, valitut raja-arvot eivät voi olla välttämättä yhtä tiukat kuin vähemmän kriittisissä ilmasto-olosuhteissa. Kaikissa tapauksissa minimiehtona voidaan kuitenkin pitää periaatetta, että olosuhteet rakenteiden sisällä eivät saa olla valittujen toimintakriteerien suhteen kriittisemmät kuin sisä- tai ulkoilmassa (Vinha 2007).

Tässä tutkimuksessa kondensoituneen kosteuden maksimimäärälle on valittu kaksi raja-arvoa. Homehtumisherkkyyden luokkien HHL1 ja HHL2 materiaaleja sisältävissä rakenteissa

kondensoituneen kosteuden maksimimäärä sai olla enintään 150 g/m^2 . Tämä arvo perustuu TTY:llä aikaisemmin tehtyihin puurakenteisten ulkoseiniä tutkimuksiin (Vinha 2007). Homehtumisherkkyysluokkien HHL3 ja HHL4 materiaaleja sisältävissä rakenteissa kondensoituneen kosteuden maksimimäärä sai olla puolestaan 1000 g/m^2 , joka perustui standardiin DIN 4108-3 (1981).

Koska ulkoilmassa homeindeksin maksimiarvo nousee testivuosiolosuhteissa hyvin korkeaksi (ks. kuva 4.5.10), joudutaan homeen kasvu hyväksymään lähellä vaipparakenteiden ulkopintaa. Toisaalta rakenteiden sisäpinnan lähellä homeen kasvu ei ole missään olosuhteissa sallittua. Tästä syystä laskentatarkasteluja varten on päätettävä, missä rakennekerroksissa homeen kasvua ei vielä sallita. FRAME-tutkimuksessa laskentatarkastelut ja rakenteiden parannusehdotukset tehtiin sillä periaatteella, että homeen kasvua ei sallita kantavissa rakenteissa eikä lämmöneristekerroksessa tai sen sisäpuolella olevissa materiaalikerroksissa. Toisin sanoen homeindeksin sallittu maksimiarvo näissä kohdissa oli $< 1,0$. Tähän raja-arvoon on useita perusteita:

- Kantavien rakenteiden tulee kestää rakennuksissa kaikkein pisimpään ja niiden käyttöikätaavoite on vähintään 50 vuotta. Kantavien rakenteiden vaihtaminen on lisäksi hankalaa, jos niihin syntyy vaurioita.
- Lämmöneristekerroksesta ja niiden sisäpuolella olevista rakennekerroksista homeiden ja niiden aineenvaihduntatuotteiden on huomattavasti helpompaa siirtyä sisäilmaan rakenteen ilmavuotokohtien kautta, kuin esimerkiksi tuuletusvälistä tai julkisivuverhouksesta/ vesikatteesta. Erityisesti tämä pitää paikkansa silloin, jos lämmöneristeenä käytetään avohuokoisia lämmöneristeitä.
- Avohuokoisissa lämmöneristeissä homeet voivat kasvaa myös eristeiden sisällä, jolloin niitä voi kertyä rakenteeseen suuria määriä.
- Rakenteiden laskentatarkastelut tehtiin lähes kokonaan ideaalitalanteissa, jolloin rakenteisiin ei oletettu aiheutuvan kosteusvuotoja sadeveden tai ilmavirtausten seurauksena. Käytännössä näitä vuotoja esiintyy kuitenkin aina jonkin verran, jolloin rakenteissa tulee olla myös vikasietoisuutta näitä tilanteita varten.
- Laskennallisessa tarkastelussa on aina epävarmuustekijöitä (mm. laskentaohjelmissa olevat yksinkertaistukset ja puutteet, laskennan konvergointivirheet, rakenteissa olevat poikkeamat ja materiaaliominaisuuksien vaihtelu), mistä johtuen valitun raja-arvon tulee olla riittävän alhainen. Tämä korostuu vielä sen vuoksi, että laskentatarkastelut eivät sisällä varmuuskertoimia samalla tavoin kuin esim. rakenteiden lujustarkastelut.
- VTT-TTY homemalli ei kuvaa homehtumisen terveystarvea. Esimerkiksi kivipohjaisissa materiaaleissa tai kipsilevyssä elävien homeiden aineenvaihduntatuotteet voivat olla huomattavasti toksisempia kuin puumateriaaleissa elävien homeiden, vaikka niiden homeindeksi olisikin selvästi alhaisemmalla tasolla. Vastaavasti myös homesuoja-aineita sisältävissä materiaaleissa saattaa elää joitakin homelajeja ja niiden aineenvaihduntatuotteet voivat olla toksisempia kuin käsittelemättömien materiaalien pinnalla elävien homeiden. Ainoa keino välttää eri homelajien haitallisuuden

arvioinnista syntyvät ongelmat on valita raja-arvo siten, että homeen kasvua ei ylipäätään sallita tarkasteltavissa kohdissa.

- Homeen kasvulle on tyypillistä se, että kerran homehtumaan päässyt materiaali homehtuu herkemmin uudestaan, jos olosuhteet ovat ajoittain homeen kasvulle otollisia. Tällöin homeen määrä ja haittavaikutukset voivat lisääntyä ajan mukana. Tämän asian vaikutusta ei ole otettu tarkasteluissa huomioon. Kun raja-arvo asetetaan niin, että homeen kasvua ei tapahdu, tämän ilmiön vaikutusta ei ole tarpeellista ottaa rakenteen tarkastelussa huomioon.
- Rakennuksen ympärillä oleva mikroilmasto voi aiheuttaa joissakin ulkovaipan kohdissa huomattavasti suuremman kosteusrasituksen rakenteille kuin laskentatulokset osoittavat. Varsinkin tuulen vaikutus riippuu hyvin paljon rakennuksen muodosta ja lähiympäristöstä ja tämän seurauksena viistosade voi rasittaa rakennuksen julkisivua paikallisesti (esimerkiksi rakennuksen ylänurkissa) erittäin voimakkaasti (ks. luku 4.3).
- Ulkoseinärakenteiden laskentatarkasteluissa testivuosien olosuhteista puuttui taivaalle lähtevän pitkäaaltoisen lämpösäteilyn määrä. Tästä johtuen rakennusten ulkopinnat ovat todellisuudessa ajoittain ulkoilmaa kylmempiä, jolloin homehtumis- ja kondensoitumisriski rakenteiden ulko-osissa kasvaa. Tätä ilmiötä pyrittiin tosin kompensoimaan puurunkoisten ulkoseinärakenteiden laskelmissa lisäämällä ulkoverhouksen taustan tuuletusta (ks. luku 6.2).
- Vaikka tarkasteluihin valitut testivuodet ovatkin homeen kasvun kannalta kriittisiä, ne eivät olleet kuitenkaan kaikkein kriittisimpiä vuosia (ks. luvut 4.5.3 ja 4.5.4). Näin ollen homehtumisriski on rakenteissa joinakin vuosina vielä suurempi kuin testivuosien olosuhteissa. Myös tästä syystä valitun raja-arvon tulee olla riittävän alhainen.

Kosteusvuotojen ja virheellisten rakenteiden mallintamisen periaatteet

FRAME-tutkimuksessa rakenteiden toimintaa tarkasteltiin lähes pelkästään ideaalisessa tilanteessa, jossa rakenteisiin ei oletettu tapahtuvan kosteusvuotoja. Käytännössä näitä vuotoja tapahtuu kuitenkin aina jonkin verran rakennuksen käytön aikana esim. sadeveden vaikutuksesta tai vesihöyryn päästessä rakenteeseen raoista ja rei'istä ilmapvirtausten mukana. Aikaisemmin laskentaohjelmissa ei ollut mukana ominaisuuksia, joilla näitä tarkasteluja olisi voinut tehdä, mutta viime vuosien aikana ohjelmien kehitys on mahdollistanut myös tällaiset tarkastelut.

Erilaiset kosteusvuotoihin liittyvät tarkastelut ovat tarpeellisia rakenteiden vikasietoisuuden arvioinnissa ja niiden määrä on kasvamassa rakennusfysikaalisissa laskentatarkasteluissa. Haasteena näissä tarkasteluissa on kuitenkin määrittää kosteusvuodon määrä tai vuotokohtien koko siten, että se kuvaa tyypillistä ja todennäköistä virheen aiheuttamaa vuotoa. Tällä aihealueella on myös paljon lisätutkimuksen tarvetta.

Kosteusvuototarkasteluissa valitaan käytettävä kosteusvuodon suuruus ja/ tai vuotokohtien koot ja paikat. Näissä tarkasteluissa valittavien toimintakriteerien raja-arvot voivat olla erilaiset kuin ideaalisilla rakenteilla toteutetuissa käyttötilatarkasteluissa. Tyypillisesti näissä

tarkasteluissa tehdään myös erilaisia herkkyystarkasteluita vuotomäärän/ vuotokohdan koon funktiona.

Moniin laskentaohjelmiin voidaan nykyisin syöttää esimerkiksi tietty prosenttiosuus sateesta/ viistosateesta, jonka oletetaan tunkeutuvan rakenteen sisään. Ohjelmaan voi myös mallintaa kohdan, josta vuoto tapahtuu rakenteeseen.

Mikäli kosteusvuoto aiheuttaa hitaasti kumuloituvan kosteusrasituksen rakenteeseen, joudutaan arvioimaan lisäksi rakenteen hyväksyttävä käyttöikä vuototilanteen säilyessä ennallaan. Jos tarkastelussa käytetään koko ajan ulkoilman testivuotta, kosteusrasitus voi lisääntyä useiden vuosien pituisessa laskennassa huomattavasti nopeammin kuin todellisuudessa. Toisaalta rakenteen käyttöikäarvio on silloin myös varmalla puolella. Tarvittaessa tämä asia tulee kuitenkin ottaa käyttöiän arvioinnissa huomioon esimerkiksi mitoitusolosuhteita muuttamalla.

Alkuolosuhteiden ja laskenta-ajan valinta

Laskentaohjelmiin syötetään materiaalien lämpötila ja kosteuspitoisuus/kuokosilman suhteellinen kosteus alkutilanteessa kuhunkin materiaalikerrokseen erikseen tai vaihtoehtoisesti koko rakenteeseen kerralla. Kuivumistarkasteluissa arvot valitaan vastaamaan kuivumisen lähtötilannetta. Käyttötilanteen tarkasteluissa materiaalien alkuolosuhteiden tulee kuitenkin muuttua vastaamaan rakenteessa vallitsevia lämpötila- ja kosteusjakaumia ennen varsinaisen tarkastelujakson alkua. Lämpötilan osalta muutos tapahtuu nopeasti – tyypillisesti muutamassa vuorokaudessa, mutta kosteuden osalta alkuolosuhteiden muuttuminen käyttötilannetta vastaaviin olosuhteisiin voi kestää useamman vuoden riippuen myös siitä, kuinka alkuolosuhteet valitaan.

Tyypillisesti käyttötilanteen tarkastelut aloitetaan testivuoden alusta ja niissä tarkastellaan vuoden pituista ajanjaksoa. Näin tehtiin myös FRAME-projektin laskelmissa. Alkuolosuhteiden muuttaminen testivuoden alun olosuhteita vastaaviksi saadaan aikaan laskemalla rakenteen toiminta usean perättäisen testivuoden pituisella ajanjaksolla ja tekemällä tarkemmat tarkastelut viimeisen testivuoden tuloksista. Useimmilla rakenteilla kosteusolosuhteet saadaan vastaamaan testivuoden alkutilanteen olosuhteita tekemällä kahden testivuoden pituinen laskentatarkastelu, jossa tarkempaan tarkasteluun valitaan jälkimmäisen vuoden tulokset. Joissakin rakenteissa, kuten esim. massiivirakenteissa, joiden kosteuskapasiteetti on suuri, joudutaan testivuoden alkutilannetta vastaavien olosuhteiden saamiseksi laskemaan useamman vuoden pituinen edeltävä ajanjakso. Riittävän laskentajakson pituus saadaan selville vertaamalla rakenteessa vallitsevia kosteusolosuhteita tammikuun alussa ja valitsemalla laskenta-ajan pituus siten, että eri vuosien välillä ei tapahdu enää merkittäviä muutoksia.

Rakenteiden kuivumistarkasteluissa puolestaan laskentaa jatketaan niin pitkään, että rakenteen kosteuspitoisuudet ovat alittaneet halutun tason. Tässä tapauksessa tarkastelut

voivat kestää rakenteesta riippuen jopa yli kymmenen vuotta. Jos kuivumistarkastelussa käytetään koko ajan ulkoilman testivuotta, kuivumisaika voi pidentyä useiden vuosien pituisessa laskennassa huomattavasti todelliseen tilanteeseen verrattuna (sama asia kuin edellä todettiin kosteusvuototarkastelujen osalta). Kuivumisaika-arvio on tosin vastaavasti myös varmalla puolella. Tarvittaessa tämä asia tulee kuitenkin ottaa kuivumisaikojen arvioinnissa huomioon. FRAME-tutkimuksessa tehdyissä kuivumistarkasteluissa kuivumisaikojen pituudet olivat kuitenkin tyypillisesti niin lyhyitä, että laskentatarkasteluissa käytettiin koko ajan samoja ulkoilman mitoitusolosuhteita.

Sisäilman olosuhteet voivat myös poiketa rakennusaikana käyttötilan olosuhteista, kuten luvussa 3.2.2 todettiin. Olosuhteista riippuen rakenteiden kuivuminen voi olla nopeampaa tai hitaampaa kuin käyttötilanteen olosuhteilla laskettaessa. FRAME-tutkimuksessa sisäilman olosuhteina käytettiin kuitenkin myös kuivumistarkasteluissa käyttötilan mitoitusolosuhteita.

Tarkastelupisteiden valinta

Laskennallisessa mallinnuksessa tarkastelupisteet tulee luonnollisesti sijoittaa rakenteissa siten, että ne ovat tarkasteltavien toimintakriteerien kannalta kriittisimmissä kohdissa. Tyypillisesti nämä kohdat sijaitsevat eri materiaalikerrosten välisissä rajapinnoissa. Homehtumisriskiä ja kosteuden kondensoitumisriskiä tarkasteltaessa tarkastelupisteet tulee sijoittaa lämmöneristekerroksen kumpaankin pintaan sekä tarvittaessa eri kylmäsihtakohtien yhteyteen. Tarkastelupisteitä valittaessa tulee tuntea rakenteen kosteustekninen käyttäytyminen riittävän hyvin. Tarvittaessa pisteitä tulee valita riittävän paljon, jotta kriittisimpien kohtien toiminta saadaan kartoitettua.

Tulosten arviointi ja herkkyystarkastelut

Tulosten arviointi ja herkkyystarkastelut ovat tärkeä osa tulosten luotettavuuden arvioinnissa. Laskennan lähtöoletuksia täytyy varioida siten, että voidaan varmistua tulosten loogisuudesta ja niiden muuttumisesta oikeaan suuntaan. Olosuhteissa tapahtuvat voimakkaat äkilliset tai hetkittäiset muutokset tai laskennassa esiintyvä suuri konvergenssivirheiden määrä voivat olla seurausta erilaisista laskentaan tai lähtöarvoihin liittyvistä virheistä. Tätä asiaa on käsitelty tarkemmin luvussa 5.

3.3 Analysointimenetelmän uutuusarvot

TTY:n kehittämässä rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmässä on useita uutuusarvoja, jotka tekevät siitä tällä hetkellä parhaan käytössä olevan laskentamenetelmän rakenteiden kosteusteknisen toiminnan tarkasteluun. Näitä uutuusarvoja ovat mm. seuraavat asiat:

- Ulkoilman olosuhteina käytetään rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta kriittisiä testivuosia (Vantaa 2007 ja Jokioinen 2004), joiden valinnassa on otettu

huomioon kaikki rakenteiden rakennusfysikaalisen toiminnan kannalta keskeiset ulkoilman olosuhdetekijät taivaalle lähtevää pitkäaaltoista lämpösäteilyä lukuun ottamatta. Nykyilmaston testivuodet ovat todellisia toteutuneita vuosia.

- Testivuosien valinnassa on otettu huomioon myös erityyppiset rakenteet. Laskentatarkasteluissa ulkoilman testivuosi valitaan tarkasteltavan rakenteen mukaisesti ja samoja testivuosia voidaan käyttää useiden eri rakenteiden tarkasteluissa.
- Testivuodet on valittu nykyilmaston lisäksi myös vuosien 2050 ja 2100 ilmastoista (Vantaa 2050, Jokioinen 2050, Vantaa 2100 ja Jokioinen 2100). Tulevaisuuden testivuodet on määritetty A2-kasvihuonekaasuskenaarion perusteella.
- Sisäilman lämpötila- ja kosteusolosuhteiden mitoitusravot perustuvat suomalaisissa asuinrakennuksissa mitattuihin arvoihin.
- Rakennusmateriaalien rakennusfysikaalisina ominaisuuksina käytetään valtaosin Suomessa käytettävien materiaalien arvoja, joista suuri osa on määritetty lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona.
- Rakenteiden homehtumisriskin arvioinnissa käytetään VTT–TTY homemallia, joka on kehittynein homeen kasvua kuvaava laskentamalli maailmassa. Mallin avulla voidaan arvioida konkreettinen homeen kasvun määrä eri materiaaleissa ja niiden välisissä rajapinnoissa.
- Menetelmän avulla voidaan laskea, kuinka paljon vaipparakenteen homehtumisriski muuttuu eri tilanteissa. Tämä mahdollistaa rakenteen toiminnan parantamisen erilaisilla rakenneratkaisuilla siten, että riski saadaan halutulle tasolle tai poistettua kokonaan.

Analysointimenetelmän eri osat on kehitetty tällä hetkellä Suomen sisä- ja ulkoilman olosuhteissa tehtäviin laskentatarkasteluihin, mutta samoilla periaatteilla menetelmää voidaan käyttää myös muissa maissa tehtävissä tarkasteluissa. Tämä edellyttää ainoastaan ulkoilman testivuosien ja sisäilman kosteuslisän ja lämpötilan mitoitusravojen määrittämistä kyseisestä maasta.

4 Rakennusfysikaalisten testivuosien määrittäminen Suomen ilmastossa

4.1 Yleistä

Rakenteiden kosteusteknisissä tarkasteluissa on oleellista tutkia rakenteiden toimintaa rasittavissa ulkoilman olosuhteissa, jotka edustavat kosteusrasitusten osalta olosuhdevaihteluiden ääripäätä. Rakennusfysikaalisten tarkastelujen osalta on esitetty, että edustavien olosuhteiden tulisi vastata 90 % kriittisyystasoa 30 vuoden ilmastodatan perusteella määritettynä (Sanders 1996). Tämä tarkoittaa sitä, että vähintään 90 % vuosista on vähemmän kriittisiä kuin tarkasteluihin valittu vuosi.

Rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta kriittisten testivuosien löytäminen on erityisen tärkeää siksi, että rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa ei käytetä ulkoilman olosuhteiden osalta lisävarmuuksia tai varmuuskertoimia. Muutenkin erilaisten varmuuksien käyttö rakennusfysikaalisissa laskelmissa on tapauskohtaista eikä niistä ole annettu yleisiä ohjeita tai määräyksiä.

Rakennusfysikaalisia testivuosia tai ns. kosteusreferenssivuosia (MRV) on määritetty eri maissa ja tutkimuksissa (Rode 1993; Sanders 1996; Geving 1997; Harderup 1998; Djebbar et al. 2001; Vinha 2007; Salonvaara et al. 2010), mutta niiden määrittämiseen ei ole olemassa yhteisiä ohjeita ja sääntöjä. Osittain tämä johtuu siitä, että rakenteiden kosteustekniseen toimintaan vaikuttavat monet ulkoilman olosuhdetekijät yhtä aikaa ja rakenteesta sekä tarkasteltavasta toimintakriteeristä riippuen eri tekijöiden keskinäinen merkitys vaihtelee. Esimerkiksi homeen kasvu on ollut toimintakriteerinä vain hyvin harvoissa tutkimuksissa (Vinha 2007; Salonvaara et al. 2010), koska sen kuvaaminen laskennallisten mallien avulla on ollut aiemmin puutteellista.

Rakenteiden rakennusfysikaalisen toiminnan kannalta keskeiset ulkoilman olosuhdetekijät ovat:

- lämpötila
- suhteellinen kosteus
- tuuli (tuulen suunta ja nopeus)
- sade/ viistosade (sademäärä, tuulen suunta ja nopeus)
- auringonsäteily (suora ja diffuusi säteily, pilvisyys)
- lämpösäteily taivaalle (taivaan tehollinen lämpötila, pilvisyys)

Edellä mainitut tekijät vaihtelevat rakennuksen maantieteellisen sijainnin ja tarkasteltavan ilmansuunnan mukaan.

Ulkoilman olosuhdetekijöiden lisäksi rakenteiden lähellä olevan ulkoilman olosuhteisiin vaikuttavat myös monet rakennuksen paikalliseen sijaintiin ja muotoon liittyvät tekijät, jotka aikaansaavat rakennuksen ympärille ns. mikroilmaston. Näitä tekijöitä ovat mm.

- rakennuksen korkeusasema
- rakennuksen koko, muoto ja korkeus
- ulkopintojen suojarakenteet (pellitykset, räystäät, markiisit, lipat, säleiköt)
- rakenteiden ulkopintojen detaljit ja struktuuri (ulokkeet, syvennykset, pinnan ominaisuudet)
- lähiympäristö (muut rakennukset, puusto ja kasvillisuus, maaston muodot, vesialueet)

Rakennuksen ympärillä olevan mikroilmaston olosuhteet voivat poiketa merkittävästi säähavaintoasemalla mitatuista ulkoilman olosuhteista, joten niiden vaikutukset on otettava tarkasteluissa tarvittaessa huomioon.

Tärkeä periaatteellinen kysymys testivuoden määrittämisessä on se valitaanko mittausdatan perusteella testivuodeksi joku todellinen vuosi vai pyritäänkö mittausdatassa esiintyvien olosuhdevaihteluiden perusteella luomaan ns. synteettinen testivuosi. Synteettinen testivuosi voi olla esimerkiksi usean vuoden olosuhdejakoista yhdistämällä luotu vuosi, jossa kukin olosuhdejako kuvaa voimakkaasti rasittavaa tasoa rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta. Esimerkiksi rakennusten energiankulutuslaskennassa käytettävä testivuosi määritetään nykyisin synteettisenä vuotena, joka koostuu eri vuosista kerätyistä kuukauden pituisista olosuhdejakoista (SFS-EN ISO 15927-4 2005; Jylhä et al. 2011a; Kalamees et al. 2012).

Rakennusten energiankulutuslaskelmia varten määritetty testivuosi kuvaa energiankulutuksen kannalta keskimääräisiä ulkoilman olosuhteita (SFS-EN ISO 15927-4 2005; Jylhä et al. 2011a; Kalamees et al. 2012), joten sen määrittäminen poikkeaa rakennusfysikaalisista testivuosista. Energiankulutuksen osalta keskimääräisten olosuhteiden käyttö on perusteltua, koska kyseessä ei ole rakenteiden turmeltumisilmiö tai muu rakennuksessa terveyshaittaa aiheuttava tekijä. Suomen olosuhteissa määritettyä energialaskennan testivuotta on käytetty tässä tutkimuksessa tehdyissä energiatehokkuustarkasteluissa (ks. luku 8).

Myös kosteusteknisissä tarkasteluissa voi olla tarpeellista käyttää keskimääräisiä ulkoilman olosuhteita, kun rakenteiden toimintaa tarkastellaan useiden vuosien pituisella ajanjaksolla. Esimerkiksi kosteusvuototarkasteluissa ja rakenteiden kuivumistarkasteluissa keskimääräisissä olosuhteissa tehtävät tarkastelut ottavat paremmin huomioon vuosien vaihtelun tarkasteluajanjaksolla (ks. luku 3.2.6).

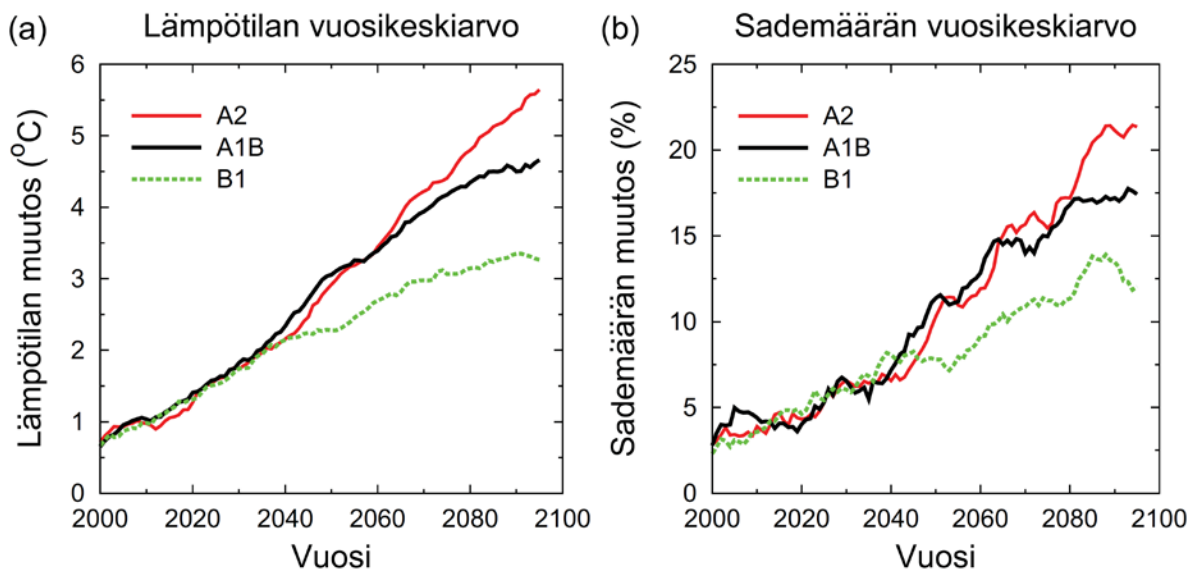
Ulkoilman olosuhteiden vaikutusta rakenteiden toimintaan on mahdollista arvioida myös muulla tavoin kuin tarkastelemalla niitä varsinaisen testivuoden avulla. Tässä tutkimuksessa betonirakenteissa tapahtuvaa raudotteiden korroosiota ja pakkasrapautumista on tarkasteltu

tällä tavoin, koska näihin ilmiöihin vaikuttaa monet betonin säilyvyysominaisuudet sekä rakenteelliset ominaisuudet. Näiden tarkastelukriteerien kuvaamat vauriot syntyvät rakenteeseen myös pitkän ajan kuluessa, jolloin tarkastelua on perusteltua tehdä vaurioitumismekanismien kannalta esimerkiksi keskimääräisissä ulkoilman olosuhteissa ja laskemalla olosuhteiden synnyttämä kumuloituva vaikutus (ks. luku 4.6).

4.2 Ilmastonmuutoksen vaikutukset rakenteiden toiminnassa

Ilmastonmuutoksen ennustetaan nostavan ulkoilman lämpötilaa ja lisäävän sademäärää sekä pilvisuutta (kuva 4.2.1) (Jylhä et al. 2009). Myös sadepäivien lukumäärän ennustetaan lisääntyvän talvella, mutta kesällä niiden määrä voi jopa laskea (Jylhä et al. 2009). Lisäksi tuulen voimakkuuden ja ulkoilman suhteellisen kosteuden ennustetaan nousevan jonkin verran talvella (Ruosteenoja et al. 2013). Nämä muutokset vaikuttavat vaipparakenteiden kosteustekniseen toimintaan mm. seuraavilla tavoilla:

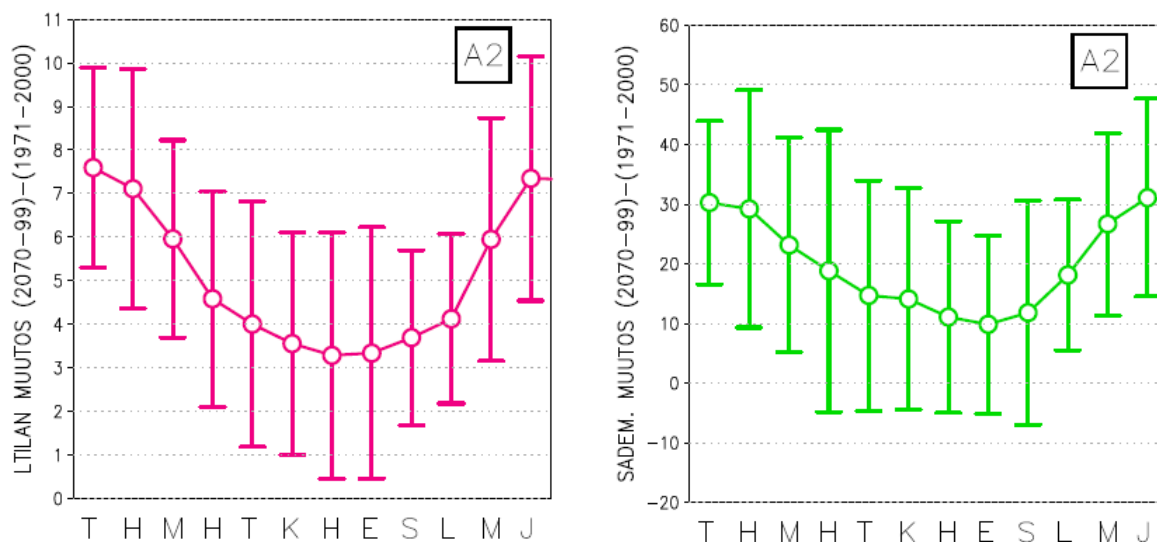
- Viistosaderasitus julkisivupinnoille kasvaa.
- Kosteuden kondensoitumiselle ja homeen kasvuille otolliset olosuhteet lisääntyvät varsinkin rakenteiden ulko-osissa.
- Kosteuden siirtyminen ulkoa sisälle päin lisääntyy varsinkin julkisivuissa, joihin imeytyy sadevettä. Kesäaikana kondenssi- ja homehtumisriski lisääntyy näissä rakenteissa myös sisäpinnan lähellä.
- Rakenteiden kuivumiskyky vähenee ja hidastuu poutajaksojen lyhentyessä ja pilvisyyden lisääntyessä.
- Vanhojen lisähuokostamattomien betonijulkisivujen pakkasrapautuminen lisääntyy sateen ja pakkasen yhteisvaikutuksesta.



Kuva 4.2.1 Vuotuisen keskilämpötilan kohoaminen (a) ja sademäärän kasvu (b) vuosina 2000–2100 verrattuna perusjakson 1971–2000 keskiarvoon; koko Suomelle laskettuja 11 vuoden liukuvia aluekeskiarvoja. (Jylhä et al. 2009)

Kuvassa 4.2.1 lämpötilan ja sademäärän muutosta on ennustettu kolmen eri kasvihuonekaasuskenaarion avulla. Näistä skenaario B1 kuvaa olosuhteiden muuttumista optimistisessa tilanteessa, jolloin kasvihuonekaasujen päästöjen määrää on saatu rajoitettua tehokkaasti vuosisadan loppuun mennessä. Skenaario AIB kuvaa tapausta, jossa päästöjen vähennykset ovat toteutuneet suunniteltua hitaammin ja päästöt ovat melko suuret ja skenaario A2 tapausta, jossa päästöjen määrää ei ole saatu rajoitettua, vaan ne ovat edelleen lisääntyneet. (Jylhä et al. 2009)

Ulkoilman olosuhteiden muutokset eivät tapahdu tasaisesti, vaan suurimmat muutokset tapahtuvat talvella ja loppusyksystä (kuva 4.2.2). Lämpötilan ja sademäärän lisäksi myös pilvisyyden ja tuulen voimakkuuden lisääntymisen sekä suhteellisen kosteuden nousun ennustetaan olevan voimakkainta talvella (Jylhä et al. 2009, Ruosteenoja et al. 2013). Syysaika on jo nykyisin ongelmallinen rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta, joten syksyllä tapahtuvat olosuhdemuutokset vaikuttavat rakenteisiin erityisen paljon.



Kuva 4.2.2 Ennustettu keskilämpötilan (vasen kuva) ja sademäärän (oikea kuva) muutos Suomessa eri kuukausina vuosina 2070–2099 verrattuna perusjakson 1971–2000 keskiarvoon, kun kasvihuonekaasuskenaariona on käytetty skenaariota A2. Pystypalkit kuvaavat muutoksen 90 % todennäköisyysväliä. Kaikki luvut ovat koko Suomen alueen yli laskettuja keskiarvoja. (Ilmatieteen laitos 2007)

4.3 Testivuosien valintaperiaatteet FRAME-tutkimuksessa

FRAME-tutkimuksessa testivuodet valittiin siten, että ne vastaavat todellisia esiintyneitä vuosia. Tällöin ei ole tarvetta arvioida sitä ovatko olosuhteet vertailukelpoisia todellisiin olosuhteisiin nähden, kuten on tilanne synteettisiä testivuosia käytettäessä. Toisaalta lyhyempien olosuhdejaksojen valitseminen synteettisten vuosien muodostamista varten olisi ollut myös hyvin hankalaa ja työlästä johtuen mm. valintakriteerien vaihtelusta eri tilanteissa.

Testivuosien valinnassa eri ilmastoissa (nykyilmasto ja tulevaisuuden ilmastot) käytettiin seuraavia periaatteita:

- Tarkasteltaessa ulkoilman olosuhteiden kriittisyyttä valitun toimintakriteerin kannalta (homeen kasvu tai kosteuden kondensoituminen) tavoitteena oli, että vähintään 90 % vuosista on vähemmän kriittisiä kuin valittu testivuosi.
- Testivuodet valittiin neljältä eri paikkakunnalta mitatusta 30 vuoden ilmastodatasta. Ilmastodatan tarkastelujaksoksi valittiin 1980–2009 välinen ajanjakso. Yhteensä tutkimuksessa tarkasteltiin siis 120 vuoden mittausdataa yhden ilmaston osalta.
- Tarkasteltaviksi paikkakunniksi valittiin Vantaa, Jokioinen, Jyväskylä ja Sodankylä, koska nämä paikkakunnat sijaitsevat maantieteellisesti eri puolilla Suomea ja eri ilmastoalueilla (rannikko/ sisämaa) (kuva 4.3.1). Näiltä paikkakunnilta oli saatavissa myös kattavin ilmastodata tutkimukseen valitulla ajanjaksolla. Lisäksi paikkakuntien valinnassa otettiin huomioon rakentamisen volyyymi Suomessa siten, että ne painottuvat jossain määrin Etelä-Suomeen.
- Suomen maantieteellisen alueen katsottiin olevan niin pieni ja ilmasto-olosuhteiden siinä määrin yhteneväisiä, että valittavien testivuosien katsottiin kuvaavan riittävän hyvin koko maata.
- Tarkasteluissa otettiin huomioon kaikilta vuosilta seuraavat ulkoilman olosuhteita kuvaavat suureet: lämpötila, suhteellinen kosteus, auringon kokonaissäteily (suora ja diffuusi säteily), sademäärä vaakapinnalle sekä tuulen nopeus ja suunta. Ulkoilman olosuhteina käytettiin 3 tunnin välein mitattujen/määritettyjen suureiden arvoja, jotka interpoloitiin siten, että laskennassa oli käytettävissä jokaiselta vuodelta tunnin välein määritetty säädäta. Lähteissä Jylhä et al. (2011a) ja Ruosteenoja et al. (2013) on esitetty tarkemmin ulkoilman olosuhteiden määrittämiseen liittyvät periaatteet.
- Tarkasteluissa otettiin huomioon kaikki ilmansuunnat siten, että testivuodet määritettiin rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta kriittisimmässä ilmansuunnassa (etelä tai pohjoinen). Rakenteesta ja käytettävästä testivuodesta riippuen kriittisin ilmansuunta vaihtuu, kuten todettiin jo aiemmin luvussa 3.2 1.

Testivuosien valinnassa pyrittiin ottamaan huomioon kaikki rakennusfysikaalisten tarkastelujen kannalta keskeiset ulkoilman olosuhdetekijät (ks. luku 4.1). Tutkimuksen aikana todettiin kuitenkin, että pitkäaaltosen lämpösäteilyn mittaustulokset puuttuivat suurimmasta osasta vuosia, joten taivaalle lähtevän lämpösäteilyn vaikutus jouduttiin jättämään valintakriteereistä pois.

Testivuosia määritettiin kolmessa eri ilmastossa: nykyilmastossa (1980–2009), vuoden 2050 ilmastossa (2040–2069) ja vuoden 2100 ilmastossa (2070–2099). Ilmatieteen laitos modifioi nykyilmaston 30 vuoden ilmastodatan olosuhteita siten, että ne vastasivat ennustettua olosuhteiden muutosta kriittisen A2-kasvihuonekaasuskenaarion mukaisesti (ks. luku 4.2). A2-skenaario valittiin tarkasteluihin, jotta tutkimustulokset rakenteiden kosteusteknisestä toiminnasta olisivat varmallalla puolella. Näin ollen jokaisen kolmen ilmaston testivuosien

määrittämistä varten oli käytettävissä 120 vuoden ilmastodata. Tulevaisuuden ilmastodatan modifioinnin periaatteet on esitetty tarkemmin julkaisuissa Jylhä et al. (2011a) ja Ruosteenoja et al. (2013).



Kuva 4.3.1 Testivuosien valinnassa käytettyjen paikkakuntien sijainti Suomessa.

Viistosateen laskenta ulkoilman sade- ja tuulitietojen avulla

Rakennuksen pystyinnoille tulevan viistosateen laskentaa varten on määritetty useita erilaisia kaavoja. Viistosateelle valittu laskentakaava vaikuttaa siten myös jonkin verran eri vuosien kriittisyysjärjestykseen. Seuraavassa on käsitelty viistosateen laskemiseksi esitettyjä korrelaatiokaavoja.

Jos sade koostuu keskenään samankokoisista sadepisaroista, voidaan kuvitteellisille vaaka- ja pystyinnoille tulevien sateen intensiteettien yhteys kirjoittaa seuraavasti:

$$R_{\text{wdr}} = \frac{U}{V_t} \cdot R_h \quad (4.3.1)$$

missä

- R_{wdr} on viistosateen intensiteetti [mm/h]
 U on tuulen vaakasuuntainen nopeus [m/s]
 R_h on vaakapinnalle tulevan sateen intensiteetti [mm/h]
 V_t on sadepisaran terminaalinopeus, joka riippuu pisaran koosta [m/s].

Todellisessa sateessa on useita eri pisarakokoja. Best (1950) on muun muassa esittänyt sateen intensiteetin ja pisarakoon jakauman väliselle yhteydelle seuraavan kaavan:

$$F(d) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{d}{A \cdot R_h^p}\right)^n\right) \quad (4.3.2)$$

missä

- d on sadepisaran halkaisija [mm]
 R_h on vaakapinnalle tulevan sateen intensiteetti [mm/h]
 A, p ja n ovat kokeellisesti määritettyjä parametreja [-].
 $F(d)$ on pisarakoon kertymäfunktio ilmassa.

Parametreille A, p ja n on kokeellisesti määritetty arvot 1,3, 2,25 ja 0,232. Pisarakoon tiheysfunktio saadaan kertymäfunktion derivaattana:

$$f(d) = \frac{dF}{dd} \quad (4.3.3)$$

missä

- $f(d)$ on pisarakoon tiheysfunktio ilmassa [1/m]
 dF/dd on pisarakoon kertymäfunktion derivaatta pisarakoon suhteen.

Pienemmät pisarat tippuvat hitaammin kuin suuremmat pisarat, joten kuvitteellisen vaakapinnan läpi kulkevan sateen pisarakokojakauma saadaan painottamalla ilman pisarakokojakaumaa pisaroiden putoamisnopeuksien suhteessa:

$$f_h(d) = \frac{f(d) \cdot V_t(d)}{\int f(d) \cdot V_t(d) dd} \quad (4.3.4)$$

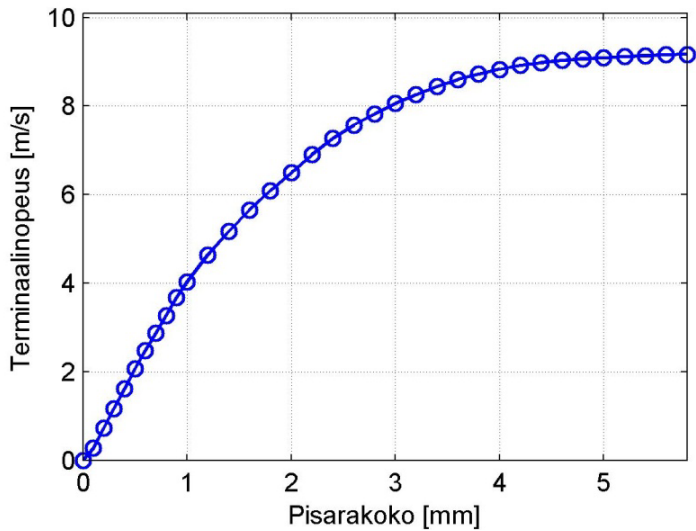
missä

- $f_h(d)$ on pisarakoon tiheysfunktio vaakapinnan läpi [1/m]. (Blocken & Carmeliet 2002)

Muun muassa Gunn & Kinzer (1949) ovat mitanneet eri kokoisten pisaroiden terminaalinopeuksia. Mittaustuloksien regressiolla saadaan pisaroiden terminaalinopeuden laskentakaavaksi:

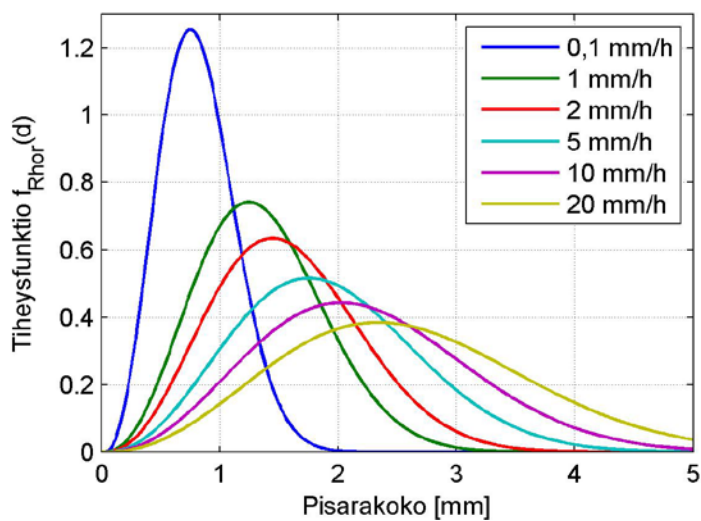
$$V_t(d) = -17,63 + \frac{27,04}{1 + \exp(-0,7786 \cdot d - 0,5951)} \quad (4.3.5)$$

Seuraavassa kuvassa on esitetty lähteessä Gunn & Kinzer (1949) esitetyt mittaustulokset sekä niihin sovitettu funktio.



Kuva 4.3.2 Halkaisijaltaan erikokoisten vesipisaroiden terminaalinopeuksia. Yksittäiset pisteet ovat lähteen Gunn & Kinzer (1949) mukaiset mittaustulokset ja yhtenäinen viiva on niihin sovitettu eksponenttifunktio.

Näiden tietojen avulla voidaan esittää vaakapinnan lävistävän sateen pisarakoon jakauma halutulla sateen intensiteetillä, josta on annettu esimerkki seuraavassa kuvassa. (Blocken & Carmeliet 2002)



Kuva 4.3.3 Pisaroiden terminaalinopeuksilla (Gunn & Kinzer 1949) painotettu sateen pisarakojakauma (Best 1950) vaakapinnalle tulevan sateen eri intensiteeteillä.

Jos viistosateen määrää mitataan kenttäolosuhteissa, saadaan tuloksena tyypillisesti kokonaissademäärä ilman tietoa sateen pisarakokojakaumasta. Avoimella paikalla tehdyt kenttämittaukset johtivat huomioon, että viistosateen määrä oli usein lähes suoraan verrannollinen tuulen nopeuteen ja vaakapinnalle tulevan sateen intensiteettiin. Hoppestad (1955) esitti käytettäväksi kaavaa 4.3.6 vapaan viistosateen laskemiseksi. (Blocken & Carmeliet 2004)

$$R_{\text{wdr}} = \kappa \cdot U \cdot R_h \quad (4.3.6)$$

missä

κ on kokeellisesti määritettävä viistosadekerroin avoimella paikalla [s/m]

U on tuulen vaakasuuntainen nopeus [m/s].

Keskimääräisiä viistosadekerroimen arvoja on määritetty muun muassa paikkakunnille: Oslo ($\kappa = 0,130$), Bergen ($\kappa = 0,188$), Trondheim ($\kappa = 0,221$) ja Tromsö ($\kappa = 0,148$). Käytännössä jo mittalaitteen olemassaolo muuttaa hieman olosuhteita vapaaseen virtauskenttään verrattuna. Tästä huolimatta mittaustuloksista käytetään vapaan viistosateen nimitystä. Lacy (1965; 1977) tutki sadepisarajakauman mediaanin yhteyttä vaakapinnalle tulevan sateen intensiteettiin sekä edelleen sadepisaroiden terminaalinopeuteen. Tutkimusten perusteella hän esitti yhtälön:

$$R_{\text{wdr}} = 0,222 \cdot U \cdot R_h^{0,88} \quad (4.3.7)$$

Yhtälöä yksinkertaistetaan usein korvaamalla eksponentti 0,88 arvolla 1,0. Straube & Burnett (1997) ovat huomanneet viistosadekerroimen olevan keskimääräisissä olosuhteissa välillä 0,2–0,25 s/m. Vaakapinnalle tulevan sateen intensiteetti ja sadetyyppi vaikuttavat kuitenkin huomattavasti viistosadekerroimen arvoon, jolloin vaihteluväli voi olla: 0,5 s/m (kevyt sade) – 0,1 s/m (rankka sadekuuro).

Edellä on käsitelty vapaan viistosateen määrää avoimella paikalla. Rakennuksen pinnalle tulevan viistosateen määrään vaikuttavat rakennuksen muoto, ympäristön pinnanmuodot ja tyyppi, tarkastelupisteen paikka julkisivussa, tuulen nopeus, tuulen suunta, tuulen turbulenssin intensiteetti, sateen intensiteetti, sateen pisarakoon jakauma sekä sateen kesto. Rakennukset ovat esteitä vapaasti virtaavalle tuulelle ja ne muuttavat tuulen suuntaa ja nopeutta.

Meteorologisissa mittauksissa mitataan tuulen suunta ja nopeus kymmenen metrin korkeudelta avoimella paikalla sekä sateen määrä vaakapinnalle. Rakennuksien pinnoille tulevan viistosateen laskemiseksi on esitetty käytettäväksi vastaavan tyyppistä kaavaa kuin vapaan viistosateen laskennassa:

$$R_{\text{wdr}} = \alpha \cdot U \cdot R_h \cdot \cos(\theta) \quad (4.3.8)$$

missä

- α on viistosadekerroin rakennuksen pinnalla [s/m]
 θ on seinän normaalin ja tuulen suunnan välinen kulma [rad tai °].

Jos seinän normaalin ja sitä vasten puhaltavan tuulen välinen kulma on yli 90°, ei seinäpinnalle katsota tulevan lainkaan viistosadetta. Toisin sanoen seinän ”takaa” tuleva sade ei osu tarkasteltavaan pintaan. Rakennuksen pintaa koskevan viistosadekertoimen on havaittu vaihtelevan huomattavasti ja eri tutkimuksien tulokset ovat olleet välillä 0,02–0,26 s/m.

Kaavan muoto on yksinkertainen, mutta rakennuksen pintaa koskevan viistosadekertoimen määrittäminen on haastava tehtävä. Yleisesti ottaen seinäpinnalle tuleva viistosade voidaan määrittää: 1) mittauksin, 2) yksinkertaistettujen kaavojen avulla tai 3) CFD-laskennan avulla. Mittauksien avulla on mahdollista saada todellista raakadataa toteutuneista olosuhteista, mutta toisaalta viistosateen kenttä- ja laboratoriomittaukset ovat työläitä tehdä ja ovat herkkiä virheille. Yksinkertaistettujen kaavojen avulla saadaan suhteellisen pienellä vaivalla laskettua arvio viistosateen määrälle julkisivupinnoilla, mutta tällä hetkellä olemassa olevat menetelmät antavat ainoastaan karkean tason arvioita viistosateen määrälle. Virtauslaskennan (CFD-laskennan) avulla on mahdollista ottaa huomioon todellisen tilanteen geometria ja monia muita reunaehtoja halutulla tarkkuudella, mutta laskentatarkastelujen toteuttaminen ja tulkinta edellyttää erityisosaamista ja vaatii huomattavan määrän tietokoneiden laskentakapasiteettia. (Blocken & Carmeliet 2004)

Seuraavassa tehty yksinkertaistettujen laskentamenetelmien esittely perustuu lähteisiin Blocken & Carmeliet (2004; 2010).

Mittauksien ja CFD-laskennan hyviä puolia on pyritty yhdistämään yksinkertaisiin laskentamenetelmiin, jotta mahdollisimman pienellä vaivalla saataisiin mahdollisimman tarkkoja tuloksia. Tämän kategorian mukaisia laskentamenetelmiä ovat ainakin 1) standardin SFS-EN ISO 15927-3 (2009) laskentamenetelmä, 2) Strauben (1998) ja Strauben & Burnettin (2000) esittämä menetelmä sekä 3) Blockenin & Carmelietin (2002; 2007) esittämä menetelmä.

SFS-EN ISO 15927-3 (2009) standardi sisältää menetelmän tunnittaisen sadekuorman laskemiseksi rakennusten pystypinnoille. Standardin esittämä laskentakaava on muotoa:

$$R_{\text{wdr}} = C_R \cdot C_T \cdot O \cdot W \cdot \frac{2}{9} \cdot U_{10} \cdot R_h^{8/9} \cdot \cos(\theta) \quad (4.3.9)$$

missä

- C_R on rakennuksen korkeuden ja maaston rosoisuuden huomioon ottava kerroin [-]
 C_T on ympäröivät maaston muodot (esim. mäet) huomioon ottava kerroin [-]
 O on ympäröivät tuuliesteet (toiset rakennukset) huomioon ottava kerroin [-]

W on itse rakennuksen koon ja muodon huomioon ottava kerroin (taulukoista) [-]
 U₁₀ on tuulen vaakasuuntainen nopeus 10 m korkeudella maanpinnasta [m/s].

Kaavasta 4.3.9 voidaan määrittää viistosadekerroin α yhtälöllä:

$$\alpha = C_R \cdot C_T \cdot O \cdot W \cdot \frac{2}{9} \quad (4.3.10)$$

Tarkastellaan seuraavaksi matalan rakennuksen yläosaa 5 m korkeudella maanpinnasta ja korkean rakennuksen yläosaa 24 m korkeudella maanpinnasta. Oletetaan, että tarkasteltavan rakennuksen ympärillä on tasainen maasto, jonka pinnan rosoisuus on sama kuin meteorologisella mittauspaikalla ja että rakennuksen lähetyvillä ei ole tuuliesteitä. Tällöin kertoimet C_T ja O saavat arvon 1,0. Lisäksi oletetaan, että tuuli puhaltaa kohtisuorasti seinäpintaa vasten ja että rakennuksessa ei ole räystäitä. Kaavan 4.3.10 avulla saadaan tällöin seinään liittyväksi viistosadekertoimeksi matalalle rakennuksen (5 m) yläreunassa $\alpha = 0,097$ ja korkean rakennuksen (24 m) yläreunassa $\alpha = 0,130$. Standardin SFS-EN ISO 15927-3 (2009) mukaan laskettaessa viistosadekuormitus on suurin rakennuksen yläosassa, mutta ei vaihtele rakennuksen leveysuunnassa.

Tehdään vertailulaskelma Strauben & Burnettin (1998; 2000) laskentamallilla. Tässä mallissa rakennuksen pinnan viistosadekerroin lasketaan seuraavasti:

$$\alpha = DRF \cdot RAF \cdot \left(\frac{z}{10} \right)^\beta \quad (4.3.11)$$

missä

DRF on sadepisaran terminaalinopeuden käänteisluku [s/m]
 RAF on rakennuksen koosta ja muodosta riippuva kerroin [-]
 z on tarkastelukohdan korkeus maanpinnasta [m]
 β on tuulen nopeusprofiilin potenssi eri maastoluokissa [-].

Straube ja Burnett suosittelevat pisaran terminaalinopeuden laskemiseen Dinglen & Leen (1972) esittämää funktiota (Blocken & Carmeliet 2004):

$$V_t(d) = -0,166033 + 4,91844 \cdot d - 0,888016 \cdot d^2 + 0,054888 \cdot d^3 \leq 9,2 \text{ m/s} \quad (4.3.12)$$

Pisarakokona Straube & Burnett suosittelevat käyttämään Bestin (1950) esittämän sadepisarajakauman mediaania $d = 0,105 R_h^{0,232}$. Käytetään sadepisaran terminaalinopeutena 4,5 m/s, joka vastaa Lacyn esittämässä kaavassa 4.3.7 esiintyvää vapaan viistosateen keskimääräistä viistosadekerrointa ($1/4,5 \text{ m/s} = 0,222 \text{ s/m}$). Lähteessä Blocken & Carmeliet

(2010) esitettyjen kuvien perusteella valitaan RAF-termiksi annetun vaihteluvälin yläraja-arvo 1,0. Valitaan potenssin β arvoksi 0,16 (Blocken & Carmeliet 2010). Näillä tiedoilla saadaan matalan rakennuksen (5 m) yläreunan viistosadekertoimeksi $\alpha = 0,199$ ja korkean rakennuksen (24 m) yläreunan viistosadekertoimeksi vastaavasti $\alpha = 0,255$. Tämän menetelmän yläraja-arvoa käytettäessä viistosadekertoimiksi saatiin siis huomattavasti suurempia lukuja kuin Standardilla SFS-EN ISO 15927-3 (2009).

Choi (1991; 1993; 1994) kehitti CFD-laskentaan perustuvan menetelmän rakennuksen pinnalle tulevan viistosateen määrän laskemiseksi. Rakennuksen seinälle osuvan viistosateen ja vapaasti vaakapinnalle satavan sateen viistosadesuhde η (engl. catch ratio) on menetelmässä olennainen muuttuja, joka määritetään erikseen sekä kullekin pisarakoolle että koko pisarakokojen jakaumalle.

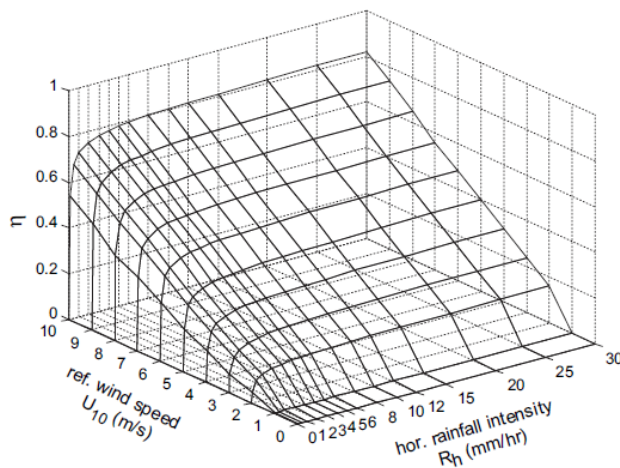
$$\eta_d(d) = \frac{R_{wdr}(d)}{R_h(d)}, \eta = \frac{R_{wdr}}{R_h} \quad (4.3.13)$$

missä

$\eta_d(d)$ on yksittäisen pisarakoon viistosadesuhde [-]

η on viistosadesuhde integroituna koko pisarakokojakauman yli [-].

Blocken ja Carmeliet (2002, 2007) jatko kehittivät tätä menetelmää ja tuottivat muun muassa taulukoita ja kuvaajia viistosadesuhteesta. Viistosadesuhde on laskettu aina tietylle tuulen suunnalle ja nopeudelle, vaakapinnalle tulevan sateen intensiteetille sekä julkisivun tarkastelupisteelle. Esimerkki laskennan tuloksena saatavasta kuvaajasta on esitetty kuvassa 4.3.4.



Kuva 4.3.4

Esimerkki viistosadesuhteesta tuulen nopeuden ja vaakapinnalle tulevan sateen intensiteetin funktiona. Arvot on laskettu tietyille tuulen suunnalle ja tietyille julkisivun tarkastelupisteelle. (Blocken & Carmeliet 2010)

Tuulen nopeus vaikuttaa olennaisesti viistosateen määrään. Kuvassa 4.3.4 viistosadesuhde on pienillä tuulen nopeuksilla 0, koska kyseisessä tapauksessa räystäät suojaavat tarkastelupisteen kohtaa. Myös sateen intensiteetti vaikuttaa rakennuksen seinäpinnoille tulevan viistosateen määrään. Mitä rankempi yksittäinen sadekuuro on (mm/h), sitä suuremmista pisaroista se muodostuu. Suuremmat sadepisarat eivät ole niin herkkiä vaakasuuntaiselle tuulelle kuin pienemmät sadepisarat. Keskimääräinen pisarakoko ei kuitenkaan kasva loputtomasti sateen intensiteetin kasvaessa, josta syystä pisarakoon vaikutus vähenee pienimpien vaakapinnalle tulevan sateen intensiteetin arvojen jälkeen. Rakennuksen pinnan viistosadekerroin lasketaan viistosadesuhteesta seuraavasti:

$$\alpha = \frac{\eta}{U_{10} \cdot \cos(\theta)} \quad (4.3.14)$$

Viistosaderasitusta laskettaessa kaavojen 4.3.11 ja 4.3.14 viistosadekertoimet sijoitetaan kaavaan 4.3.8, jossa termin R_h potenssi on 1,0. Kaavan 4.3.10 viistosadekertoimet sisältyvät sen sijaan kaavaan 4.3.9, jossa vastaava potenssi on 0,88.

Kenttämittausten ja CFD-laskentatulosten perusteella on tehty muun muassa seuraavia päätelmiä: virtauslaskennan avulla on mahdollista laskea viistosateen määriä rakennuksen pinnalla kohtalaisen hyvällä tarkkuudella. Tuulen nopeus kiihtyy rakennuksen tuulenpuoleisen julkisivun laidoilla, missä yhteydessä kosteuskuormitus näihin rakenteiden osiin kasvaa (sweeping effect). Vastaavasti taas julkisivun keskiosat ovat reunoja paremmin suojassa ja niihin kohdistuu täten reunoja pienempi viistosaderasitus. Ilmiö on myös sitä suurempi, mitä suuremmasta rakennuksesta on kyse (wind blocking effect). Yksinkertaisissa laskentamenetelmissä käytetty tuulen kosiniprojektio voi tuottaa suhteellisesti suuren virheen CFD-laskelmiin verrattuna (Blocken & Carmeliet 2002, 2006a, 2006b), mutta rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta vaikutus voi olla pieni (Janssen et al. 2007).

Edellä on käsitelty julkisivupinnalle kohdistuvan viistosateen määrää, mutta tämän lisäksi on tarpeen tietää sadeveden käyttäytyminen sen osuttua julkisivun pintaan. Yleisesti ottaen osa pintaan kohdistuvasta sateesta voi roiskua kokonaan pois, osa absorboitua pintamateriaaliin, osa jäädä julkisivun pintaan ja osa valua pintaa pitkin alas. Märästä pinnasta kosteus lähtee sekä kapillaarisesti että diffuusiolla siirtymään kohti rakenteen kuivempia osia. Vasta kun vettä on siirtynyt kapillaarisesti pinnasta eteenpäin, voi materiaaliin absorboitua lisää vettä sateesta. Näin ollen sateen intensiteetti voi vaikuttaa rakenteen kosteuskuormitukseen myös tätä kautta. Jos rakenteeseen kohdistuu vain silloin tällöin lyhyitä, mutta erittäin rankkoja sadekuuroja, voi vain osa sateesta kuormittaa rakennetta. Useimmat laskentaohjelmat jättävät yli menevän osan kokonaan pois laskennasta. Vastaavasti taas pitkäkestoinen rauhallinen sade voi pitää julkisivupinnan pitkään märkänä, jolloin rakenne ei pääse kuivumaan vaan varastoi vettä ja toimii kosteuslähteenä ympäristöönsä. (Grunewald & Nicolai 2006; Künzeli 1995)

Edellä esitettyjen tutkimustulosten ja esimerkkitarkastelujen perusteella voidaan todeta, että viistosadekertoimen arvo $\alpha = 0,2$ kuvaa kohtuullisen hyvin kriittistä viistosateen määrää avoimella paikalla olevan rakennuksen pystysuoralla seinäpinnalla. Tästä syystä tätä kerrointa on käytetty myös tässä tutkimuksessa yli 10 m korkeudessa olevien seinäpintojen viistosaderasituksen laskennassa (korkeat rakennukset). Matalille enintään 10 m korkeille rakennuksille kohdistuvan viistosaderasituksen laskennassa on käytetty viistosadekerrointa 0,07. Tätä kerrointa on käytetty oletuskertoimena matalille rakennuksille myös WUFI-ohjelmassa, jolla tehtiin kaikki FRAME-projektin seinärakennetarkastelut. Viistosateen määrä laskettiin kaavalla 4.3.8, jossa vaakapinnalle tulevan sateen intensiteetin R_h potenssi oli 1,0. On kuitenkin huomattava, että käytetyt viistosadekertoimen arvot ovat yleisarvoja ja viistosaderasitus voi olla paikallisesti, esimerkiksi rakennuksen ylänurkissa, huomattavasti suurempi kuin edellä mainituilla viistosadekerroimilla lasketut arvot.

Ennen viistosateen laskentaa tehtiin lisäksi sellainen muutos Ilmatieteen laitoksen säädäntään sekä nykyilmaston että tulevaisuuden ilmaston osalta, että vaakapinnalle tulleesta sademäärästä poistettiin lumisateen osuus, koska lumena tuleva vesi ei juuri imeydy seinän ulkopintaan. Lumisateeksi oletettiin alle 0 °C lämpötilassa tullut sade (ulkoilman lämpötilan keskiarvo < 0 °C viimeisimmän kolmen tunnin ajalta). Sademäärien muokkaus tehtiin etukäteen, koska testivuosien määrittämisessä käytetty WUFI-ohjelma ei erottele vesi- ja lumisadetta toisistaan.

4.4 Testivuosien määrittäminen ulkoilman olosuhteiden avulla

Periaatteessa yksinkertaisin tapa rakennusfysikaalisen testivuoden määrittämiseksi on määrittää se pelkästään ulkoilman olosuhdetekijöiden perusteella, koska tällöin tarkasteluissa ei tarvitsisi ottaa eri rakenteiden vaikutusta huomioon. Myös testivuoden valintaan liittyvien laskentatarkastelujen määrä pysyisi tällöin kohtuullisena. Tällaisia testivuosia on määritetty aiemmin (Sanders 1996; Djeppar et al. 2001; Vinha 2007), ja ne voivat edustaa kriittisiä ulkoilman olosuhteita kohtuullisen hyvin silloin, kun tarkastellaan rakenteita, joiden kosteustekninen toiminta riippuu vain joistakin ulkoilman olosuhdetekijöistä – esimerkiksi lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta. Toisaalta useissa tutkimuksissa on tuotu esiin myös se, että testivuosien valinnassa tulee ottaa huomioon myös tarkasteltavat rakenteet (Rode 1993; Geving 1997; Harderup 1998; Salonvaara et al. 2010).

FRAME-tutkimuksessa pyrittiin aluksi määrittämään useille eri rakenteille soveltuvia testivuosia pelkästään ulkoilman olosuhteiden perusteella. Tässä yhteydessä tarkasteluihin valittiin kussakin tapauksessa ainoastaan kaksi tärkeimmäksi arvioitua ulkoilman olosuhteiden vertailusuuretta (taulukko 4.4.1). Valitusta mittausdatasta pyrittiin tällä tavoin seulomaan vuosia, joissa nämä vertailusuureet edustaisivat 120 vuoden ryhmän kriittistä ääripäätä. Testivuosiehdokkaita etsittiin myös painottamalla valinnassa vertailusuureiden merkitystä eri tavoin.

Tämän jälkeen valittujen testivuosisiehdokkaiden kriittisyyttä tarkasteltiin mallintamalla eri testirakenteiden (tiili- ja puuverhottu rankaseinä sekä eristerapattu betoniseinä, ks. liite 3) kosteusteknistä toimintaa näiden vuosien olosuhteissa.

Taulukko 4.4.1 *Ulkoilman olosuhteiden perusteella määritettyjen testivuosisiehdokkaiden valinnassa käytetyt ulkoilman olosuhteiden vertailusuureet.*

Toimintakriteeri	Ulkoilman olosuhteiden vertailusuureita	Tarkasteltava suure rakenteessa
Homeen kasvu	<u>Rakenteen ulko-osan tarkastelut</u> <ul style="list-style-type: none"> • Homeindeksin maksimiarvo ulkoilmassa vuoden ajanjaksolla, M_{max} • Viistosateen määrä 60 vrk ennen homeindeksin maksimiarvon saavuttamista, WDR_{60d} <u>Rakenteen sisäosan tarkastelut</u> <ul style="list-style-type: none"> • Ulkoilman vesihöyrypitoisuuden kahden kuukauden keskiarvon maksimiarvo, $v_{max, 60d}$ • Viistosateen määrä ulkoilman vesihöyrypitoisuuden keskiarvon laskentajaksolla, WDR_{60d} 	<ul style="list-style-type: none"> • Homeindeksin maksimiarvo, M_{max}
Kosteuden kondensoituminen	<u>Rakenteen ulko-osan tarkastelut</u> <ul style="list-style-type: none"> • Ulkoilman kosteusvajeen kuukauden keskiarvon minimiarvo, $\Delta v_{def, min, 30d}$ • Viistosateen määrä ulkoilman kosteusvajeen keskiarvon laskentajaksolla, WDR_{30d} <u>Rakenteen sisäosan tarkastelut</u> <ul style="list-style-type: none"> • Ulkoilman vesihöyrypitoisuuden kahden kuukauden keskiarvon maksimiarvo, $v_{max, 60d}$ • Viistosateen määrä ulkoilman vesihöyrypitoisuuden keskiarvon laskentajaksolla, WDR_{60d} 	<ul style="list-style-type: none"> • Kondensoituneen kosteuden maksimimäärä, m_{max} • Yhtäjaksoinen kondensoitumisaika, t_{max}

Tarkastelun perusteella todettiin kuitenkin, että käytetyillä valintamenetelmillä ei saada luotettavalla tavalla selville niitä vuosia, jotka synnyttävät kriittisimmät kosteusolosuhteet rakenteiden sisällä. Tämä johtuu ensinnäkin siitä, että todellisuudessa monien rakenteiden kosteustekniseen toimintaan vaikuttavat lähes kaikki luvussa 4.1 luetelluista ulkoilman olosuhdetekijöistä, ja rakenteesta riippuen erilaiset olosuhdeyhdistelmät ja olosuhteiden vaihtelu synnyttävät niihin kriittisiä kosteusolosuhteita. Esimerkiksi voimakkaan viistosateen vaikutus on oleellinen niissä rakenteissa, joissa sadevesi pääsee imeytymään ulkoverhoukseen tai sen takana olevaan seinärakenteeseen. Viistosateen synnyttämään kosteusrasitukseen vaikuttaa toisaalta myös auringonsäteily, joka lämmittäessään kastunutta ulkoverhousta pyrkii samalla ajamaan osan kosteudesta diffuusiolla rakenteen sisään. Näin ollen rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta kriittisiä vuosia ei saada luotettavasti selville pelkästään kahden ulkoilmaa kuvaavan vertailusuureen avulla.

Lisäksi rakenne ja siinä käytettyjen materiaalien ominaisuudet, kuten esimerkiksi kosteuskapasiteetti, vesihöyrynläpäisevyys ja kapillaarisuus vaikuttavat rakenteen sisällä oleviin kosteusolosuhteisiin siten, että muutokset tapahtuvat viiveellä ulkoilmaan nähden.

Erilaisesta muutosnopeudesta johtuen kosteusolosuhteet voivat olla rakenteen sisällä ajoittain merkittävästi paremmat tai huonommat kuin rakenteen ulkopinnalla.

Laskentatulokset osoittivat, että testivuodet on määritettävä erilaisten testirakenteiden avulla vertaamalla rakenteiden kosteusteknistä toimintaa eri vuosina.

4.5 Testivuosien määrittäminen testirakenteiden avulla

4.5.1 Yleistä

Tässä menetelmässä rakennusfysikaalisten testivuosien määrittämiseksi valittiin erilaisia testirakenteita (taulukko 4.5.1), joiden kosteusteknistä toimintaa tarkasteltiin kaikilla 120 vuodella kussakin ilmastossa. Tällä tavalla tarkasteluihin saatiin mukaan sekä ulkoilman olosuhteiden yhteisvaikutus että rakenteiden vaikutus oikealla tavalla, mutta toisaalta tarkastelu edellytti suurta määrää laskentatarkasteluja. Lähes kaikilla testirakenteilla tehtiin yhteensä 360 laskentapausta kolmessa eri ilmastossa.

Eri testirakenteilla tehtiin vertailulaskelmia myös mm. ilmansuunnan, rakennuksen korkeuden, materiaaliominaisuuksien, tuuletuksen, sadeveden imeytymisen sekä laskenta-ajan aloitushetken ja pituuden vaikutuksista homeen kasvuun ja kosteuden kondensoitumiseen.

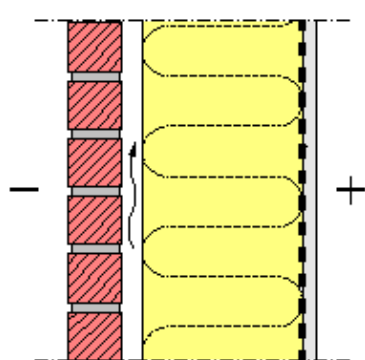
Taulukko 4.5.1 Rakennusfysikaalisten testivuosien määrittämisessä käytetyt testirakenteet. Taulukossa on esitetty myös ulkoilman olosuhdetekijöiden vaikutus eri rakenteiden kosteustekniseen toimintaan (merkinnät: X = olosuhdetekijällä on merkittävä vaikutus, (X) = olosuhdetekijällä on jonkin verran vaikutusta, O = olosuhdetekijällä ei ole merkittävää vaikutusta rakenteen toimintaan).

Testirakenne	Käytetyt lämmön-eristeet	Ulkoilman olosuhdetekijöiden vaikutus rakenteen sisäosan kosteustekniseen toimintaan				
		Lämpö-tila	RH	Sade/viisto-sade	Auringon-säteily	Lämpö-säteily taivaalle
1. Tiiliverhottu rankaseinä	lasivilla	X	X	X	X	(X)
2. Puuverhottu rankaseinä	lasivilla, puukuitueriste	X	X	O	(X)	X
3. Eristerapattu betoniseinä (paksurappaus)	lasivilla	X	X	X	X	X
4. Betonisandwich	lasivilla	X	(X)	(X)	(X)	(X)
5. Sisäpuolelta lisäeristetty hirsiseinä	lasivilla	X	O	O	(X)	(X)
6. Tuulettumaton yläpohja	lasivilla	X	O	O	X	X
7. Vähän tuulettu yläpohja	lasivilla	X	(X)	O	X	X
8. Tuulettu yläpohja	puukuitueriste	X	X	O	X	X

Testirakenteet pyrittiin valitsemaan siten, että erilaisilla ulkoilman olosuhdetekijöiden yhdistelmillä olisi vaikutusta niiden kosteustekniseen toimintaan. Rakenteissa oli mukana julkisivuverhouksia, jotka estivät sadeveden pääsyn syvemmälle rakenteeseen ja verhouksia, joihin sadevesi pääsi imeytymään. Rakenteet erosivat toisistaan myös kosteuskapasiteettien suhteen. Lisäksi rakenteet pyrittiin valitsemaan sellaisiksi, että niissä esiintyisi kosteuden kondensoitumiselle ja homeen kasvulle otollisia olosuhteita.

Erityyppisten testirakenteiden avulla pyrittiin selvittämään sitä, kuinka paljon rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta kriittiset vuodet vaihtelevat eri rakenteilla. Koska rakenteet otettiin mukaan jo testivuosien valintaan, saattoi tarkastelun lopputulos olla periaatteessa jopa sellainen, että kullekin rakennetyypille tulisi määrittää oma testivuosi. Tämä hankaloittaisi kuitenkin oleellisesti testivuosien käyttöä laskentatarkasteluissa. Lisäksi, kuten jo aiemmin luvussa 3 todettiin, kullekin toimintakriteerille voidaan joutua määrittelemään omia testivuosia, koska eri toimintakriteerien kannalta kriittiset ulkoilman olosuhdeyhdistelmät ovat usein erilaisia ja vaikuttavat eri aikaan vuodesta. Tämä voi pahimmassa tapauksessa lisätä testivuosien määrää vielä entisestään. Testivuosien sujuvan käytön kannalta on kuitenkin tärkeää, että niitä on mahdollisimman vähän.

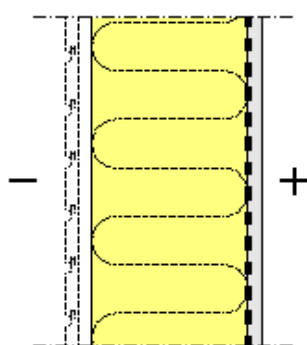
Kuvissa 4.5.1 ja 4.5.2 on esitetty esimerkkinä testirakenteiden 1 ja 2 rakennekerrokset. Kaikkien testirakenteiden rakennekerrokset on esitetty liitteessä 3. Näitä samoja testirakenteita käytettiin myös ulkoilman olosuhteiden perusteella määritettyjen testivuosiehdokkaiden kosteusteknisen toiminnan tarkasteluissa (ks. luku 4.4).



Rakennekerrokset ulkoa sisälle päin:

Tiiliverhous 85 mm
 Tuuletusväli 30 mm
 Tuulensuojakalvo
 Lasivilla 250
 Höyrynsulkumuovi
 Kipsilevy 13 mm

Kuva 4.5.1 Testivuosien määrittämisessä käytetty tiiliverhottu rankaseinä.



Rakennekerrokset ulkoa sisälle päin:

Puuverhous 20 mm
 Tuuletusväli 20 mm
 Tuulensuojakalvo
 Lasivilla 250 mm
 Höyrynsulkumuovi
 Kipsilevy 13 mm

Kuva 4.5.2 Testivuosien määrittämisessä käytetty puuverhottu rankaseinä.

Homeen kasvua ja kosteuden kondensoitumista tarkasteltiin testirakenteissa lämmöneristeen ulko- ja sisäpinnassa, joissa esiintyy rakenteen toiminnan kannalta kriittisimmät lämpötila- ja kosteusolosuhteet. Sisäilman kosteuslisänä käytettiin laskennassa kosteusluokan 2 mukaista kosteuslisää (ks. kuva 3.2.2). Laskennassa käytetyt materiaaliominaisuudet on esitetty liitteessä 1.

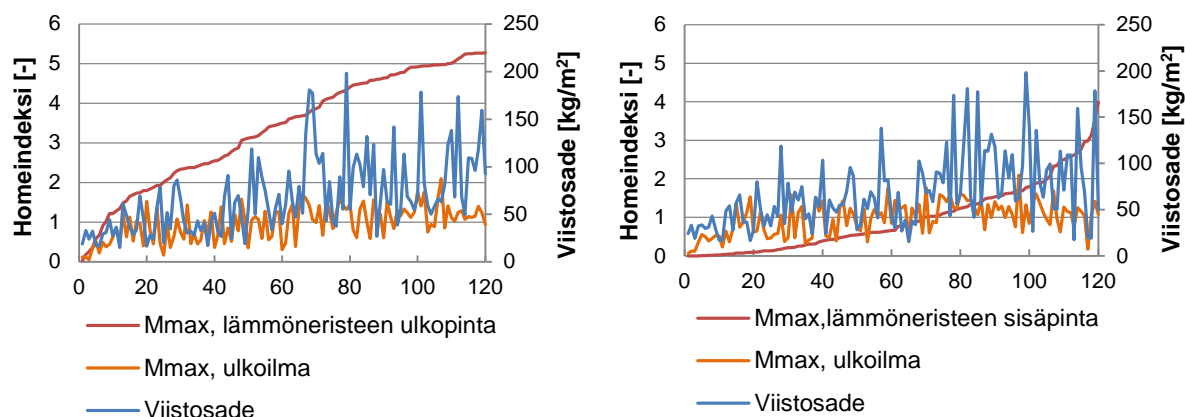
Laskenta toteutettiin siten, että jokaisen vuoden ulkoilman olosuhteissa laskettiin 2–3 vuoden pituinen ajanjakso ja homeindeksin maksimiarvo sekä kondensoituneen kosteuden määrä laskettiin viimeisen laskentavuoden lämpötila- ja RH-arvojen perusteella. Homeindeksin maksimiarvot laskettiin testivuositarkasteluissa yleensä aina homehtumisherkkyyssluokassa HHL2, jotta eri vuosien välille saatiin riittävän suuret erot ja jotta homeindeksille saatiin arvoja myös niissä tarkastelupisteissä, joissa homehtumisriski oli vähäisempi. Todellisuudessa lämmöneristeen sisä- ja ulkopinnan homehtumisherkkyyssluokka olisi ollut testirakenteissa 3 tai 4. Varsinaisissa eri rakenneratkaisujen homehtumisriskitarkasteluissa käytettiin kuitenkin aina tarkasteltavaan pintaan rajoittuvien materiaalien mukaista homehtumisherkkyyssluokkaa (ks. luku 6).

Puuverhottu rankaseinä mallinnettiin testivuositarkasteluissa ilman viistosateen ja ulkoverhouksen vaikutusta. Viistosadetta ei otettu tarkasteluihin mukaan, koska puuverhous estää oikein toteutettuna sen vaikutuksen rakenteen sisäosiin. Tällöin rakenteesta voitiin jättää myös ulkoverhous pois, jolloin olosuhteet rakenteen sisällä saatiin muuttumaan homeen kasvun ja kosteuden kondensoitumisen kannalta hieman kriittisemmiksi. Tällä menettelyllä eri vuosien väliset erot homeindeksin maksimiarvoissa saatiin paremmin esiin. Varsinaisissa puurunkoisten rakenteiden laskentatarkasteluissa viistosade ja ulkoverhous olivat kuitenkin tarkasteluissa mukana (ks. luku 6.2).

4.5.2 Eri tekijöiden vaikutus vuosien kriittisyystasoon nykyilmastossa

Tässä luvussa on esitetty eri tekijöiden vaikutuksia vuosien kriittisyystasoihin ja niiden vaihteluihin nykyilmastossa. Kaikissa laskentatuloksia esittävässä kuvassa on mukana koko 120 vuoden ryhmä, joka koostui Vantaan, Jokioisen, Jyväskylän ja Sodankylän 30 vuoden mittausdatasta.

Kuvassa 4.5.3 on tarkasteltu ulkoilman kosteusolosuhteita kuvaavien tekijöiden (viistosade ja ulkoilman homeindeksin maksimiarvo) vaikutuksia tiiliverhotun rankaseinän sisäosan homehtumisriskiin.



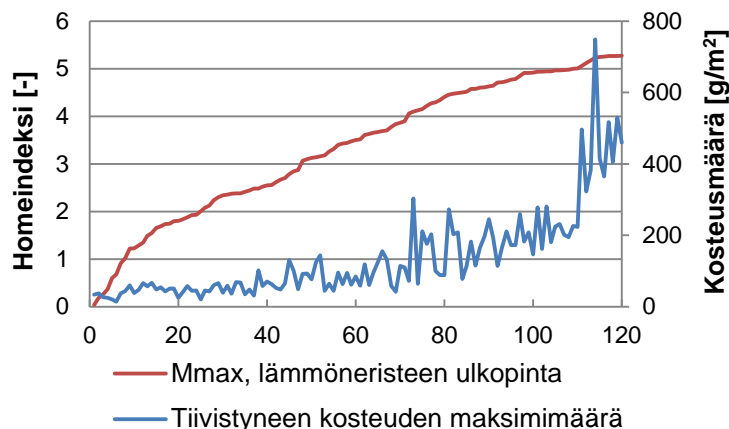
Kuva 4.5.3 Viistosateen ja ulkoilman homeindeksin maksimi-arvon (HHL2) vaikutus yli 10 m korkean tiiliverhotun rankaseinän homeutumisiin lämmöneristeen ulkopinnassa (vasen puoli) ja sisäpinnassa (oikea puoli) 120 vuoden ulkoilman olosuhteissa Suomen nykyilmastossa. Myös ulkoilman homeindeksi on laskettu homeutumisherkkyyssuokan HHL2 mukaisilla materiaaliominaisuuksilla. Vuodet on esitetty homeindeksin maksimi-arvojen mukaisessa kriittisyysjärjestyksessä.

Kuvasta 4.5.3 voidaan todeta ensinnäkin se, että eri vuosien välillä on erittäin suuria eroja sen suhteen, kuinka suuren homeutumisen ne saavat aikaan seinärakenteessa. Tämä osoittaa selvästi sen, kuinka tärkeää on löytää rakennusfysikaalisiin laskentatarkasteluihin juuri kaikkein kriittisimmät vuodet. Toki homeutumisen erot johtuvat osittain myös eri paikkakuntien maantieteellisistä eroista, sillä suurin osa rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta kriittisimmistä vuosista esiintyi Vantaalla ja vähiten kriittisimmät vuodet puolestaan Sodankylässä.

Kuvasta huomataan myös, että seinäpinnalle tulevan viistosateen määrällä ja ulkoilman homeindeksin maksimi-arvolla ei ole selvää yhteyttä rakenteen sisäosan homeindeksin maksimi-arvoihin. Lämmöneristeen ulkopinnasta lasketun homeindeksin voidaan tosin sanoa korreloivan jossain määrin näiden arvojen kanssa, kun tarkastellaan koko 120 vuoden sarjaa. Viistosateella ja ulkoilman homeindeksin maksimi-arvolla pitäisi kuitenkin olla yksittäisinä ulkoilman tekijöinä suurimmat vaikutukset myös tiiliverhotun rakenteen sisäosan kosteusolosuhteisiin.

Tulokset osoittavat, että tyypillisesti kaikilla ulkoilman olosuhdetekijöillä ja tarkasteltavalla rakenteella on merkittävä vaikutus siihen, kuinka kriittinen jokin vuosi on rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta. Tästä syystä rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta kriittisiä vuosia ei kyetty löytämään aikaisemmin tehdyissä tarkasteluissa, joissa testivuotia yritettiin määrittää pelkästään ulkoilman olosuhteiden perusteella (ks. luku 4.4).

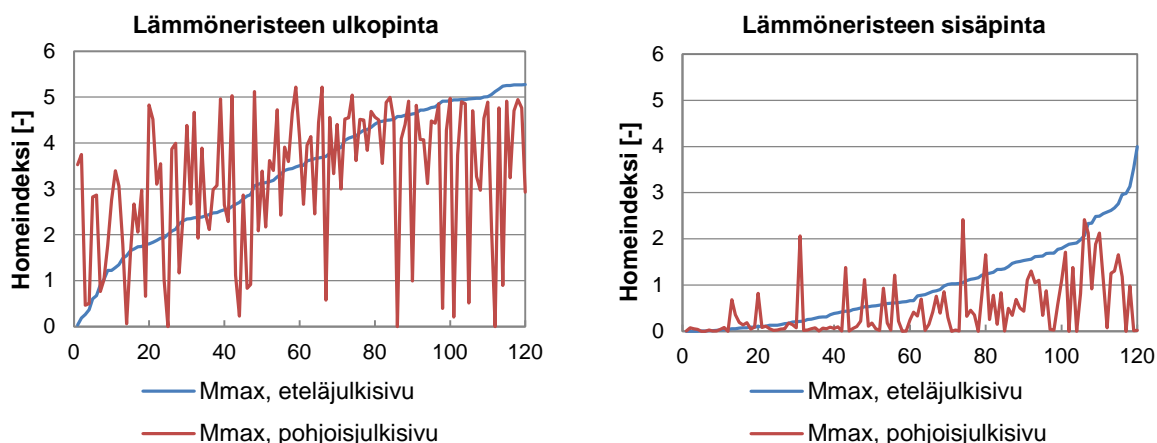
Kuvassa 4.5.4 on esitetty eri vuosien kriittisyys rakenteiden toimintakriteereiksi valittujen homeen kasvun ja kosteuden kondensoitumisen osalta tiiliverhotussa rankaseinässä.



Kuva4.5.4 Homeindeksin maksimi-arvot (HHL2) ja kondensoituneen kosteuden maksimimäärät lämmöneristeen ulkopinnassa yli 10 m korkeassa tiiliverhotussa ulkoseinässä 120 vuoden ulkoilman olosuhteissa Suomen nykyilmastossa. Vuodet on esitetty homeindeksin maksimi-arvojen mukaisessa kriittisyysjärjestyksessä.

Kuvasta 4.5.4 voidaan todeta, että homeen kasvu lämmöneristeen ulkopinnassa voi olla erittäin voimakasta, vaikka kosteuden kondensoituminen samassa kohdassa olisikin suhteellisen vähäistä. Puurakenteissa kondensoituneen kosteuden hyväksyttävänä maksimimääränä käytettiin tässä tutkimuksessa lämmöneristeen ulkopinnassa 150 g/m^2 . Kuvasta huomataan, että tämä raja-arvo alittui yli puolella tarkastelluista vuosista, mutta sen sijaan homeindeksin sallittuna maksimi-arvona käytetty 1,0 alittui ainoastaan alle 10 %:ssa vuosista. Tässä tapauksessa homehtumisriskin ja kosteuden kondensoitumisriskin välillä on havaittavissa kuitenkin kohtuullisen selkeä korrelaatio, joten näille toimintakriteereille on mahdollista löytää myös yhteisiä testivuotia.

Kuvassa 4.5.5 on tarkasteltu eri ilmansuuntien vaikutusta tiiliverhotun rankaseinän sisäosan homehtumisriskiin.

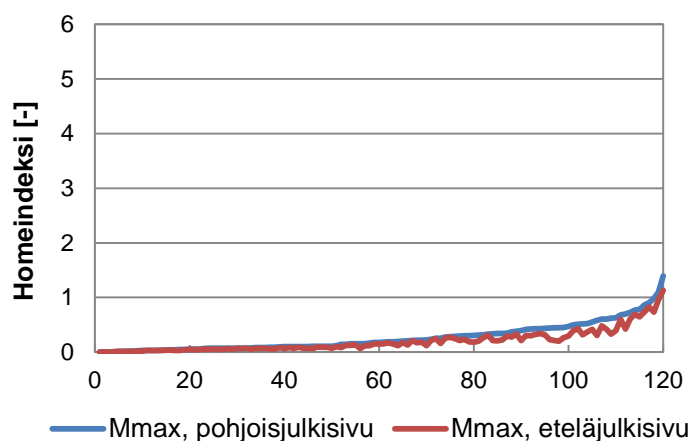


Kuva 4.5.5 Homeindeksin maksimi-arvo (HHL2) lämmöneristeen ulkopinnassa (vasen puoli) ja sisäpinnassa (oikea puoli) yli 10 m korkeassa tiiliverhotussa rankaseinässä etelä- ja pohjoissuunnassa 120 vuoden ulkoilman olosuhteissa Suomen nykyilmastossa. Vuodet on esitetty eteläsuunnan seinillä esiintyvien homeindeksin maksimi-arvojen mukaisessa kriittisyysjärjestyksessä.

Tarkasteltaessa kuvassa 4.5.5 homehtumisen kannalta kriittisimpiä vuosia nähdään, että tiiliverhotussa rankaseinässä eteläsuunta on rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta kriittisempi kuin pohjoissuunta (tosin lämmöneristeen ulkopinnassa erot ovat joinakin vuosina pieniä). Tämä johtuu mm. siitä, että eteläpuolen seinälle tulee Suomessa viistosadetta tyypillisesti enemmän kuin pohjoispuolen seinälle. Toisaalta eteläpuolen seinälle kohdistuu enemmän myös auringonsäteilyä, joka osittain kuivattaa tiiliverhousta, mutta pyrkii myös siirtämään tiiliverhoukseen imeytyneitä kosteutta seinän sisäosiin. Tämä yhteisvaikutus lisätynä muiden ulkoilman olosuhdetekijöiden vaikutuksella synnyttää rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta kaikkein rasittavimmat olosuhteet.

Kuvan perusteella voidaan todeta myös, että etelä- ja pohjoisseinien homehtumisriski voi vaihdella samana vuonna erittäin paljon eikä niiden välillä ole löydettävissä merkittävää korrelatiota myöskään tarkasteltaessa koko 120 vuoden sarjaa. Tämä osoittaa sen, että eri vuosina julkisivuille kohdistuvat viistosateet painottuvat eri ilmansuuntiin ja siksi rakennuksen kaikki ulkoseinät on tarpeellista mitoittaa kriittisimmän kosteusrasituksen mukaan.

Kuvassa 4.5.6 on esitetty eri ilmansuuntien vaikutus puuverhotun rankaseinän sisäosan homehtumisriskiin. Tässä tapauksessa kuvassa on esitetty ainostaan lämmöneristeen ulkopinnan homeindeksin maksimiarvot, sillä lämmöneristeen sisäpinnassa homeindeksit olivat kaikkina vuosina käytännössä 0.



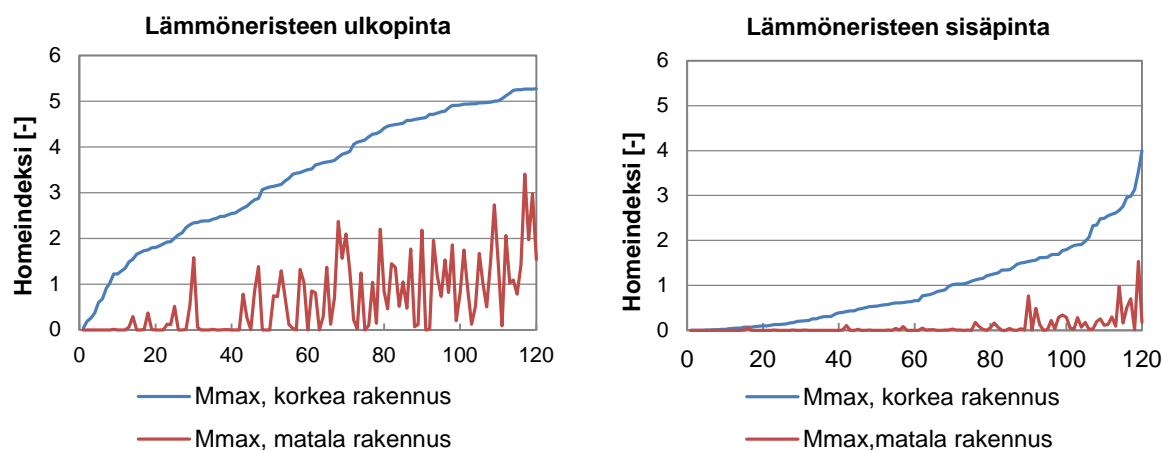
Kuva 4.5.6 Homeindeksin maksimiarvo (HHL2) lämmöneristeen ulkopinnassa yli 10 m korkeassa puuverhotussa rankaseinässä etelä- ja pohjoissuunnassa 120 vuoden ulkoilman olosuhteissa Suomen nykyilmastossa. Vuodet on esitetty pohjoissuunnan seinillä esiintyvien homeindeksin maksimiarvojen mukaisessa kriittisyysjärjestyksessä.

Kuvan 4.5.6 perusteella voidaan todeta, että puuverhotussa rankaseinässä pohjoissuunta on rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta hieman kriittisempi kuin eteläsuunta. Tämä johtuu siitä, että viistosade ei vaikuta rakenteen sisäosan toimintaan ja toisaalta auringonsäteilyn lämmittävä ja kuivattava vaikutus on pienimmillään pohjoisjulkisivulla. Tässä tapauksessa etelä- ja pohjoissuunnan laskentatulokset korreloivat myös varsin hyvin

keskenään. Kaiken kaikkiaan puuverhotussa rankaseinässä homehtumisriski on vähäinen vielä nykyilmastossa, kun ulkoverhous suojaa sisäpuolen rakennetta viistosateelta.

Verrattaessa kuvia 4.5.5 ja 4.5.6 toisiinsa havaitaan, kuinka merkittävä vaikutus valittavalla ulkoverhouksella voi olla rankarakenteen kosteustekniseen toimintaan (rakenteet olivat muilta osin keskenään samanlaiset). Tiiliverhouksen käyttö saa aikaan kriittisimpinä vuosina voimakkaan homehtumisriskin sekä lämmöneristeen ulko- että sisäpintaan, kun puuverhotussa ulkoseinässä hometta ei käytännössä kasva lainkaan. Tämä osoittaa sen, kuinka merkittävä yksittäisen rakennekerroksen vaikutus voi olla rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta.

Kuvassa 4.5.7 on tarkasteltu seinän korkeuden vaikutusta tiiliverhotussa rankaseinässä esiintyvään homehtumisriskiin.



Kuva 4.5.7 Homeindeksin maksimi-arvo (HHL2) lämmöneristeen ulkopinnassa (vasen puoli) ja sisäpinnassa (oikea puoli) korkeassa (> 10 m) ja matalassa (≤ 10 m) tiiliverhotussa rankaseinässä 120 vuoden ulkoilman olosuhteissa Suomen nykyilmastossa. Vuodet on esitetty korkeilla seinillä esiintyvien homeindeksin maksimi-arvojen mukaisessa kriittisyysjärjestyksessä.

Kuvasta 4.5.7 nähdään, että korkeassa rakennuksessa tiiliverhouksen takana homehtumisriski on oleellisesti suurempi kuin matalassa rakennuksessa. Tämä johtuu ennen kaikkea viistosateen voimakkuudesta, joka on korkeilla seinillä yleensä merkittävästi suurempi kuin matalilla seinillä.

Kuvasta huomataan myös, että saman vuoden kriittisyys korkeassa ja matalassa rakennuksessa vaihtelee hyvin paljon. Koko 120 vuoden sarjaa tarkasteltaessa voidaan nähdä kuitenkin jonkinlainen korrelaatio näiden arvojen välillä. Erot korkean ja matalan rakennuksen välillä johtuvat ennen kaikkea viistosateen laskentakaavoihin valituista viistosadekertomista (ks. luku 4.3).

Edellä esitetyt laskentatulokset osoittavat, että monilla eri tekijöillä on merkittävä vaikutus ulkoilman olosuhteiden kriittisyyteen rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta, kuten on jo aiemmin todettu luvussa 4. Näitä tekijöitä ovat:

- tarkasteluihin valitut ulkoilman olosuhdetekijät ja niiden keskinäinen vaihtelu
- käytettävät rakenneratkaisut ja materiaalit
- valitut toimintakriteerit ja niitä kuvaavat vertailusuureet
- rakennuksen maantieteellinen sijainti ja ilmansuunnat
- rakennuksen koko, muoto, yksityiskohdat ja lähiympäristö, jotka synnyttävät rakennuksen ympärille mikroilmaston

4.5.3 Testivuosien määrittäminen nykyilmastossa

Eri testirakenteilla tehdyistä laskentatarkasteluista muodostettiin 120 vuoden sarjoja, joissa vuodet asetettiin kriittisyysjärjestykseen homeindeksin maksimiarvon ja kondensoituneen kosteuden maksimimäärän perusteella vastaavalla tavalla kuin edellisessä luvussa on esitetty tiili- ja puuverhottujen rankaseinien osalta. Kondensoitumistarkastelujen osalta vertailuun otettiin toiseksi vaihtoehdoksi vielä yhtäjaksoinen kondensoitumisaika, koska sitä oli käytetty TTY:llä aikaisemmin kondensoitumisriskiä kuvaavana vertailusuurena (Vinha 2007).

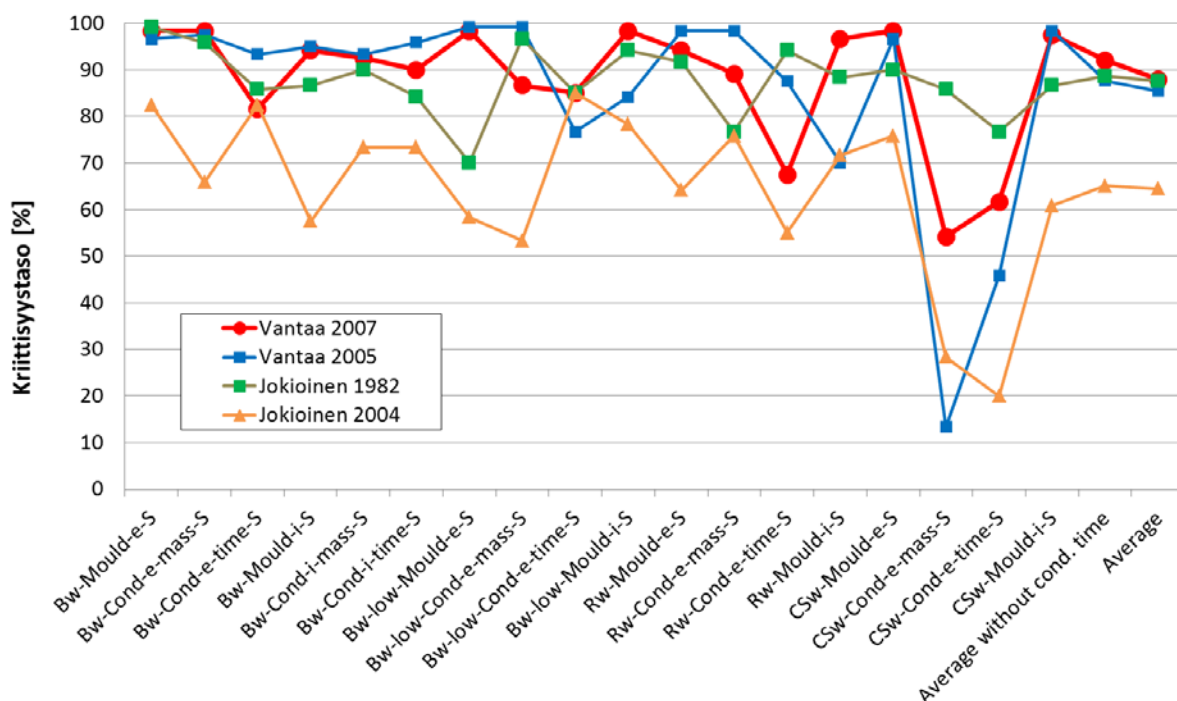
Tämän jälkeen tutkittiin löytyykö tarkasteltavien vuosien joukosta sellaisia, jotka olisivat kriittisiä useilla eri rakenteilla ja vielä samanaikaisesti sekä homeen kasvun että kosteuden kondensoitumisen osalta. Tutkimuksen tuloksena havaittiin, että jotkut vuosista ovat yleiskriittisiä eli ne täyttävät 90 % kriittisyystason (tai ovat hyvin lähellä sitä) useilla eri testirakenteilla, molemmilla rakenteiden toimintakriteereillä ja eri tarkastelutilanteissa. Tällöin riittää, että kosteusteknisiä tarkasteluja varten valitaan muutama testivuosi, joita voidaan käyttää laajasti eri rakenteilla tehtävissä tarkasteluissa. Tämä oli testivuosien käytettävyyden kannalta erittäin hyvä tulos.

Kuvassa 4.5.8 on esitetty kolme yleiskriittisintä vuotta sellaisille testirakenteille, joissa viistosade vaikuttaa rakenteen sisäosan kosteustekniseen toimintaan. Tarkastellut seinärakenteet olivat tiiliverhottu rankaseinä, paksurappauksella toteutettu eristerapattu seinä sekä betonisandwich-seinä. Tässä tapauksessa tarkastelut tehtiin eteläjulkisivuille, koska vertailulaskelmissa oli todettu, että viistosateen rasittava vaikutus on siellä voimakkaampi (ks. kuva 4.5.5).

Kuvasta 4.5.8 nähdään, että kriittisimmät vuodet (Vantaa 2007, Vantaa 2005 ja Jokioinen 1982) sijoittuvat monessa laskentavaihtoehdossa kriittisimpään 10 % joukkoon kaikista tarkastelluista vuosista eli 12 kriittisimmän vuoden joukkoon.

Aiemmissa laskelmissa oli havaittu, että valittujen raja-arvojen johdosta homehtumisriski oli yleensä rakenteen toiminnan kannalta kriittisempi tekijä kuin kosteuden kondensoitumisriski. Tästä syystä testivuoden valinnassa painotettiin enemmän homehtumisriskin mukaan määritettyjä vuosien kriittisyysjärjestyksiä. Lisäksi kondensoitumisen osalta suurempi painoarvo annettiin tarkasteluille, joissa kondensoitumisriskiä arvioitiin kondensoituneen kosteuden maksimimäärän perusteella. Tarkastelujen perusteella testivuodeksi valittiin Vantaa

2007 sellaisille rakenteille, joiden sisäosan kosteustekniseen toimintaan sateella/ viistosateella on vaikutusta.



Merkkien selitykset:

Bw = Tiiliverhottu rankaseinä

Rw = Eristerapattu seinä

CSw = Betonisandwich-seinä

Mould = homehtumisriskitarkastelu

Cond = kondensoitumisriskitarkastelu

low = matala rakennus

mass = kondensoituneen kosteuden maksimimäärä

time = yhtäjaksoisen kondensoitumisajan maksimipituus

e = lämmöneristeen ulkopinta

i = lämmöneristeen sisäpinta

N = pohjoisjulkisivu

Kuva 4.5.8 Eri vuosien ulkoilman olosuhteiden kriittisyys homehtumisriskin ja kosteuden kondensoitumisriskin osalta testirakenteissa, joissa viistosade vaikuttaa rakenteen sisäosan kosteustekniseen toimintaan. Testirakenteet olivat tiiliverhottu rankaseinä, paksurappauksella toteutettu eristerapattu betoniseinä sekä betonisandwich-seinä. Tarkastelut on tehty nykyilmastossa.

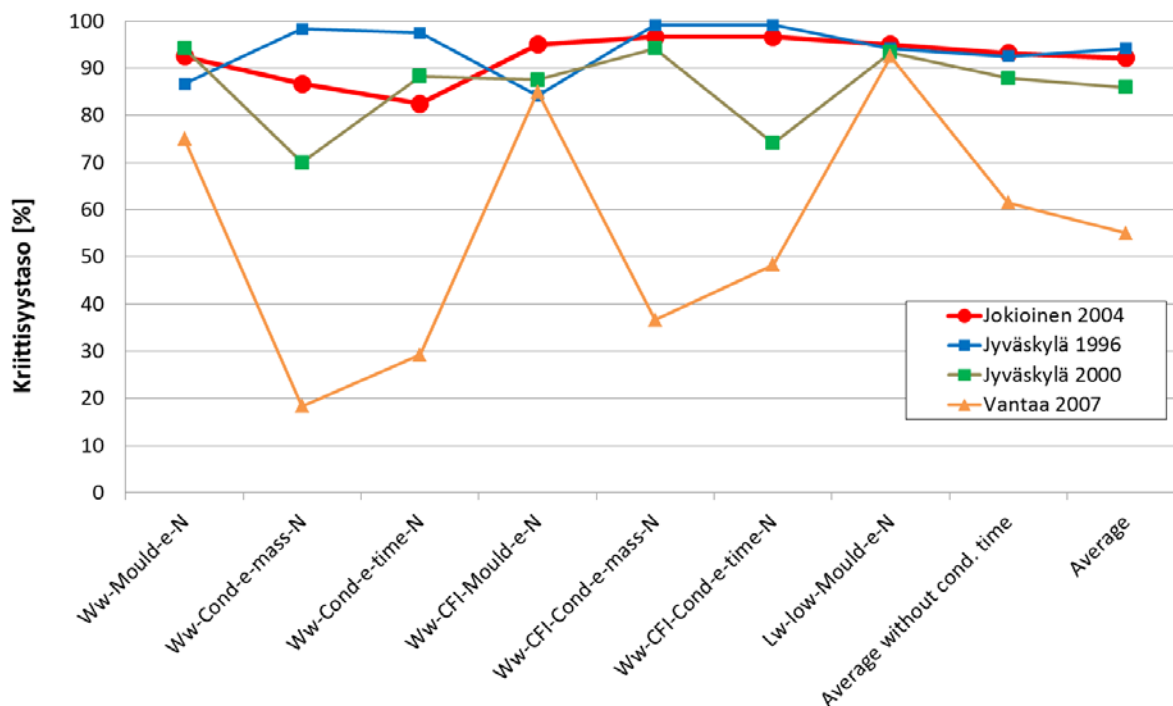
Kuvasta 4.5.8 voidaan havaita myös, että yleiskriittiset vuodet olivat pääsääntöisesti kriittisiä sekä kondensoituneen kosteuden maksimimäärän että yhtäjaksoisen kondensoitumisajan pituuden osalta. Kondensoituneen kosteuden maksimimäärä korreloi kuitenkin vielä paremmin testirakenteissa esiintyneen homehtumisriskin kanssa. Kondensoituneen kosteuden maksimimäärälle on myös jonkin verran helpompi määrittää hyväksyttäviä raja-arvoja. Näistä syistä johtuen se valittiin tutkimukseen kosteuden kondensoitumista kuvaavaksi vertailusuureksi.

Kuvassa 4.5.8 esitettyjen vuosien kriittisyys oli alhaisin betonisandwich-seinän osalta tarkasteltaessa kosteuden kondensoitumisriskiä. Tämä tulos johtuu todennäköisesti siitä, että betonisandwich-seinässä viistosade ei tunkeudu yhtä voimakkaasti ulkokuoren läpi rakenteen sisäosiin kuin tiiliverhotussa rankaseinässä ja eristerapatussa betoniseinässä. Toisin sanoen

betonisandwich-seinässä viistosateen vaikutus on vähäisempi kuin muissa testirakenteissa. Toisaalta homehtumisriskin osalta kaikki kolme vuotta olivat kriittisiä myös tässä rakenteessa.

Kuvassa 4.5.9 on esitetty kolme yleiskriittisintä vuotta sellaisille testirakenteille, joissa viistosade ei vaikuta merkittävästi rakenteen sisäosan kosteustekniseen toimintaan. Tarkastellut seinärakenteet olivat puuverhottu rankaseinä mineraalivillalla ja puukuitueristeellä eristettynä sekä sisäpuolelta eristetty hirsiseinä. Tässä tapauksessa tarkastelut tehtiin pohjoisjulkisivuille, koska vertailulaskelmissa oli todettu, että näissä rakenteissa pohjoispuolella esiintyy kriittisemmät olosuhteet (ks. kuva 4.5.6). Käytännössä tämä johtuu siitä, että auringonsäteilyn lämmittävä ja kuivattava vaikutus on siellä vähäisin.

Kuvasta 4.5.9 nähdään, että kriittisimmät vuodet (Jokioinen 2004, Jyväskylä 1996 ja Jyväskylä 2000) sijoittuvat jälleen monessa laskentavaihtoehdossa kriittisimpään 10 % joukkoon kaikista tarkastelluista vuosista.



Merkkien selitykset:

Ww = Puuverhottu rankaseinä
 Lw = Lisäeristetty hirsiseinä
 Mould = homeriskitarkastelu
 Cond = kondenssiriskitarkastelu
 low = matala rakennus

mass = kondensoituneen kosteuden maksimimäärä
 time = yhtäjaksoisen kondensoitumisajan maksimipituus
 e = lämmöneristeen ulkopinta
 i = lämmöneristeen sisäpinta
 N = pohjoisjulkisivu

Kuva 4.5.9

Eri vuosien ulkoilman olosuhteiden kriittisyys homehtumisriskin ja kosteuden kondensoitumisriskin osalta testirakenteissa, joissa viistosade ei vaikuta merkittävästi rakenteen sisäosan kosteustekniseen toimintaan. Testirakenteet olivat puuverhottu rankaseinä mineraalivillalla ja puukuitueristeellä eristettynä sekä sisäpuolelta eristetty hirsiseinä. Tarkastelut on tehty nykyilmastossa.

Kuvaan 4.5.9 on lisätty myös Vantaan 2007 ulkoilman olosuhteiden kriittisyydet tarkastelluille testirakenteille. Kuvasta nähdään että niissä rakenteissa, joiden sisäosat ovat suojassa viistosateen vaikutuksilta, Vantaan 2007 sääolosuhteet eivät ole yleensä kriittiset. Näin ollen näille rakenteille on tarpeellista valita toinen testivuosi. Edellä kerrottujen valintakriteerien perusteella Jokioinen 2004 valittiin testivuodeksi niille rakenteille, joiden sisäosan kosteustekniseen toimintaan sateella/ viistosateella ei ole merkittävää vaikutusta.

Edelliseen kuvaan 4.5.8 on lisätty vastaavasti myös Jokioisen 2004 ulkoilman olosuhteiden kriittisyydet niille rakenteille, joiden sisäosan kosteustekniseen toimintaan viistosateella on vaikutusta. Tuloksista huomataan, että tämä vuosi ei ole puolestaan erityisen kriittinen tällaisten rakenteiden kannalta. Näin ollen ainakin edellä mainittujen kahden testivuoden määrittäminen on tarpeellista Suomen nykyilmaston olosuhteissa tehtäviä rakennusfysikaalisia tarkasteluja varten.

Edellä esitettyjen laskentatarkastelujen lisäksi eri vuosien ulkoilman olosuhteiden kriittisyyttä tutkittiin myös eri tavoin tuuletetuissa yläpohjarakenteissa (ks. liite 3). Näissä tarkasteluissa havaittiin, että kumpikaan edellä valituista testivuosista ei ollut erityisen kriittinen tuulettumattoman ja vähän tuulettun yläpohjan homehtumisriskiä ja kosteuden kondensoitumisriskiä arvioitaessa. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että näissä rakenteissa ulkoilman kosteusolosuhteilla (sade ja suhteellinen kosteus) on melko vähäinen tai olematon merkitys rakenteen kosteustekniseen toimintaan silloin, kun rakenteissa ei ole kosteusvuotoja. Tällöin eri vuosien synnyttämät erot rakenteen kosteusolosuhteissa ovat seurausta lähinnä lämpötilaolosuhteista ja auringonsäteilyn määrästä sekä niiden vaihteluista. Toisaalta hyvin tuulettuvassa yläpohjarakenteessa ei esiintynyt homeen kasvua tai kosteuden kondensoitumista eri vuosien olosuhteissa, joten lisääntyneen tuuletuksen vaikutuksesta rakenteen toimintaan ei saatu selvää kuvaa.

Tuulettumattomien ja vähän tuulettuvien rakenteiden kosteustekniseen toimintaan vaikuttaa eniten rakenteissa oleva rakennusaikainen kosteus sekä rakenteen sisälle vuotokohdista mahdollisesti pääsyt kosteus. Tässä tutkimuksessa keskityttiin kuitenkin ensisijaisesti oikein tehtyjen rakenteiden toimintaan ja testivuosien löytämiseen tällaisille rakenneratkaisuille.

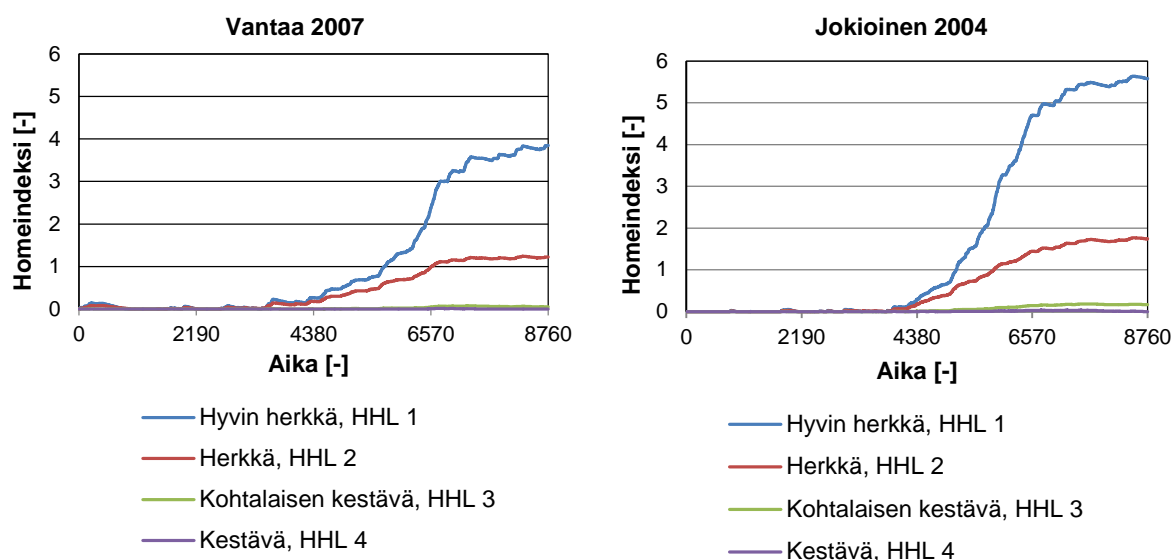
Tuulettumattomalla ja vähän tuulettuvalla kattorakenteella tehtyjen laskentatarkastelujen perusteella rakenteille ei ollut löydettävissä yhtä testivuotta, joka olisi kriittinen useissa eri tarkastelutilanteissa. Laskentatarkastelujen perusteella ne vuodet, jotka olivat kriittisiä rakenteessa esiintyvän homehtumisriskin osalta, eivät olleet tyypillisesti kriittisiä kosteuden kondensoitumisriskin osalta. Lisäksi ne vuodet, jotka synnyttivät kriittisiä olosuhteita lämmöneristeen ulkopintaan, eivät olleet yleensä kriittisiä lämmöneristeen sisäpinnassa esiintyvän homehtumis- ja kondensoitumisriskin suhteen. Tilanne oli päinvastainen puolestaan niiden vuosien osalta, jotka synnyttivät kriittisiä olosuhteita lämmöneristeen sisäpintaan. Tulokset osoittivat, että tuulettumattomien ja vähän tuulettuvien rakenteiden osalta olisi tarpeellista tehdä lisää tutkimusta, jotta voitaisiin arvioida onko niille löydettävissä

yleispäteviä testivuosia ja toisaalta kuinka suuri merkitys testivuodella on siinä tapauksessa, jos rakenteeseen pääsee ylimääräistä kosteutta.

Testivuositarastelujen perusteella rakenteille valittiin nykyilmastossa kaksi testivuotta Vantaa 2007 ja Jokioinen 2004. Näiden vuosien avulla lähes kaikkien vaipparakenteiden kosteustekniset tarkastelut voidaan tehdä kriittisissä ulkoilman olosuhteissa. Tuulettumattomia ja vähän tuuletettuja rakenteita tarkasteltaessa ne eivät ole välttämättä erityisen kriittisiä, mutta niitä voidaan toki käyttää näissäkin tarkasteluissa. Toisaalta tällaisia rakenteita on kohtalaisen vähän ja niiden osalta rakenteen sisälle jäänyt tai päässyt ylimääräinen kosteus on rakenteiden toiminnan kannalta oleellisesti tärkeämpi tekijä kuin ulkoilman kosteusrasitukset. Testivuosien käyttöä eri laskentatarkasteluissa on käsitelty tarkemmin luvussa 3.2.1.

Testivuosien olosuhteiden vertailu

Kuvassa 4.5.10 on esitetty homeindeksin kehittyminen valittujen testivuosien ulkoilman olosuhteissa eri homehtumisherkkyysluokissa.



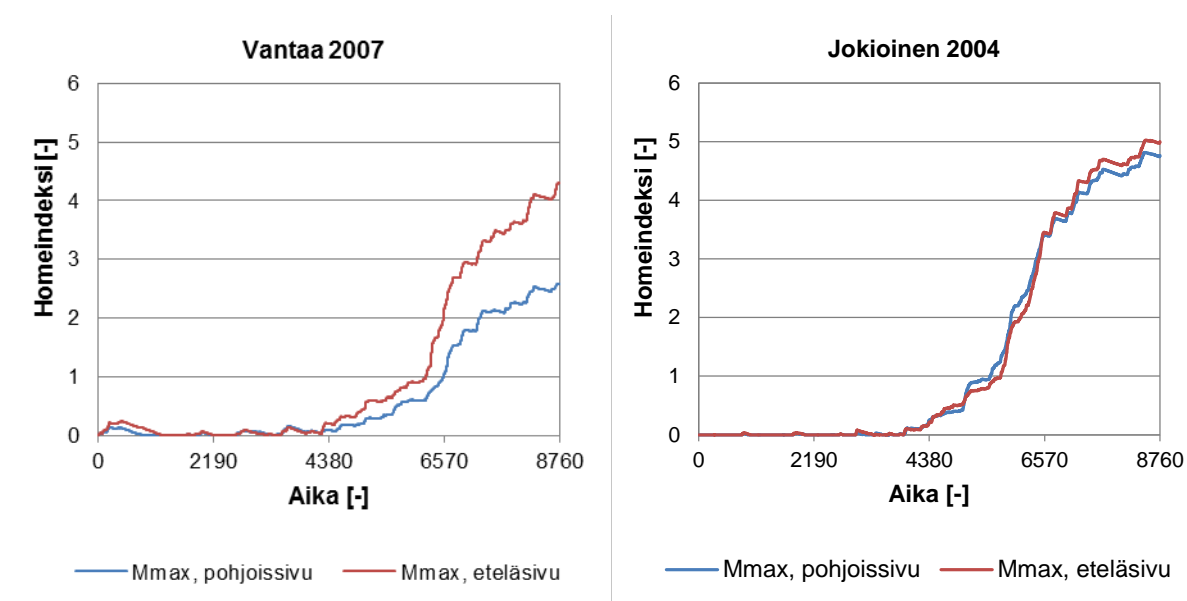
Kuva 4.5.10 Homeindeksin kehittyminen tutkimukseen valittujen testivuosien Vantaa 2007 (vasen kuva) ja Jokioinen 2004 (oikea kuva) ulkoilman olosuhteissa eri homehtumisherkkyysluokissa.

Kuvasta 4.5.10 nähdään, että Jokioisen 2004 olosuhteissa homeindeksi nousee merkittävästi korkeammalle kuin Vantaan 2007 olosuhteissa. Tämä on luonnollista, koska Jokioinen 2004 on kriittinen vuosi niille rakenteille, joiden kosteustekniseen toimintaan vaikuttaa ulkoilman kosteusolosuhteista pelkästään suhteellinen kosteus. Korkea suhteellinen kosteus yhdistettynä homeen kasvun kannalta otollisiin lämpötiloihin nostaa homeindeksin hyvin korkeaksi tämän testivuoden olosuhteissa. Toisaalta Vantaalla esiintyi v. 2007 paljon sateita, jotka yhdistettynä vallinneiden tuuliosuhteiden kanssa nostavat kosteusolosuhteet kriittiselle tasolle niissä rakenteissa, joiden sisäosan toimintaan sade pääsee vaikuttamaan. Edellä mainittujen

olosuhdetekijöiden lisäksi kummankin vuoden kriittisyyteen vaikuttavat luonnollisesti myös auringonsäteily ja lämpösäteily taivaalle.

Jotta homeindeksitarkasteluun saadaan mukaan kaikkien ulkoilman olosuhteiden vaikutus, täytyy homeen kasvua tarkastella ulkoilmassa olevan materiaalin pinnalla. Tällöin pintaan kohdistuu myös sateen ja auringonsäteilyn sekä taivaalle lähtevän lämpösäteilyn vaikutus. Ylipäättään homeen kasvu jo sinällään edellyttää aina materiaalipintaa, jossa kasvu tapahtuu. Tässä mielessä pelkän ulkoilman homeindeksin tarkastelu antaa puutteellisen kuvan eri vuosien synnyttämästä homehtumisriskistä.

Kuvassa 4.5.11 on esitetty homeindeksin kehittyminen 100 mm paksun pystysuoran massiivipuulevyn ulkopinnassa etelä- ja pohjoissuunnassa, kun puulevy on kauttaaltaan Vantaan 2007 tai Jokioisen 2004 ulkoilman olosuhteissa. Tarkastelussa on otettu huomioon kaikki rakennusfysiikan kannalta keskeiset ulkoilman olosuhdetekijät. Ulkopinnan emissiviteettinä ϵ on käytetty arvoa 0,9 ja auringonsäteilyn absorptiokertoimena α arvoa 0,4, joka vastaa käsittelemättömän puun arvoa.



Kuva 4.5.11 Homeindeksin kehittyminen tutkimukseen valittujen testivuosiensa Vantaa 2007 (vasen kuva) ja Jokioinen 2004 (oikea kuva) ulkoilman olosuhteissa 100 mm paksun pystysuoran puulevyn pinnalla (HHL1) etelä- ja pohjoissuunnassa.

Kuvasta 4.5.11 nähdään, että eteläsuunta oli kumpanakin vuotena homeen kasvun kannalta kriittisempi kuin pohjoinen. Tarkastelut tehtiin myös länsi- ja itäsuunnassa ja eteläsuunta oli kriittisin myös niihin verrattuna.

Vantaan 2007 olosuhteissa viistosateen ja auringonsäteilyn erot eri ilmansuunnissa vaikuttavat oleellisesti homeindeksin arvoon. Eteläsuunta on kriittisin sekä rakenteen ulkopinnan että rakenteen sisäosan kosteusteknistä toimintaa tarkasteltaessa.

Jokioisen 2004 olosuhteissa ulkoilman suhteellisella kosteudella on keskeinen vaikutus ulkopinnan homeindeksiin eivätkä sademäärien ja auringonsäteilyn erot eri ilmansuunnissa aiheuta merkittäviä eroja homeindeksin arvoon. Tarkasteltaessa puulevyn ulkopinnan kosteusteknistä toimintaa kriittisin ilmansuunta oli etelä, vaikka rakenteiden sisäosan toimintaa tarkasteltaessa kriittisin ilmansuunta on pohjoinen (ks. kuva 4.5.6). Erot eivät ole tosin kovin suuret ja on mahdollista, että tarkasteltavasta ulkopinnan materiaalista riippuen kriittisin ilmansuunta voi vaihtua. Tämä tulee ottaa huomioon, jos laskentatarkasteluissa halutaan selvittää rakenteen pinnan käyttäytymistä valittujen testivuosien olosuhteissa (ks. taulukko 3.2.1).

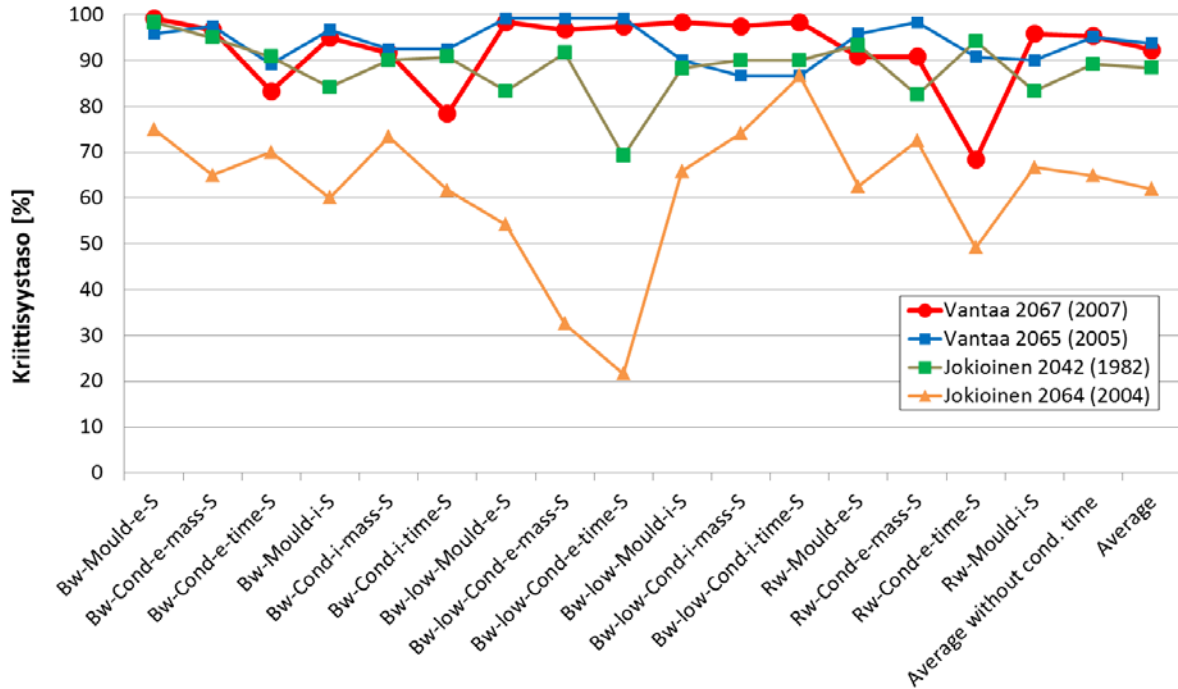
Vaikka ulkopinnan olosuhteet ovat selvästi kriittisemmät Jokioisen 2004 olosuhteissa, tilanne muuttuu, kun tarkastellaan rakenteen sisäosan toimintaa. Pinnan olosuhteita tarkasteltaessa auringonsäteily nostaa pinnan lämpötilaa ja kuivattaa pintaa sateen jälkeen, jolloin homeindeksi putoaa Vantaan 2007 olosuhteissa. Rakenteen sisäosia tarkasteltaessa auringonsäteilyn vaikutus on sen sijaan usein haitallinen, koska se lisää ulkoeristykseen varastoituneen kosteuden kulkeutumista diffuusiolla rakenteen sisäosiin. Tässä tapauksessa Vantaan 2007 olosuhteet muodostuvatkin kriittisiksi, kuten kuvasta 4.5.8 voidaan havaita.

Ulkopinnan olosuhteiden tarkastelussa tulee ottaa huomioon myös eri laskentaohjelmien väliset erot. Jos laskentaohjelmassa on mukana erillinen ulkopinnan olosuhteiden laskenta, kuten esim. WUFI-ohjelmassa, saadaan ulkopinnan olosuhteet määritettyä sen avulla (kuvan 4.5.11 laskentatulokset on määritetty WUFI 1D -ohjelmalla). Kaikissa ohjelmissa tällaista mahdollisuutta ei ole, jolloin ulkopinnan olosuhteet täytyy laskea asettamalla tarkastelupiste rakenteen uloimpaan elementtikerrokseen (esim. Delphin). Tällöin on oleellista määrittää uloimman elementtikerroksen paksuus riittävän ohueksi, koska laskentatulokset ovat keskimääräisiä tuloksia koko elementtikerroksen paksuudelta. Tämä on yksi esimerkki siitä, että laskennan tekeminen tietyllä laskentaohjelmalla edellyttää perehtyneisyyttä ohjelman toimintaan (ks. luku 5.3).

4.5.4 Testivuosien määrittäminen tulevaisuuden ilmastossa

Vuosien 2050 ja 2100 ilmastoissa testivuosien määrittäminen tehtiin samalla tavalla kuin nykyilmastossa eli etsittiin yleiskriittisiä vuosia, jotka saisivat aikaan homehtumisen ja kosteuden kondensoitumisen kannalta kriittisiä olosuhteita useissa eri rakenteissa ja tarkastelutilanteissa.

Kuvissa 4.5.12–4.5.15 on esitetty kolme yleiskriittisintä vuotta vuosien 2050 ja 2100 ilmastoissa samoille testirakenteille, joita tarkasteltiin edellä nykyilmastossa. Ainoa testirakenne, joka näistä kuvista puuttuu, on betonisandwich-seinärakenne, jolle tehtiin tarkasteluja ainoastaan nykyilmastossa. Tässäkin tapauksessa tarkastelut on tehty erikseen rakenteille, joissa viistosade vaikuttaa rakenteen sisäosan kosteustekniseen toimintaan ja rakenteille, joiden sisäosat ovat suojassa viistosateen vaikutuksilta.



Merkkien selitykset:

Bw = Tiiliverhottu rankaseinä

Rw = Eristerapattu seinä

Mould = homehtumisriskitarkastelu

Cond = kondensoitumisriskitarkastelu

low = matala rakennus

mass = kondensoituneen kosteuden maksimimäärä

time = yhtäjaksoisen kondensoitumisajan maksimipituus

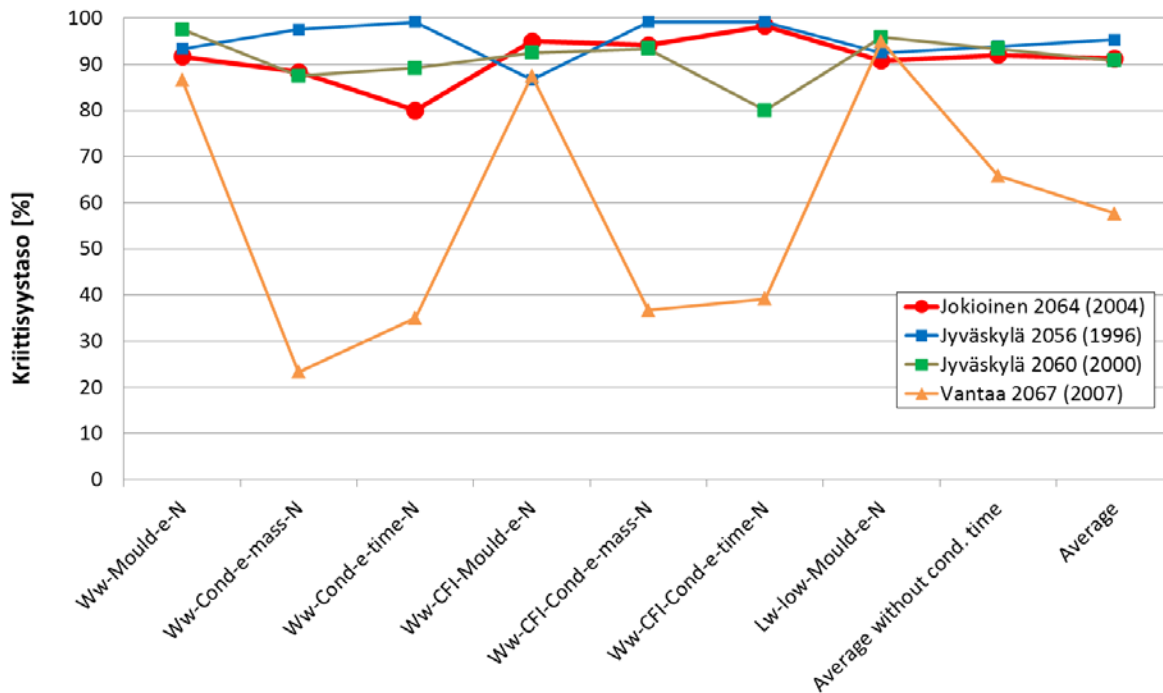
e = lämmöneristeen ulkopinta

i = lämmöneristeen sisäpinta

N = pohjoisjulkisivu

Kuva 4.5.12

Eri vuosien ulkoilman olosuhteiden kriittisyys homehtumisriskin ja kosteuden kondensoitumisriskin osalta testirakenteissa, joissa viistosade vaikuttaa rakenteen sisäosan kosteustekniseen toimintaan. Testirakenteet olivat tiiliverhottu rankaseinä, paksurappauksella toteutettu eristerapattu seinä sekä betonisandwich-seinä. Tarkastelut on tehty vuoden 2050 ilmastossa.



Merkkien selitykset:

Ww = Puuverhottu rankaseinä

Lw = Lisäeristetty hirsiseinä

Mould = homeriskitarkastelu

Cond = kondenssiriskitarkastelu

low = matala rakennus

mass = kondensoituneen kosteuden maksimimäärä

time = yhtäjaksoisen kondensoitumisajan maksimipituus

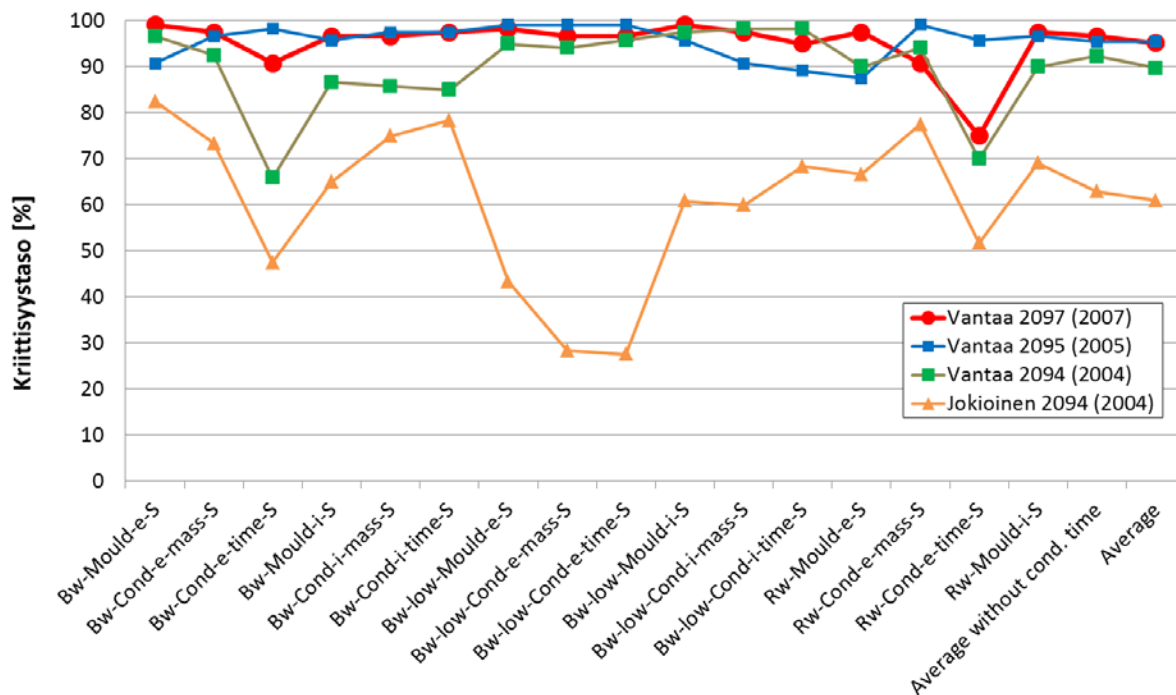
e = lämmöneristeen ulkopinta

i = lämmöneristeen sisäpinta

N = pohjoisjulkisivu

Kuva 4.5.13

Eri vuosien ulkoilman olosuhteiden kriittisyys homehtumisriskin ja kosteuden kondensoitumisriskin osalta testirakenteissa, joissa viistosade ei vaikuta merkittävästi rakenteen sisäosan kosteustekniseen toimintaan. Testirakenteet olivat puuverhottu rankaseinä mineraalivillalla ja puukuitueristeellä eristettynä sekä sisäpuolelta eristetty hirsiseinä. Tarkastelut on tehty vuoden 2050 ilmastossa.



Merkkien selitykset:

Bw = Tiiliverhottu rankaseinä

Rw = Eristerapattu seinä

Mould = homehtumisriskitarkastelu

Cond = kondensoitumisriskitarkastelu

low = matala rakennus

mass = kondensoituneen kosteuden maksimimäärä

time = yhtäjaksoisen kondensoitumisajan maksimipituus

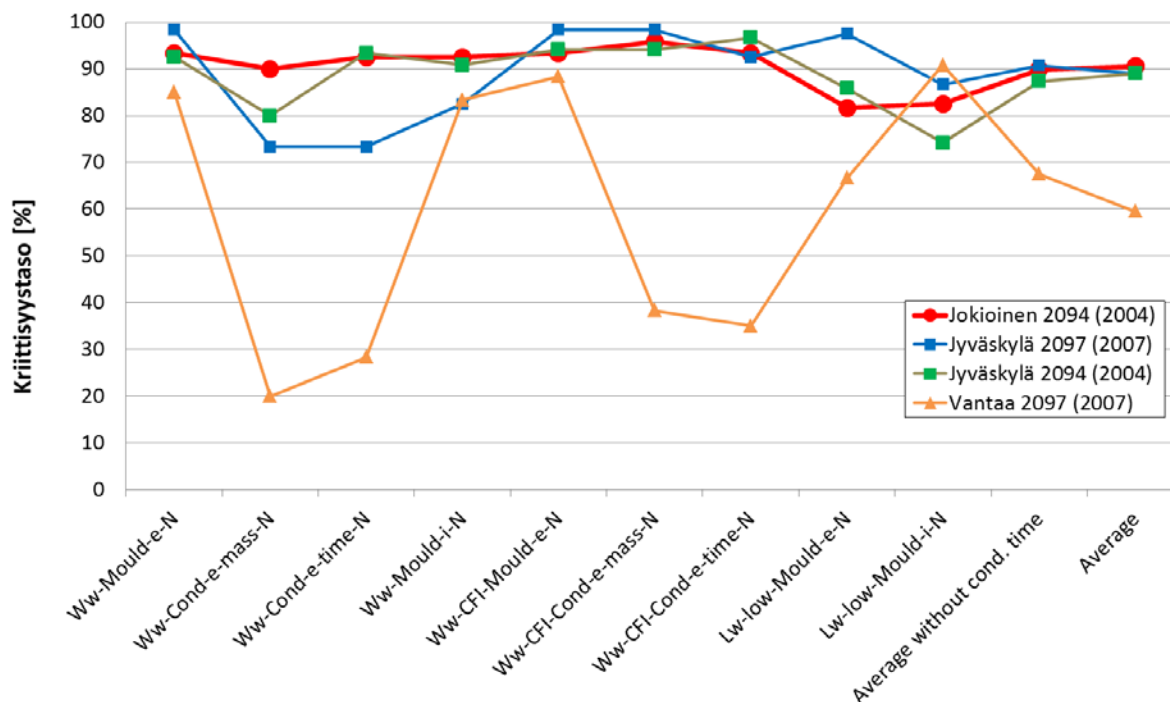
e = lämmöneristeen ulkopinta

i = lämmöneristeen sisäpinta

N = pohjoisjulkisivu

Kuva 4.5.14

Eri vuosien ulkoilman olosuhteiden kriittisyys homehtumisriskin ja kosteuden kondensoitumisriskin osalta testirakenteissa, joissa viistosade vaikuttaa rakenteen sisäosan kosteustekniseen toimintaan. Testirakenteet olivat tiiliverhottu rankaseinä, paksurappauksella toteutettu eristerapattu seinä sekä betonisandwichseinä. Tarkastelut on tehty 210-ilmastossa.



Merkkien selitykset:

Ww = Puuverhottu rankaseinä

Lw = Lisäeristetty hirsiseinä

Mould = homeriskitarkastelu

Cond = kondenssiriskitarkastelu

low = matala rakennus

mass = kondensoituneen kosteuden maksimimäärä

time = yhtäjaksoisen kondensoitumisajan maksimipituus

e = lämmöneristeen ulkopinta

i = lämmöneristeen sisäpinta

N = pohjoisjulkisivu

Kuva 4.5.15 Eri vuosien ulkoilman olosuhteiden kriittisyys homehtumisriskin ja kosteuden kondensoitumisriskin osalta testirakenteissa, joissa viistosade ei vaikuta merkittävästi rakenteen sisäosan kosteustekniseen toimintaan. Testirakenteet olivat puuverhottu rankaseinä mineraalivillalla ja puukuitueristeellä eristettynä sekä sisäpuolelta eristetty hirsiseinä. Tarkastelut on tehty vuoden 2100 ilmastossa.

Edellä esitetyistä kuvista voidaan todeta, että nykyilmastossa yleiskriittisimmiksi todetut vuodet ovat tyypillisesti kriittisimpiä myös vuosien 2050 ja 2100 ilmastoissa, kun kaikkien 120 vuoden olosuhteita on modifioitu A2-kasvihuonekaasuskenaarion mukaisesti. Lisäksi nykyilmastossa testivuosi valitut vuodet Vantaa 2007 ja Jokioinen 2004 ovat tulevaisuuden ilmastoon modifioituina edelleen kriittisimmät vuodet. Näin ollen nämä samat vuodet valittiin testivuosi myös vuosien 2050 ja 2100 ilmastoissa. Koska tulevaisuuden testivuodet eivät vastaa eksaktisti mitään tiettyä vuotta, käytetään näistä vuosista eri laskentatarkastelujen yhteydessä nimiä Vantaa 2050 ja Jokioinen 2050 sekä Vantaa 2100 ja Jokioinen 2100.

4.5.5 Testivuosien olosuhteisiin tehdyt tarkennukset ja muutokset

Valituilla testivuosilla tehdyissä laskelmissa (nykyilmasto ja tulevaisuuden ilmastot) ei otettu huomioon lumisadetta (alle 0 °C lämpötilassa tullut sade), koska lumena tuleva vesi ei juuri imeydy seinän ulkopintaan. WUFI-ohjelmalla tehtyjä laskelmia varten sademäärien muokkaus tehtiin ilmastodataan etukäteen, koska ohjelma ei erottele vesi- ja lumisadetta toisistaan. Sen sijaan Delphin-ohjelmalla tehdyissä laskelmissa käytettiin alkuperäistä

sademäärädataa, koska tässä ohjelmassa lumisateen poistaminen alle 0 °C lämpötilassa voidaan tehdä ohjelmassa.

Nykyilmaston testivuosilla (Vantaa 2007 ja Jokioinen 2004) tehdyissä laskennallisissa tarkasteluissa otettiin useissa tapauksissa huomioon myös pitkäaaltainen lämpösäteily rakenteen ulkopinnan ja ympäristön välillä, vaikka testivuosien valinnan yhteydessä sen vaikutus olikin jätetty pois laskelmista. Ikkunoiden kondensoitumistarkasteluja varten määritettiin taivaan tehollisia lämpötiloja kahdella eri menetelmällä, jotka on esitetty tarkemmin luvussa 6.6.2. Näitä arvoja käytettiin ikkunan ja ympäristön välisen pitkäaaltoisen lämpösäteilyn määrittämiseen. Myös ylä- ja alapohjarakenteiden laskentatarkasteluissa pitkäaaltainen lämpösäteily otettiin huomioon taivaan tehollisen lämpötilan avulla, joka määritettiin yksinkertaistetulla laskentamenetelmällä (ks. luku 6.4.2). Ulkoseinärakenteiden tarkasteluissa pitkäaaltoista lämpösäteilyä ei otettu huomioon muuten kuin puurunkoisten puu- ja levyverhottujen seinien laskentatarkasteluissa, joissa pitkäaaltoisen lämpösäteilyn vaikutusta pyrittiin kompensoimaan käyttämällä ulkoverhouksen takana olevassa tuuletusvälissä suurempaa ilmavirran nopeutta (ks. luku 6.2).

Tutkimusprojektin kuluessa Ilmatieteen laitos määrittäi nykyilmaston testivuosille lisäksi tarkennetut tunnitaiset lyhytaaltoisen auringonsäteilyn (suora ja diffuusi säteily) ja vaakapinnalle tulevan sademäärän arvot. Auringonsäteilyn osalta kolmen tunnin välein mitatuista arvoista interpoloidut tunnitaiset arvot korvattiin todellisilla tunnin välein mitatuilla arvoilla, koska valittujen testivuosien osalta ne oli saatavilla (Ruosteenoja et al. 2013). Samalla diffuusin säteilyn arvoja tarkennettiin uusien varjostusrengaskorjausten avulla (Jylhä et al. 2011a, Ruosteenoja et al. 2013). Auringonsäteilyn arvoihin tehdyt muutokset olivat kuitenkin varsin pieniä alkuperäisen ilmastodataan verrattuna. Sademäärän osalta 12 tunnin välein mitatut sademäärät painotettiin muiden saatavissa olevien havaintojen perusteella tarkemmin jokaiselle tunnille, kun alkuperäisessä datassa painotus oli tehty karkeammin kolmen tunnin välein ja näistä oli laskettu interpoloidut tunnitaiset arvot (Ruosteenoja et al. 2013).

Rakenteiden laskennalliset tarkastelut valituilla testivuosilla tehtiin useimmissa tapauksissa alkuperäisellä ilmastodatalla, jossa ei ollut mukana tarkennettuja lyhytaaltoisen auringonsäteilyn ja sademäärän arvoja. Poikkeuksena tästä olivat ylä- ja alapohjarakenteiden sekä ikkunoiden laskelmat, joissa käytettiin tarkempia auringonsäteilyn arvoja. Tarkennettuja sademäärän arvoja ei käytetty varsinaisissa rakenteiden kosteusteknisen toiminnan tarkasteluissa, koska ne valmistuivat vasta tutkimuksen loppuvaiheessa. Tarkennetulla ulkoilman mittausdatalla tehtiin kuitenkin jonkin verran vertailulaskelmia rakenteille, joiden kosteusteknistä toimintaa oli tarkasteltu alkuperäisen säädätän avulla. Näissä tarkasteluissa ei havaittu merkittäviä eroja rakenteiden toiminnassa käytettäessä alkuperäistä ja tarkennettua ulkoilman säädätää.

FRAME-projektissa käytettyjä alkuperäisiä testivuosien olosuhteita on kuvattu tarkemmin liitteessä 4. Rakennusfysikaalisten testivuosien tarkennettu säädätän nykyilmastossa sekä

tulevaisuuden ilmastojen säädatat on julkaistu Ilmatieteen laitoksen www-sivuilla (Rakennusfysiikan ilmastolliset testivuodet 2013). Nykyilmaston säädatassa ei ole kuitenkaan mukana pitkäaaltaisen lämpösäteilyn laskemiseen tarvittavia lähtötietoja, koska niiden määrittäminen sisältäisi useita epävarmuustekijöitä (ks. luku 6.6).

4.6 Kriittisten olosuhteiden määrittäminen betoniraidoitteiden korroosion ja betonin pakkasrapautumisen tarkastelua varten

4.6.1 Yleistä betonirakenteiden vaurioitumisesta

Säälle alttiissa betonirakenteissa voi erilaisten olosuhde- ja muiden rasitustekijöiden vaikutuksesta tapahtua muutoksia, jotka heikentävät rakenteen ominaisuuksia ja aiheuttavat siten eriasteista korjaustarvetta. Suomessa yleisimmät betonirakenteiden korjaamiseen johtavat vauriomekanismit ovat betonin karbonatisoitumisen seurauksena mahdollisesti tapahtuva raidoitteiden korroosio sekä betonin pakkasrapautuminen puutteellisen pakkasenkestävyyden seurauksena (Pentti et al. 1998).

Rakenteiden ikääntyessä tapahtuva vaurioituminen johtuu pääosin ilmaston aiheuttamasta säärasituksesta, joka saa aikaan materiaalien ominaisuuksien heikkenemistä eli turmeltumista. Turmeltuminen voi olla haitallisen nopeaa, mikäli käytetyt materiaalit tai työnsuoritus ovat olleet heikkolaatuisia tai rakenneratkaisut virheellisiä tai huonosti toimivia. Säärasitus käynnistää useita rinnakkaisia turmeltumisilmiöitä, jolloin julkisivun vaurioituminen tapahtuu yleensä useiden turmeltumisilmiöiden yhteisvaikutuksesta. Turmeltumisilmiöt ovat alkuvaiheessa hitaasti eteneviä, mutta vaurioiden edetessä turmeltumisnopeus yleensä kiihtyy.

Raidoitteiden korroosiosuoja

Betonissa olevat raidoitteet ovat yleensä hyvin korroosiolta suojassa, koska betonin korkean alkalisuuden ansiosta terästen pinnalle muodostuu ns. passiivikalvo, joka estää korroosion (Bakker 1988 ja Gjörv 2009). Ehjän betonin pH on luokkaa 13. Korroosiosuojaus on virheettömässä rakenteessa hyvin pysyvä, koska passiivikalvo on itseään jatkuvasti korjaava (Page 1988). Kloridittomassa betonissa betonin huokosveden alkalisuuden tulee pysyä tasolla $\text{pH} \geq 11$, jotta teräksen ympärille muodostunut passiivikalvo pysyy ehjänä (Parrot 1987). Kemiallisen suojauksen lisäksi terästä suojaava betonikerros hidastaa tiiviydellään ja yhtenäisyydellään erilaisten korroosioita aiheuttavien aineiden (hapot, kloridit, sulfaatit) pääsyä raidoitteiden pinnalle. Korroosio saattaa kuitenkin käynnistyä, jos suojabetonin tiiveys ja/tai paksuus ovat puutteellisia.

Alkalisen kalsiumhydroksidin ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) reagoidessa ilman hiilidioksidin (CO_2) kanssa muodostuu kalsiumkarbonaattia (CaCO_3) ja samalla betonin huokosveden alkalisuus laskee tasolle $\text{pH} = 8-8,5$. Reaktiota kutsutaan betonin karbonatisoitumiseksi. Betonin karbonatisoitumisnopeuteen vaikuttavat mm. (Bakker 1988):

- hiilidioksidin diffuusiovastus betonin huokosverkostoon
- reagoivan aineksen määrä (lähinnä sementtityyppi ja sementin määrä)
- ilman hiilidioksidipitoisuus
- lämpötila

Betonin karbonatisoituminen alkaa betonin pinnasta ja etenee hitaasti rintamana syvemmälle betoniin sitä mukaa, kun kaikki kalsiumhydroksidi on pinnasta lähtien reagoinut (Tuutti 1982).

Ilmakehän sisältämä hiilidioksidimäärä on vuoden 1958 tasosta 310 ppm noussut tasolle 390 ppm vuoteen 2011 mennessä (Scripps Institution of Oceanography and NOAA Earth Systems Research Laboratory 2011). Ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden merkittävästä noususta huolimatta se ei ole kuitenkaan merkittävästi vaikuttanut betonin karbonatisoitumisnopeuteen, vaan muut tekijät, kuten betonin huokoisuus ja karbonisoituvan aineksen määrä ovat olleet määräävämpiä (Lahdensivu 2012).

Aktiivinen korroosio

Raudoitteiden korroosio voi alkaa kun teräksiä suojaava passiivikalvo on tuhoutunut joko betonin karbonisoitumisen seurauksena tai kloridien vaikutuksesta. Aktiivinen korrosiovaihe voi kestää useita vuosia. Aktiivisen korroosion aikaan vaikuttavat raudoitteen betonipeitteen paksuus suhteessa raudoitteen halkaisijaan sekä betonin kosteuspitoisuus ja lämpötila.

Huokosverkoston suhteellisen kosteuden lisääntyessä betonin sähkönjohtavuus kasvaa huomattavasti. Huokosverkoston täyttyminen vedellä toisaalta myös vähentää hapen diffuusiota rakenteeseen. Betonin karbonisoitumisen seurauksena käynnistyneen teräksen korroosion katsotaan yleisesti alkavan, kun suhteellinen kosteus betonissa ylittää 65–70 % RH. Korroosionopeus kasvaa merkittävästi suhteellisen kosteuden noustessa yli 80–85 % RH tason (Tuutti 1982). Näin sateelle alttiissa pinnoissa aktiivinen korroosio etenee nopeammin kuin sateelta suojatuissa pinnoissa. Kloridien aiheuttama korroosio alkaa jo alemmilla kosteuspitoisuuksilla ja on usein selkeästi nopeampaa kuin karbonisoitumisen käynnistämä korroosio.

Betonin pakkasrapautuminen

Pakkasrapautuminen aiheutuu betonin huokosverkostossa olevan veden jäätymlaajenemisen aiheuttamasta hydraulisesta paineesta. Huokosverkostoon pääsee vettä esimerkiksi viistosateen ja sulavan lumen vaikutuksesta. Talvikautena rakenteen kuivuminen on hidasta alhaisesta lämpötilasta, korkeasta ilman suhteellisesta kosteudesta ja vähäisestä auringonsäteilystä johtuen. Lämpötilan aleneminen nollan alapuolelle voi olla nopeaa.

Vapaa vesi laajenee jäätyessään noin 9 tilavuusprosenttia. Vesi ei käyttäydy huokoisen materiaalin huokosrakenteessa samalla tavalla kuin ns. vapaa vesi, vaan materiaalin sisältämät

eri kokoluokan huokokset vaikuttavat oleellisesti siihen, miten vesi materiaalin sisällä käyttäytyy mm. toistuvassa jäätymisessä ja sulamisessa. Tämä johtuu siitä, että lämpötilavaihteluihin liittyvät veden fysikaaliset ja kemialliset ilmiöt ovat suhteessa veden pintakemialliseen ja -fysikaaliseen käyttäytymiseen erilaisissa huokosissa. Huokoisen materiaalin pakkasvaurioitumiselle on esitetty maailmassa yli 15 erilaista teoreettista mallia tai selitystä, joista useimmat on kehitetty betonille. Useat kehitetyt teoriat ja mallit ovat toisiaan tukevia ja täydentäviä.

Edellä esitetty yleinen malli veden jäätyminen laajenemisesta ei ota huomioon kaikkia veden jäätyessä tapahtuvia ilmiöitä, kuten jäätyminen aiheuttamaa veden siirtymistä huokosverkostoon. Tämän lisäksi huokosrakenteessa oleva vesi ei jäädy heti lämpötilan laskettua nollan alapuolelle, vaan jäätyminen tapahtuu ensin suuremmissa gravitaatio- ja kapillaarihuokosissa. Pienempien adsorptiohuokosten vesi alkaa jäätyä vasta likimain $-15\dots-20\text{ °C}$ lämpötilassa (Litvan 1972).

Ruotsalaisen Fagerlundin (1977) teorian mukaan huokoinen materiaali pakkasrapautuu, mikäli sen huokosverkosto on täyttynyt kapillaarisesti yli kullekin materiaalille ominaisen kriittisen vedellätytymisasteen. Tyypillisesti kriittinen vedellätytymisaste on luokkaa 0,9.

Pakkasräöilyn syntyminen voidaan estää ns. lisähuokostuksella, joka tarkoittaa, että betonimassaan voidaan valmistusvaiheessa muodostaa suhteellisen suurikokoisia ns. suojahuokosia, jotka pysyvät kaikissa olosuhteissa ilmatäytteisinä ja joihin veden jäätyminen aiheuttama paine voi purkautua aiheuttamatta vaurioita. Tällaista lisähuokostettua betonia kutsutaan pakkasenkestäväksi betoniksi, joka kestää toistuvaa jäätymistä ja sulamista vaurioitumatta.

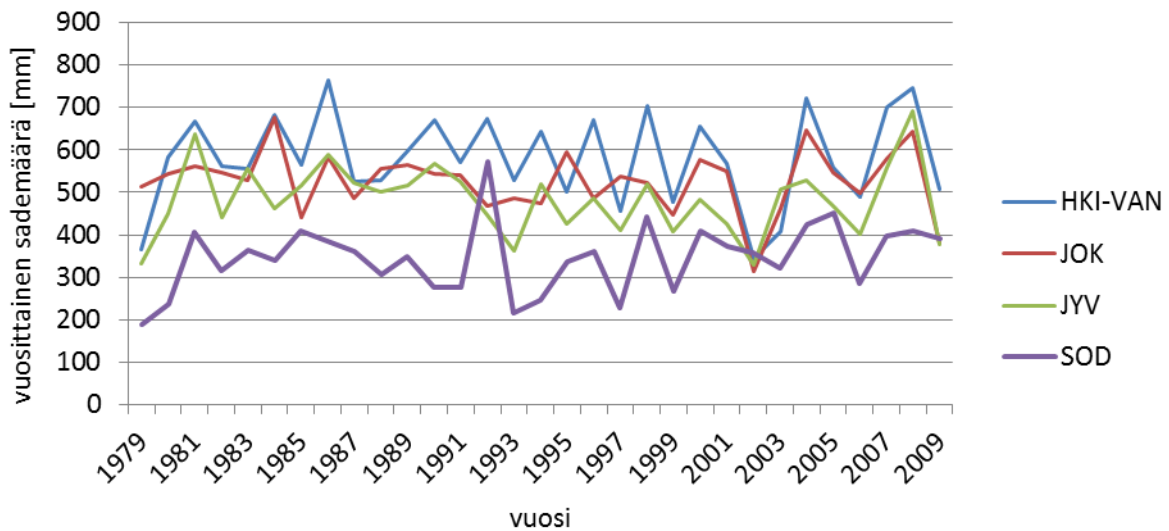
Pakkasenkestävyyden kannalta riittävän tiheä suojahuokostus saadaan aikaan käyttämällä betonin valmistuksen yhteydessä lisähuokostusainetta. Suuruusluokaltaan noin $10\text{ }\mu\text{m}$ suurempia huokosia voidaan pitää pakkasenkestävyyden kannalta hyödyllisinä. Käytännössä keskimääräinen suojahuokosten halkaisija on suuruusluokkaa $150\text{--}300\text{ }\mu\text{m}$. Suojahuokosten toimivuuden kannalta niitä tulee olla riittävän tiheästi, jolloin niiden keskinäinen maksimivälimatka on noin $500\text{ }\mu\text{m}$.

On syytä huomata, että edellä kuvattujen pakkasvaurioiden syntyyn ei riitä pelkästään se, että betoni ei ole (normien mukaan) pakkasenkestävää. Tämän lisäksi pakkasrasitustason (kosteusrasituksen) on oltava riittävän korkea sekä rakenteen sellainen, että kosteusrasitus saa aikaan betonin korkean kosteuspitoisuuden jäätymistilanteessa.

4.6.2 Kriittiset sääolosuhteet

Betonirakenteiden vaurioitumisen kannalta keskeisiä ilmastoon vaikuttavia tekijöitä ovat sateisuus (rakenteen kosteus) sekä rakenteiden märkänä tapahtuvien jäätymissulamissykliin määrä.

Kuvassa 4.6.1 on esitetty nykyisen ilmaston vuosittaiset sademäärät tutkimukseen valituilta neljältä havaintoasemalta: Vantaa, Jokioinen, Jyväskylä ja Sodankylä.



Kuva 4.6.1 Vuosittaiset sademäärät nykyilmastossa tarkasteltuna eri havaintoasemilla.

Ilmatieteen laitoksen toimesta on kerätty aineisto betonirakenteiden vaurioitumiselle kriittisten sääolosuhteiden kehittymisestä ilmaston muuttuessa A2-kasvihuonekaasuskenaarion mukaisesti (taulukot 4.6.1 ja 4.6.2). Muutokset laadittiin edellä mainituilta neljältä havaintoasemalta (Jylhä et al. 2011b).

Raudoitteiden korroosiotarkasteluja varten on määritetty seuraavat asiat:

- vesisadepäivien lukumäärä ja vesisadepäivien sademäärä talvikausittain
- tuulensuunta-vedisade-ruusut viiden talvikauden jaksoina laskettuina
- ilmastosuureiden muuttuminen vuosina 2030, 2050 ja 2100.

Taulukko 4.6.1 Keskimääräinen kuukausittainen sademäärän muutos (%) eri havaintoasemilla (Jylhä et al. 2011b).

Kk	Vantaa			Jokioinen			Jyväskylä			Sodankylä		
	2030	2050	2100	2030	2050	2100	2030	2050	2100	2030	2050	2100
1	4,1	9,9	29,6	4,3	9,3	24,7	3,8	9,7	32,6	6,2	11,5	37,9
2	6,4	9,5	29,3	5,7	9,5	26,0	6,3	10,8	30,5	8,4	14,4	31,4
3	3,9	6,5	20,6	2,7	4,1	15,3	3,9	6,6	21,5	3,3	8,4	26,7
4	3,4	6,5	19,1	0,7	4,1	14,1	2,3	5,8	16,4	5,2	9,3	21,1
5	3,5	5,9	16,6	2,2	3,7	11,4	3,9	5,3	14,9	3,4	5,5	22,0
6	-1,2	3,5	9,6	-0,8	4,3	11,2	-0,6	3,8	12,3	-0,9	5,0	17,7
7	2,6	4,4	11,3	2,6	5,4	12,8	2,1	5,1	11,1	2,6	4,7	8,4
8	3,8	4,9	5,7	3,6	3,1	4,3	3,5	4,5	5,8	4,6	5,4	12,2
9	3,5	5,8	9,5	2,7	4,5	10,0	4,4	6,7	11,0	2,3	3,4	13,2
10	3,1	8,4	18,6	2,9	8,3	17,9	2,8	8,0	20,1	2,2	8,8	22,6
11	7,1	10,9	24,4	6,3	9,5	22,3	7,9	10,6	27,6	7,1	13,1	30,6
12	5,4	9,0	28,7	4,8	8,1	23,7	6,5	12,0	34,0	8,1	15,3	38,6
Vuosi	3,8	7,1	17,7	3,1	6,1	15,2	3,6	7,1	18,2	3,9	7,9	21,3

Ilmatieteen laitoksen mukaan vallitsevat tuulensuunnat pysyvät nykyisen kaltaisina, joten vesi- ja räntäsateet tulevat jatkossakin lounas-kaakkosektorilta. Keskimääräiset tuulenopeuden muutokset ovat varsin vähäisiä vuoteen 2050 mennessä. Tuulenopeudet kasvavat eniten talvikaudella, jolloin myös sademäärissä tapahtuu eniten kasvua. Tällä hetkellä rannikkoalueilla ja Pohjois-Suomen tuulisilla alueilla noin 60 % sademäärästä tulee julkisivuille. Sisämaassa vastaava osuus on noin 40 % heikompien tuulien johdosta. Vaikka tuulenopeudet eivät juuri kasvakaan, sateiden muuttuessa nykyistä runsaammiksi ja vetisemmiksi julkisivujen saama vesi- ja räntäsaderasitus kasvavat siten merkittävästi vuosisadan loppuun mennessä.

Betonin pakkasrapautumatarkasteluja varten on määritetty seuraavat asiat:

- jäätymissulamissykliä lukumäärä eri alimpiin lämpötiloihin (0 °C, -2 °C, -5 °C, -10 °C, -15 °C, -20 °C), kun vesisade on ollut enintään 2 vrk ennen jäätymistä
- ilmastosuureiden muuttuminen vuosina 2030, 2050 ja 2100.

Taulukon 4.6.2 nykyilmastoa kuvaava jäätymissulamissyklimäärän perustaso vuodelle 2000 on laskettu perusjakson 1980–2009 tunnin välein interpoloiduista havainnoista. Tulevaisuuden arviot perustuvat malliarvioihin, joissa havaintotiedot on muunnettu kuvaamaan tulevaisuuden ilmastoa.

Taulukko 4.6.2 Jäätymissulamissykliä enintään 2 vrk vesi- tai räntäsateen jälkeen neljällä eri paikkakunnalla vuosina 2000, 2030, 2050 ja 2100.

Vuosi	Lämpötilan lasku enintään 2 vrk sateen jälkeen					
	0 °C	-2 °C	-5 °C	-10 °C	-15 °C	-20 °C
Vantaa						
2000	37,8	23,5	11,7	4,0	1,3	0,2
2030	25,9	15,2	7,7	2,3	0,7	0
2050	21,4	12,9	6,1	1,8	0,3	0
2100	14,5	9,4	3,9	0,4	0	0
Jokioinen						
2000	34,6	22,3	11,1	4,2	1,3	0,4
2030	26,5	16,0	8,2	3,0	1,0	0,1
2050	23,8	14,8	7,6	2,5	0,6	0
2100	17,2	11,3	5,8	1,1	0	0
Jyväskylä						
2000	30,4	20,2	10,4	4,2	1,6	0,5
2030	25,4	17,5	9,6	3,3	1,3	0,4
2050	24,8	17,0	9,4	3,2	0,9	0,2
2100	19,8	13,9	7,3	2,1	0,2	0
Sodankylä						
2000	23,4	18,1	10,4	5,0	2,7	0,8
2030	20,6	15,5	9,9	4,7	2,5	0,9
2050	22,3	16,7	11,4	5,8	2,5	0,9
2100	25,7	20,0	13,3	5,7	1,8	0

Lahdensivu et al. (2011) ovat määrittäneet jäätymissulamissyklejä Helsinki-Kaisaniemestä, Vantaalta ja Jyväskylältä vuosilta 1961–2006. Jäätymissulamissyklien määrän laskennan kriteerinä oli vesi- tai räntäsade enintään 3 vuorokauden sisällä edellä mainittuihin lämpötilarajoihin. Näissä todellisiin mittauksiin perustuvissa tarkasteluissa rannikolla tapahtuu vähemmän jäätymissulamissyklejä kuin sisämaassa. Vantaalla ja Jyväskylässä vesi- ja räntäsateen jälkeen tapahtuvat jäätymissulamissyklimäärät ovat hyvin lähellä toisiaan kuitenkin niin, että Vantaalla syklejä oli jokaisessa lämpötilakategoriassa aina 1–3 enemmän kuin Jyväskylässä. Aikakriteerin ollessa 1 vrk verran erilainen kuin taulukon 4.6.2 jäätymissulamissyklimäärissä datat eivät ole täysin verrattavissa em. julkaisun dataan, mutta ovat kuitenkin riittävällä tarkkuudella yhdensuuntaiset.

Tulevaisuuden ilmastossa Etelä-Suomen osalta vuotuisissa jäätymissulamissyklimäärissä tapahtuu selvää laskua, sisämaassa lasku on vähäisempää ja Pohjois-Suomessa ankarien jäätymissulamissykliä määrät nousevat jonkin verran vuosisadan loppuun mennessä.

4.6.3 Kriittisyystarkastelujen toteutus

Kuten edellä on todettu betonin sekä rakenteen ominaisuuksilla on keskeinen vaikutus betonirakenteen vaurioitumisen etenemiseen. Raudoitteiden korroosio voidaan jakaa betonin karbonatisoitumisvaiheeseen sekä aktiiviseen korroosiovaiheeseen (Tuutti 1982). Raudoitteiden korroosiotarkasteluissa tarkasteltiin ensin betonin karbonatisoitumiseen kuluvaa aikaa. Tässä aineistona käytettiin 1990–1996 valmistuneiden betonielementtikerrostalojen kuntotutkimusdataa. Eri betonirakenteiden karbonatisoitumisnopeudesta laadittiin jakaumat, joista laskennassa käytettiin keskiarvon lisäksi 95 % fraktiilia, eli 95 % rakenteista ylittää näin lasketun käyttöiän. Varsinaisessa raudoitteiden korroosionopeustarkasteluissa (aktiivinen korroosiovaihe) käytettiin vuosittaisia keskimääräisiä sademäärätietoja vesi- ja räntäsateen osalta samoilta tutkimukseen valituilta neljältä paikkakunnalta (Vantaa, Jokioinen, Jyväskylä ja Sodankylä). Tulevaisuuden ilmaston keskimääräiset sademäärän muutokset on laskettu Ilmatieteen laitoksen ilmoittamien muutosprosenttien avulla.

Pakkasrapautumisen osalla tarkasteluissa on lähdetty siitä, että betonin lisähuokostuksen tulee epäonnistua, jotta rapautumista voisi luonnonolosuhteissa tapahtua ja rakenteen käyttöikä on pidetty 50 vuotta, minkä jälkeen rakenne joko korjataan tai uusitaan. Selvennykseksi mainittakoon, että 50 vuoden käyttöikä on yleinen betonijulkisivujen ja parvekkeiden suunnittelukriteeri tällä hetkellä. Tarkasteluissa on laskettu rakenteen saama sateen jälkeinen kumuloituva jäätymissulamismäärä. Rakenteen käyttöikä päättyy tässä tarkastelussa jäätymissulamissykliä raja-arvon täytyttyä. Betonirakenteen vaurioitumiskriteerinä on alkavan pakkasrapautumisen havaitseminen ohuthietarkastelussa.

4.7 Yhteenveto ulkoilman testivuosien määrittämisestä

Rakennusfysikaalisten testivuosien määrittämisestä ei ole olemassa kansainvälisiä ohjeita tai standardeja, koska niiden määrittäminen on käytännössä erittäin hankalaa. Testivuosi voi olla synteettinen (kuten energialaskennan testivuosi) tai todellinen toteutunut vuosi. FRAME-projektissa testivuosien valinnan lähtökohdaksi pidettiin sitä, että vuodet ovat todellisuudessa esiintyneitä vuosia.

Testivuosien valinnassa otettiin huomioon seuraavat asiat:

- kaikki rakenteiden rakennusfysikaalisen toiminnan kannalta keskeiset ulkoilman olosuhdetekijät (lämpötila, suhteellinen kosteus, sade/viistosade ja auringonsäteily) lukuun ottamatta taivaalle lähtevää pitkäaaltoista lämpösäteilyä
- erilaiset rakenneratkaisut ja materiaalit
- rakenteille valitut toimintakriteerit (homeen kasvu ja kosteuden kondensoituminen) ja niitä kuvaavat vertailusuureet (homeindeksin maksimiarvo ja kondensoituneen kosteuden maksimimäärä)
- rakennuksen maantieteellinen sijainti (4 paikkakuntaa: Vantaa, Jokioinen, Jyväskylä ja Sodankylä) ja ilmansuunnat
- rakennuksen korkeus

FRAME-projektissa rakennusfysikaaliset testivuodet määritettiin siten, että samat vuodet ovat yleispäteviä monien erityyppisten vaipparakenteiden ja kummankin toimintakriteerin tarkasteluissa. Testivuosien määrittämisestä ei ole tehty samalla tavalla aikaisemmissa tutkimuksissa. Projektissa määritettiin testivuodet myös tulevaisuuden vuosien 2050 ja 2100 ilmastoissa, jotka perustuvat A2-kasvihuonekaasuskenaarioon. Vastaavanlaisia vuosia ei ole aiemmin määritetty.

Testirakenteilla tehtyjen laskentatarkastelujen perusteella kahden eri testivuoden avulla voidaan tehdä suurin osa vaipparakenteiden kosteusteknisistä tarkasteluista Suomessa. Tarkasteltaessa rakenteita, joissa sade vaikuttaa niiden sisäosan kosteustekniseen toimintaan, voidaan testivuodeksi valita nykyilmastossa Vantaa 2007. Tarkasteltaessa rakenteita, joiden sisäosat on suojattu sateen vaikutukselta, voidaan testivuodeksi valita nykyilmastossa Jokioinen 2004. Tulevaisuuden ilmastoja kuvaavista säädatoista testivuodeksi valikoituivat samat Vantaan ja Jokioisen vuodet. Näille testivuosille annettiin nimiksi: Vantaa 2050 ja Jokioinen 2050 sekä Vantaa 2100 ja Jokioinen 2100.

Edellä määritetyt testivuodet kattavat suurimman kaikista vaipparakenteista. Ne eivät välttämättä ole erityisen kriittisiä tarkasteltaessa tuulettumattomia tai vähän tuulettuvia rakenteita, mutta niitä voidaan käyttää näissäkin tapauksissa.

Raudotteiden korroosiotarkasteluja ja betonin pakkasrapautumistarkasteluja varten ei määritetty testivuosia, vaan ilmastodatan perusteella tarkasteltiin, kuinka näiden toimintakriteerien kuvaamat vauriot kehittyvät rakenteissa pitkällä aikavälillä.

5 Laskentatulosten tarkkuus ja laskentaohjelmien verifiointi

Laskentaohjelmien verifiointilla tarkoitetaan prosessia, jolla pyritään varmistamaan laskentatulosten luotettavuus. Rakenteen tai koko rakennuksen lämpö- ja kosteustekninen laskentamalli on aina yksinkertaistus todellisuudesta ja tehtyjen valintojen tulisi kuitenkin kuvata todellisuutta riittäväällä tarkkuudella.

Rakennusfysikaalisten laskentatarkastelujen ytimen on mahdollista katsoa muodostuvan lämmön, kosteuden ja ilman liikkeiden tarkasteluista. Lähtökohtaisesti kosteustekninen ongelma vaatii kaikkien kolmen tekijän huomioon ottamisen. Tämän lisäksi ilmastosuureiden syklinen vaihtelu ja materiaalien epälineaariset kosteustekniset ominaisuudet vaativat huomattavan määrän lähtötietoja laskentamalliin. Hyvin valittu analyttinen ratkaisu voi antaa paljoo tietoa tarkasteltavasta tapauksesta, mutta muuttujien lukumäärän kasvaessa ja aikaresoluution pientyessä ainoaksi vaihtoehdoksi jäävät numeeriset ratkaisut eli laskentaohjelmien käyttäminen.

Eri rakennusfysikaalisilla laskentaohjelmilla on omat vahvuutensa ja heikkoutensa ja näiden ymmärtäminen on osa laskentaohjelmien verifiointiprosessia. Myös toimivaa ohjelmaa tulee osata käyttää ja ohjelmasta saatavia tuloksia tulee osata tulkita oikein. Eri ihmiset saattavat tulkita samat tulokset eri tavoin, joten laskentaohjelmien verifiointiprosessin tulisi jatkua läpi laskentatarkastelujen tekemisen loppupäätelmien arviointiin asti.

Laskentaohjelmien tarkkuutta on mahdollista arvioida eri tavoin, kuten ohjelmien keskinäisellä vertailulla, asiantuntija-arvioon perustuen, vertaamalla tuloksia analyttiseen tulokseen, kenttämittauksiin tai laboratoriomittauksiin. Jokaisessa tavassa on omat vahvuutensa ja heikkoutensa, jotka liittyvät esimerkiksi tarvittavaan työmäärään, vertailutiedon saatavuuteen, lopputuloksen tarkkuuteen ja kattavuuteen sekä tulosten hyödyntämiseen myöhemmin. Pitkäikäisemmän laskentaohjelman tapauksessa käyttäjäkunnalla on ollut aikaa havaita kehityskohteita ja ohjelman kehittäjillä on ollut aikaa tehdä ohjelmaan muutoksia.

Seuraavassa käydään ensin läpi taustatiedoksi laskennan lähtötietojen luonnetta, jonka jälkeen on esitetty mittaus- ja laskentatulosten vertailua ulkoseinien, tuulettuvan yläpohjan ja ryömintätalaisen alapohjan osalta.

5.1 Stokastinen ja deterministinen laskenta rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa

Stokastinen tarkoittaa suomeksi satunnaista. Jos tarkasteltava muuttuja saa vaihtelevia (satunnaisia) arvoja jonkin tiheysfunktion mukaan, puhutaan satunnaismuuttujasta. Satunnaismuuttujan seuraavaa arvoa ei pystytä ennalta käsin tarkasti sanomaan, mutta tilastollisten menetelmien avulla on mahdollista tehdä päätelmiä tulevista tapahtumista. Esimerkiksi tulevan kesän keskilämpötilaa ei pystytä ennalta yksiselitteisesti nimeämään, mutta tutkimalla menneiden kesien lämpötiloja on kuitenkin mahdollista tehdä päätelmiä siitä, mitä kyseinen lämpötila voisi suunnilleen olla.

Stokastisissa laskentatarkasteluissa otetaan huomioon lähtötiedot satunnaisilmiöinä. Eri suureilla on omat jakaumansa, joita laskentatarkasteluissa hyödynnetään. Yksi stokastisen laskentatarkastelujen menetelmistä on Monte Carlo -menetelmä. Siinä laskentamalli on niin sanottu black box -malli, jota ajetaan läpi useita kertoja ottaen lähtötiedot kullekin kierrokselle aina kyseisen lähtötiedon jakaumasta. Lähtötietojen satunnaisuuden vuoksi myös tulokset ovat jollain lailla jakautuneita. Riittävän suurella laskentakierrosten toistomäärällä saadaan tulossuureiden jakauma näkyviin. Laskentatuloksia voidaan tarkastella esimerkiksi arvioimalla kertymäfunktioista riskitasoja tai tulostamalla tulosarvoja lähtöarvojen funktiona. (Hagentoft 2010)

Stokastisia laskentamenetelmiä varten tarvitaan myös stokastista dataa lähtötiedoiksi. Jos esimerkiksi materiaalin vesihöyrynläpäisevyys tyypillisesti annetaan koesarjan keskiarvona, niin stokastista laskentaa varten materiaalikokeita tulisi tehdä niin paljon, että tuloksista saadaan määritettyä parametrin jakauma. Jakaumatyyppejä on olemassa useita erilaisia ja oikean löytäminen voi vaatia huomattavan työmäärän.

Deterministinen laskenta olettaa, että tarkasteltavan prosessin lopputulos voidaan yksiselitteisesti määrittää lähtötietojen perusteella. Tällaisessa tapauksessa tietystä lähtötilanteesta päädytään aina samaan lopputilanteeseen. Suurin osa rakennusfysikaalisista laskentaohjelmista toimii näin, eli ohjelmaan syötetään tietyt lähtötiedot ja useaankin kertaan laskettaessa tulokset ovat samat. Näin ainakin silloin, kun ohjelmakoodiin ei ole jäänyt laskentaan vaikuttavia virheitä.

Rakennusfysikaalisten laskentatarkastelujen kannalta stokastinen ja deterministinen laskenta ovat eri lähestymistapoja samaan asiaan. Tällä hetkellä valtaosa rakennusfysiikan laskelmista tehdään etukäteen kiinnitetyillä materiaaliarvoilla, sisä- ja ulkoilman olosuhteilla ynnä muilla lähtötiedoilla. Tällöin lähtötietojen kriittisyys on määritetty etukäteen tai oletettu tiedetyksi, joka taas edellyttää jonkinlaista käsitystä käsiteltävän suureen jakaumasta. Stokastisissa laskelmissa osa lähtötietojen analyysistä siirretään osaksi laskentaprosessia.

Stokastisen laskennan haasteita tällä hetkellä ovat muun muassa lähtötietojen puutteet ja soveltuvien laskentaohjelmien vähyys. Rakennusfysikaalisiin tarkasteluihin käytettävät ja stokastisiin tarkasteluihin kykenevät laskentaohjelmat ovat joko matematiikkaohjelmistoihin perustuvia tai käytössä vain tietyllä tutkimusryhmällä. Hyödynnettävien tulosten tuottaminen tällaisilla ohjelmilla vaatii kokemusta ja osaamista monelta eri alueelta. Lisäksi myös nykyisissä deterministisissä laskentamenetelmissä on kehitettävää, jotta saataisiin yhteneviä laskentatuloksia samoja lähtöarvoja käytettäessä. Esimerkiksi Kansainvälisen energijärjestön projektissa IEA Annex 41 eri tutkimusryhmät tekivät laskentaa samoilla lähtötiedoilla, mutta silti tuloksissa oli hajontaa (Woloszyn & Rode 2008a). Stokastisilla laskentamenetelmillä olisi kuitenkin mahdollista löytää uusia lähestymistapoja rakennusfysikaalisiin tarkasteluihin. Laskentamenetelmien kartoitusta ja ohjeistusta rakennusfysikaalisiin tarkasteluihin tutkitaan muun muassa Kansainvälisen energijärjestön projektissa IEA Annex 55.

Laskentamenetelmien lisäksi on tarpeellista pitää mielessä niiden kytkeytyminen valittuihin toimintakriteereihin sekä niille asetettuihin raja-arvoihin. Laskennan tuloksena saadaan tyypillisesti lämpö- ja kosteusolosuhteet rakenteissa ja rakennuksissa, mutta nämä eivät itsessään vielä kerro tarkasteltavan kohteen toimivuudesta mitään. Toiminnan arvioimiseksi tulee lisäksi pystyä määrittelemään tarkasteltavan toimintakriteerin kannalta hyväksyttävät. Näitä on käsitelty erikseen tämän raportin luvuissa 3 ja 4.

5.2 Laskentatulosten tarkkuuteen vaikuttavat tekijät

Laskentatarkastelujen virhelähteitä on mahdollista kartoittaa rakenteiden kosteusteknisen analysointimenetelmän avulla (ks. luku 3.2). Kukin analysointimenetelmään kuuluva osa-alue sisältää omat virhelähteensä, jotka pyritään tarkasteluissa ottamaan huomioon. Kaikkien osa-alueiden virheiden tulee olla riittävän pieniä, jotta tulosten luotettavuudesta voidaan varmistua.

Ulko- ja sisäilman olosuhteet ovat luonnonilmiöitä ja materiaaliominaisuudet sekä toimintakriteereissä tarkasteltavat asiat riippuvat näistä olosuhdetekijöistä, joten kaikki nämä asiat vaihtelevat vuoden, vuorokauden ja tarkasteltavan rakenteen mukaan. Edellä mainittujen ilmiöiden ja asioiden vaihtelusta on kerätty dataa mittauksin, jolloin mukaan tulevat myös eri mittauslaitteiden ja -järjestelyiden mittaustarkkuudet. Tämän lisäksi osasta tarvittavia suureita ei ole olemassa kattavia mittauksia tai niitä ei pystytä luotettavasti mittaamaan. Esimerkiksi tuulettuvan yläpohjan ja ryömintätilaisen alapohjan tuuletustilan ilmanvaihtuvuudesta on olemassa tutkimustuloksia, mutta yleisesti hyväksytyä ja yksiselitteistä keinoa ilmanvaihdon arvioimiseen ei ole olemassa. Toinen esimerkki on, että materiaalien kosteusteknisten ominaisuuksien mittausten tuloksena saadaan tyypillisesti kokonaiskosteusvirta, joka koostuu kosteuden eri siirtymismuotojen yhteisvaikutuksesta. Kosteuden eri siirtymismuodot voivat vaikuttaa rakennusten vaipparakenteissa eri suuntiin, joten kokonaiskosteusvirta on tarpeellista jakaa komponentteihin. Tätä jakoa varten tarvitsee kuitenkin tällä hetkellä tehdä oletuksia kosteuden siirtymisestä.

Laskentaohjelmista johtuvia virheitä on tarkasteltu lähemmin luvussa 5.3. Materiaaliominaisuuksien laskennallisen virheen määrittämisestä on esitetty lisäksi esimerkki luvussa 5.4.

Analysointimenetelmän osiot ovat osin keskenään riippuvia. Esimerkiksi sisäilman olosuhteet riippuvat muun muassa ulkoilman olosuhteista, määritettävät materiaaliarvot riippuvat osin käytettävästä laskentaohjelmasta ja toimintakriteerien määrittäminen vaatii kaikkien osatekijöiden panoksen. Analysointimenetelmän osat eivät siis ole toisistaan irrallisia palasia, vaan toisiinsa liittyneitä kokonaisuuden osia.

Rakennusfysikaalisista tarkasteluista tarvitaan käyttökelpoisia ja riittävän oikeita tai varmalla puolella olevia tuloksia. Jos tuloksia ei saada tai ne ovat vääriä, eivät laskennalliset tarkastelut palvele sitä tarkoitusta, minkä vuoksi niitä tehdään. Nykyisen tietämyksen taso asettaa omat rajoituksensa laskentatarkkuuden parantamiselle, vaikka laskennan eri osa-alueisiin liittyvää tutkimusta tehdäänkin jatkuvasti. Tuntemattomien asioiden osalta on tehtävä arvio siitä, miten erilaiset epävarmuustekijät ja puutteet otetaan huomioon laskennassa sekä lopullisissa tuloksissa. Tämä korostaa laskelmien toteuttajan suurta vastuuta laskentatulosten luotettavuudesta.

Lähtötietojen määrästä ja kunkin muuttujan hajonnasta huolimatta on olemassa muutamia asioita, jotka tuovat varmuutta laskelmia tehtäessä. Ensinnäkin rakennusfysiikassa on mahdollista käyttää fysikaalisia malleja, joita on testattu kokeellisesti sekä laboratoriossa että kentällä. Tällöin mahdollisimman monen ilmiön huomioon ottaminen laskentamallissa on jo askel oikeaan suuntaan. Haasteina tällöin ovat kuitenkin lähtötietojen kattavuus ja tarkkuus.

Tietyn muuttujan vaikutuksista voidaan saada lisätietoa tekemällä vertailulaskelmia. Yksittäisestä laskentatuloksesta voi olla hankala tehdä päätelmiä, mutta usean laskentatuloksen muodostamasta trendistä päätelmien tekeminen on usein helpompaa. Tällainen tarkastelu antaa tietoa esimerkiksi olosuhteiden herkkyydestä halutun muuttujan suhteen. Siinä vaiheessa, kun on saatu käyttöön laskentamalli, jonka tarkkuuteen ollaan riittävän tyytyväisiä, pystytään tekemään malliin pieniä muutoksia ja vertaamaan tuloksia hyväksytyksi todettuun arvoon. Vertailulaskelmia tehtäessä voi olla tarpeellista saada näkyviin tarkasteltavan muuttujan vaikutukset koko sen vaihteluvälillä.

Keskeisen raja-arvolauseen mukaan toistokokeessa otoksien lukumäärän kasvaessa otosten keskiarvojen jakauma lähestyy normaalijakaumaa. Tämä on tarkoitettu esimerkiksi siitä, että vaikka yksittäinen laskentatuloks ei välttämättä kuvaisikaan olosuhteita tietyssä rakennuksessa, voi se kuitenkin onnistua kuvaamaan koko populaation ominaisuuksia. Esimerkiksi FRAME-hankkeessa valitut rakennusfysikaaliset testivuodet on pyritty valitsemaan riittävän rankoiksi rakennuksen koko elinkaaren aikaa ajatellen.

Vaipparakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmän kokonaistarkkuutta ei ole tällä hetkellä määritetty. Lähtötietojen hajonta saattaa eri tilanteissa vaikuttaa eri suuntiin,

jolloin yleispätevien lukuarvojen antaminen hankaloituu. Lisäksi esimerkiksi materiaaliominaisuuksissa saattaa olla eroa eri maissa käytettävien tuotteiden välillä, jolloin paras ratkaisu on kunkin tuotteen ominaisuuksien selvittäminen erikseen. Tämän problematiikan hallitsemiseksi TTY:n analysointimenetelmän eri osioita on kehitetty erikseen aiemmissa tutkimushankkeissa ja edelleen FRAME-hankkeessa. Menetelmässä käytettyjä lähtötietoja on esitelty tarkemmin luvuissa 3 ja 4.

5.3 Laskentaohjelmien ja -mallien tarkkuus

Tässä luvussa pyritään kuvaamaan lämmön- ja kosteudensiirtoon liittyviä fysikaalisia ilmiöitä rakennusfysiikan laskentaohjelmien näkökulmasta. Rakennusfysiikan laskentaohjelmat perustuvat fysikaalisten ilmiöiden matemaattiseen mallintamiseen, jolloin laskentaohjelmien tarkkuus voi olla enintään yhtä hyvä, kuin siinä olevien mallien tarkkuus.

Laskentamallien tekeminen lähtee liikkeelle massan, energian ja liikemäärän säilymislaeista. Massaa tai energiaa ei saa syntyä tyhjästä, eikä hävitä tyhjään. Esimerkiksi tarkastelupisteeseen tulevien ja lähtevien lämpövirtojen erotus muuttaa tarkastelupisteen lämpötilaa materiaalin lämpökapasiteetin suhteessa. Vastaavasti tarkastelupisteen kosteusvirtojen erotus nostaa tai laskee tarkastelupisteessä olevan kosteuden määrää.

Yksi iso lähtökohta laskentamalleissa on oletus paikallisesta tasapainotilanteesta (local equilibrium). Tämä tarkoittaa sitä, että kussakin laskentaelementissä oletetaan vallitsevan tasapainotilanne lämpötilan ja kosteusolosuhteiden kesken. Tällöin kunkin elementin alueella päästään suoraan käyttämään stationääritilanteessa mitattuja tasapainokosteuskäyriä sekä materiaalien lämmönjohtavuutta, vesihöyrynläpäisevyyttä ja muita tarvittavia materiaaliominaisuuksia. Tästä oletuksesta seuraa myös yksikäsitteinen yhteys myös esimerkiksi veden neste- ja höyryfaasien tasapainotilanteelle tarkasteltavassa pisteessä. Makroskooppisesti eli koko rakenteen tasolla lämpö- ja kosteusvirrat ovat kuitenkin mahdollisia, sillä paikalliset olosuhteet vaihtuvat pisteestä toiseen. Useissa rakennusfysiikan tarkasteluissa olosuhteet muuttuvat niin hitaasti, että oletus toimii kohtalaisen hyvin.

Toinen iso oletus on materiaalien käsittäminen homogeenisiksi ja usein myös isotrooppisiksi. Tällöin tarkasteltavassa laskentaelementissä oletetaan vallitsevan samanlaiset ominaisuudet jokaisessa pisteessä ja jokaiseen suuntaan. Käytännössä esimerkiksi betonissa on ainakin runkoainesta, sementtiä, vettä ja ilmaa, eikä betoni tarpeeksi läheltä katsoen ole lainkaan homogeenista materiaalia. Vastaavasti esimerkiksi puun tai joidenkin mineraalivillalaaatujen ominaisuudet ovat selvästi erilaiset eri suuntiin. Saatavilla olevista mitatuista materiaaliominaisuuksista ja laskentaohjelman ominaisuuksista riippuu, millä tarkkuudella materiaalien ominaisuudet pystytään ottamaan huomioon. Vaikka laskentaohjelmassa olisi mahdollista mallintaa hyvinkin pieniä materiaalikkappaleita, on syytä pitää mielessä materiaalien todelliset mittasuhteet laskentaohjelmia käytettäessä.

Seuraavassa taulukossa on pyritty esittämään useimmin vastaan tulevia rakennusfysiikan teorian perusolettamuksia. Niiden pohjalta muodostetaan tarvittavat tasapainoyhtälöt sekä valitaan tarvittavat lämpö-, kosteus- ja ilmavirtojen lausekkeet. Kyseessä ei ole kaiken kattava esitys kaikista tilanteista, vaan eri kohtien soveltaminen tarkasteltavaan tapaukseen täytyy tehdä aina erikseen.

Taulukko 5.3.1 *Rakennusfysiikan teorian perusolettamuksia tyypillisten laskentatarkastelujen näkökulmasta.*

	Varastointi	Siirto
Lämpö	Lämpöä varastoituu perusmateriaaliin ja kosteuteen sekä tuntuvana että latenttina lämpönä.	Lämpöä siirtyy johtumalla, säteilemällä sekä konvektiolla.
Ilma	Ilma katsotaan usein kokoonpuristumattomaksi kaasuksi, jolloin ilmamäärän muutokset tarkastelupisteessä tapahtuvat nopeasti, eikä varastoitumista oteta huomioon.	Ilma liikkuu lämpötilaerojen, tuulen sekä koneellisesti synnytetyn paineen ajamana.
Vesihöyry	Vesihöyryä varastoituu vain (huokos)ilmaan. Materiaalien huokosissa vesihöyry ja vesi ovat paikallisessa tasapainotilanteessa.	Vesihöyry liikkuu diffuusiolla vesihöyryn osapaine-erojen vaikutuksesta ja ilman konvektion mukana kokonaispaine-erojen vaikutuksesta.
Nestemäinen vesi	Vettä adsorboituu huokosilmasta materiaalihuokosten pinnoille mono- ja polymolekylaarisina kerroksina sekä määrän kasvaessa kapillaarikondenssina. Kosteuden eri siirtymismuotojen seurauksena materiaaliin voi mahtua enintään avoimen huokoisuuden verran vettä.	Vesi liikkuu materiaaleissa vesimolekyylien ja perusmateriaalin välisen adheesion, vesimolekyylien välisen koheesion, painovoiman sekä ulkoisen paineen vaikutuksesta. Ennen huokosten täyttymistä vedellä vesimolekyylit liikkuvat huokosissa myös pintadiffusion vaikutuksesta.
Jää	Suuremmissa huokosissa vesi jäätyy lämpötilan tippuessa 0 °C alapuolelle. Pienemmissä huokosissa paineenalainen vesi voi pysyä sulana vielä tätä alhaisemmissa lämpötiloissa.	Jäätynyt kosteus ei liiku.

Rakennusfysiikan tämänhetkinen teoria ei ole vielä täydellinen. Esimerkiksi veden jäätymistä ei useimmissa rakennusfysiikan laskentaohjelmissa ole mukana, vaan laskentatarkastelujen näkökulmasta kosteus on aina vettä tai vesihöyryä. Kuitenkin esimerkiksi pakkasrapautumisen tiedetään aiheutuvan juuri jäätyvän ja sulavan veden tilavuuden muutoksista, joten ilmiö on kyllä olemassa. Edelleen esimerkiksi ikkunoiden tai julkisivun ulkopintaan voi syntyä pakkasöinä kuuraa, mutta laskentaohjelmissa kyseessä on vain tarkastelupisteen kosteuspitoisuuden nousu. Veden jäätyminen ja sulamisen huomioon ottavia laskentamalleja on olemassa, mutta ne eivät ole yleisessä käytössä.

Materiaalien kosteuspitoisuutta voidaan kuvata joko hygroskooppisen tai kapillaarisen tasapainokosteuskäyrän avulla. Ensimmäisessä kuvataan materiaalin sisältämä kosteuden

määrä ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden funktiona ja jälkimmäisessä huokosveden kapillaari-imun funktiona. Kun on tehty oletus paikallisesta tasapainotilanteesta, voidaan käyrien välillä tehdä muunnoksia Kelvinin lain avulla. Materiaaliominaisuuksien mittauksen kannalta eri tavat täydentävät toisiaan, eli suhteellisen kosteuden ollessa korkea, on helpompi käyttää kapillaarista tasapainokosteuskäyrää ja taas esimerkiksi normaalin huoneilman suhteellisen kosteuden alueella hygroskooppista tasapainokosteuskäyrää eli sorptiokäyrää. Kummassakin tavassa on kuitenkin mukana tarkasteltavasta materiaalista riippuva hystereesi, eli käytännössä materiaalin sisältämän kosteuden määrä tasapainotilanteessa vaihtelee riippuen siitä, onko materiaali kastumassa vai kuivumassa.

Painelevylaitteistolla mitattu kapillaarinen tasapainokosteuskäyrä on desorptiokäyrä (kuivumiskäyrä), koska kyseissä menetelmässä märästä materiaalista ajetaan kosteutta pois koekappaleen ulkopuolista painetta kasvattamalla. Täysin märäksi kastuvan materiaalin absorptiokäyrän loppupäätä ei tällä hetkellä osata mitata tarkasti, sillä koekappaletta ei osata hallitusti viedä olosuhteista noin 97 % RH olosuhteisiin 100 % RH.

Ohjelmien tavassa määritellä tasapainokosteuskäyrät voi olla eroja. Esimerkiksi WUFI-ohjelmassa suhteellisen kosteuden arvoa 100 % RH vastaa kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus ja koko huokostilan täyttyminen vedellä vastaa tilannetta 101 % RH. Tämä tapa on valittu numeerisen ratkaisun helpottamiseksi. Delphin -ohjelmassa kappaleen kosteuspitoisuus upotuskokeessa vastaa suhteellista kosteutta 100 % RH.

Nestemäisen veden siirtymistä materiaalissa kapillaarisesti voidaan kuvata joko kosteuspitoisuuserojen avulla (diffusiviteetti) tai vedenpaine-erojen avulla (kosteudenjohtavuus). Kapillaarisen veden paine, ilmanpaine ja kapillaari-imu muodostavat voimien tasapainoyhtälön ja sitä kautta aidon potentiaalisen veden siirtymiselle materiaalissa. Kosteudenjohtavuuden arvoja on kuitenkin vaikeampi mitata, koska esimerkiksi veden kapillaari-imun mittaaminen on hankalaa. Materiaalin kosteuspitoisuus sen sijaan ei ole aito ajava potentiaali, mutta materiaaliominaisuuksien määrittäminen (nestemäisen veden diffusiviteetin) on tällä lähestymistavalla helpompaa. Materiaalin kosteuspitoisuus voidaan määrittää yksinkertaisesti esimerkiksi punnitsemalla kappale määräajoin. Kosteudenjohtavuuden käyttäminen olisikin laskennan kannalta parempi tapa, mutta toisaalta materiaalien kosteusdiffusiviteettejä voi olla helpommin saatavilla.

Diffuusiolla siirtyvän vesihöyryn ja kapillaarisesti siirtyvän veden kosteusvirtojen suunta rakenteessa ei ole välttämättä sama. Tästä syystä kumpikin kosteusvirta olisi syytä määrittää laskennassa erikseen. Tällöin tarvitaan materiaaliominaisuudet erikseen vesihöyryn diffuusiolle ja veden kapillaariselle siirtymiselle. Kuitenkin, jos materiaalikokeita tehdään, niin tyypillisesti tuloksena saadaan kokonaiskosteusvirta, joka tarvitsee valituin oletuksin jakaa diffuusiolla ja kapillaarisesti siirtyvään kosteusvirtaan. Tätä varten on olemassa erilaisia tapoja. Yksi tapa on olettaa diffuusiiovirta kuivan materiaalin läpi suurimmaksi mahdolliseksi diffuusion arvoksi, jota materiaaliin muodostuvat vesisaarekkeet pienentävät. Tällöin kosteusvirran nousu kosteammissa olosuhteissa tulkitaan veden kapillaarisesti siirtymiseksi.

Toinen tapa on pyrkiä löytämään mittaustuloksista piste, jossa kosteusvirran käyttäytyminen muuttuu selvästi. Tätä pistettä kuivemmissä olosuhteissa kosteuden voitaisiin olettaa siirtyvän ainoastaan diffuusiolla ja kosteusvirran kasvu muodostuisi veden kapillaarisesta virtauksesta. Vanhemmissa laskentaohjelmissa tällaista jakoa ei välttämättä ole tehty lainkaan, vaan vesihöyryn läpäisevyysarvoja käytetään sellaisenaan rakenteiden tarkasteluissa.

Ilman ja veden viskositeetti riippuu fluidin lämpötilasta, joten ilmavirran ja kapillaarisen veden virtauksen laskennan tulisi tarkalleen ottaen olla lämpötilariippuvainen. Kuitenkin erityisesti kosteuteen liittyviä materiaaliominaisuuksia on mitattu vain huonelämpötilassa, joten tällöin edellä mainittu lämpötilariippuvuus jätetään pois tarkasteluista. Materiaalien lämmönjohtavuus on kaikkien lämmön siirtymismuotojen summa ja esimerkiksi säteilyllä huokosten pinnasta pintaan siirtyvä lämpö riippuu myös pintojen lämpötiloista. Näin ollen erityisesti huokoisten materiaalien lämmönjohtavuus riippuu jonkin verran myös lämpötilasta. Tätä vaikutusta ei laskentaohjelmissa kuitenkaan yleensä oteta huomioon. Kapillaariputken meniskuksen yllä olevan ilman kyllästyskosteuspitoisuus riippuu putken halkaisijan lisäksi myös veden lämpötilasta (Thompsonin laki). Näin ollen esimerkiksi ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden lisäksi myös materiaalin lämpötila vaikuttaa tasapainokosteuden määrään. Lämpötilariippuvuuden on kuitenkin katsottu olevan vain pieni ja suurin vaikutus on ympäröivän ilman suhteellisella kosteudella.

Materiaalien vesihöyrynläpäisevyys ja nestemäisen veden diffusiviteetti/kosteudenjohtavuus riippuvat materiaalin sisältämän veden määrästä. Tämä riippuvuus on yleensä mukana laskentaohjelmissa mittaustarkkuuden rajoissa. Näiden lisäksi kosteuspitoisuus vaikuttaa myös materiaalin lämmönjohtavuuteen. Laskentaohjelmasta riippuen vaikutus on otettu huomioon kasvattamalla märän materiaalin lämmönjohtavuutta kosteuspitoisuuden ja veden lämmönjohtavuuden suhteessa verrattuna kuivaan materiaaliin.

Joillakin materiaaleilla, kuten puulla, myös materiaalin kosteuspitoisuuden muutoksen seurauksena tapahtuvat mittamuutokset voivat vaikuttaa materiaalin rakennusfysikaalisiin ominaisuuksiin. Materiaalien koon muuttumista kosteuspitoisuuden tai lämpötilan funktiona ei yleensä ole mukana laskelmissa. Lämpö- tai kosteuslaajenemisen laskemiseksi on kuitenkin olemassa laskentamalleja, mutta tarvittavia materiaaliominaisuuksia ei välttämättä aina ole valmiiksi saatavilla.

Lämmön- ja kosteudensiirron tarkasteluissa on mukana myös ilmavirtausten laskenta yleensä vain erikoistapauksissa. Ilmavirtauksia voi tapahtua rakenteissa olevien rakojen kautta rakenteen läpi, sisäisenä konvektiona huokoisissa rakennusmateriaaleissa sekä rakenteessa olevissa raoissa ja rei'issä. Ilmavirtausten mukaan ottaminen laskentaan vaatii tänä päivänä huomattavasti enemmän tietokoneen laskentakapasiteettia, sillä tarkka mallinnus vaatisi CFD-laskennan käyttöä. Yksinkertaisemmilla malleilla laskenta on kevyempää, mutta tulokset eivät välttämättä ole tarkkoja.

Ilmaa vasten olevien pintojen lämmön- ja kosteudensiirtokertoimet riippuvat ainakin ilmavirtauksen tyypistä pinnalla (luonnollinen, pakotettu) sekä ilmavirtauksen nopeudesta. Tyypillisesti laskentaohjelmissa on mahdollisuus valita käytettäväksi esimerkiksi käyttäjän syöttämät vakioarvot tai empiirisiin kaavoihin perustuvat muuttuvat pinnan lämmön- ja kosteudensiirtokertoimet.

Laskentaohjasta riippuen ohjelma voi osata käsitellä lämmön- ja kosteudensiirron lisäksi myös muita erityistarkasteluja, kuten VOC-yhdisteiden tai suolojen liikkumista, homeen kasvua ja taantumaa, lämpö- ja kosteusliikkeitä, jäätymis-sulamis-syklejä tai teräksen korrodoitumista.

5.4 Materiaalikoekiden tarkkuus

Seuraavassa käydään läpi kaksi esimerkkiä materiaaliominaisuuksien mittauksen virheiden arvioinnista. Ensimmäinen esimerkki liittyy vesihöyrynläpäisevyyskokeisiin (kuppikokeisiin) ja toinen veden absorptiokokeeseen.

Fickin lain avulla voidaan laskea massavirta kuppikokeessa testikappaleen läpi:

$$\Delta m = \frac{\delta_{v,a}}{\mu} \cdot \frac{v_{sat}(\varphi_1 - \varphi_2)}{L} \cdot \Delta t \quad (5.4.1)$$

missä

Δm	on mitattu koekappaleen ja kupin massan muutos [kg]
$\delta_{v,a}$	on paikallaan olevan ilman vesihöyrynläpäisevyys [m^2/s]
μ	on tutkittavan materiaalin vesihöyryn diffuusiovastuskerroin [-]
v_{sat}	on ilman kyllästyskosteuspitoisuus [kg/m^3]
φ_1 ja φ_2	ovat ilman suhteelliset kosteudet koekappaleen eri puolilla [% RH]
L	on koekappaleen paksuus [m]
Δt	on ajanhetken pituus, jossa massan muutos tapahtuu [s].

Tästä saadaan ratkaistua vesihöyryn diffuusiovastuskerroin:

$$\mu = \frac{\delta_{v,a}}{\Delta m} \cdot \frac{v_{sat}(\varphi_1 - \varphi_2)}{L} \cdot \Delta t \quad (5.4.2)$$

Derivoimalla yhtälö kupin ulkopuolen suhteellisen kosteuden φ_2 suhteen ja kertomalla tulos ulkopuolisen RH-anturin tarkkuudella saadaan virheen kokonaisdifferentiaali RH-anturin tarkkuudesta (positiivisena lukuna):

$$d\mu = \frac{\delta_{v,a} v_{sat} \Delta t}{L \Delta m} \Delta \varphi_2 \quad (5.4.3)$$

Jakamalla virhe lasketulla diffuusiovastuskertoimen arvolla saadaan vesihöyryn diffuusiovastuskertoimen suhteellinen virhe joka aiheutuu kupin ulkopuolen RH-anturin epätarkkuudesta:

$$\frac{d\mu}{\mu} = \frac{\Delta\varphi_2}{\varphi_2 - \varphi_1} \quad (5.4.4)$$

Esimerkiksi jos kupin sisällä on suhteellinen kosteus 33 % RH ja ulkopuolella 85 % RH ja ulkopuolen suhteellisen kosteuden mittausvirhe on 1 % RH, niin tällöin mittalaitteesta aiheutuva vesihöyryn diffuusiovastuskertoimen suhteellinen virhe on 1 % RH / (85 % RH – 33 % RH) ≈ 2 %.

Toinen esimerkki koskee WUFI-ohjelman sisältämää tapaa määrittää kosteusdiffusiviteetti kapillaarivirtaukselle. Kapillaarivirtauksen kosteusdiffusiviteetti (D_{ws}) on materiaaliominaisuus, joka kuvaa kosteuspitoisuuserojen tasoittumisnopeutta materiaalin sisällä kapillaari-imupaineen vaikutuksesta. Kyseessä on epälineaarinen funktio, jonka arvo riippuu materiaalin sisältämän veden määrästä. Ellei tarkemmin määritettyjä arvoja ole saatavilla, on Künzeli (1995) ehdottanut kivipohjaisille materiaaleille seuraavaa likiarvokaavaa kapillaarivirtauksen kosteusdiffusiviteetin D_{ws} laskemiseksi veden imeytymiskertoimesta A_w :

$$D_{ws}(w) = 3,8 \cdot \left(\frac{A_w}{w_{cap}} \right)^2 \cdot 1000^{\frac{w}{w_{cap}} - 1} \quad (5.4.5)$$

missä

$D_{ws}(w)$ on kapillaarivirtauksen kosteusdiffusiviteetti (materiaalin kosteuspitoisuuden funktiona) [m^2/s]

w on materiaalin kosteuspitoisuus [kg/m^3]

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

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

Kaavan alkuosa on kerroin, jota skaalataan kaavan jälkimmäisen puoliskon materiaalin kosteuspitoisuudesta riippuvalla kertoimella. Laskemalla lausekkeen differentiaali A_w -termin suhteen saadaan:

$$dD_{ws}(w) = \frac{3,8}{w_{cap}^2} \cdot 1000^{\frac{w}{w_{cap}} - 1} \cdot 2A_w \Delta A_w \quad (5.4.6)$$

Jakamalla tämä kapillaarivirtauksen kosteusdiffusiviteetin arvolla saadaan veden imeytymiskertoimen hajonnasta aiheutuva virhe:

$$\frac{dD_{ws}(w)}{D_{ws}(w)} = \frac{2\Delta A_w}{A_w} \quad (5.4.7)$$

Standardissa SFS-EN ISO 15148 (2002) luvussa 9 on annettu esimerkki, että jos veden imeytymiskertoimen määrittämisessä testikappaleen massa on punnittu kahdeksan kertaa ja vaa'an virhe on noin 5 %, tulee veden imeytymiskertoimen virheeksi tällöin noin 4 %. Käyttäen tätä arvoa edellisessä kaavassa saadaan kapillaarivirtauksen kosteusdiffusiviteetin suhteelliseksi virheeksi tällöin $2 \times (0,04A_w)/A_w = 8 \%$.

Näiden esimerkkien lisäksi on syytä muistaa, että materiaalikokeiden lopulliseen tulokseen vaikuttavat vielä muutkin asiat kuin nyt esitetyt mittalaitteiden tarkkuudet. Tällaisia ovat esimerkiksi koekappaleen geometrian huomioon ottaminen, mittalaitteiden soveltuvuus ja kalibrointi sekä mittaajan huolellisuus. Useamman kappaleen mittaussarjassa yksittäisten materiaalien erot tasoittuvat ja suuret virheet saadaan poimittua pois.

5.5 Laskentatulosten vertailu puurunkoisten ulkoseinien laboratorikoetuloksiin

5.5.1 Yleistä

TTY:n Rakennustekniikan laitoksen rakennusfysikaalinen tutkimuslaitteisto mahdollistaa erilaisten seinäelementtien lämpö-, kosteus- ja ilmavirtateknisen tarkastelun laboratorioolosuhteissa. Kyseessä on pakkashuoneeseen sijoitettu kammio, jonka yhdelle avoimelle sivulle on mahdollista asentaa erilaisia pystysuoria rakenteita tutkittavaksi. Olosuhteet rakenteen eri puolilla ovat säädettävissä automatiikan avulla ja tarvittavien anturien avulla kerätään tietoa talteen olosuhteista rakenteen eri osista. Laitteiston toimintaa on kuvattu tarkemmin muun muassa lähteessä Vinha (2007, luku 3), ja siitä on esitetty kuvia luvussa 7.3.

Rakennusfysikaalisella tutkimuslaitteistolla on tutkittu puurunkoisten ulkoseinien kosteusteknistä toimintaa vuosina 1997–1998 ja 2000–2004. Tutkittujen seinärakenteiden materiaaliominaisuuksia on mitattu lisäksi vuosina 1999–2004 (Vinha et al. 2005). Näistä tutkimuksista saatuja lähtötietoja käyttäen seinärakenteita on mallinnettu laskennallisesti sekä WUFI-2D 2.1 että Delphin 5.6.5 -laskentaohjelmilla. WUFI-laskennan tuloksia on raportoitu lähteissä Kalamees & Vinha (2003) ja Vinha (2007, luku 5). Delphin-laskennan tuloksia on käsitelty lähteissä Laukkarinen (2011; 2012a).

Laboratoriokokeissa puurunkoisten ulkoseinien rakennekerrokset sisältä ulospäin olivat: kipsilevy, kalvomainen höyryn-/ilmansulku, puurunko ja lämmöneriste, tuulensuojalevy, tuuletusväli ja julkisivulaudoitus. Materiaalien tiheys, lämmönjohtavuus, vesihöyrynläpäisevyys, veden imeytymiskerroin, tasapainokosteuskäyrä hygroskooppisella alueella, kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus ja kyllästyskosteuspitoisuus upotuskokeessa olivat mitattuja materiaaliarvoja. Muut laskennassa käytettävät lähtötiedot, kuten ominaislämpökapasiteetti ja huokoisuus olivat kirjallisuusarvoja tai mittausten perusteella arvioituja arvoja. WUFI-laskelmissa nestemäisen veden diffusiviteetti määritettiin veden imeytymiskertoimen avulla. Delphin-laskelmia varten materiaalien kosteudenjohtavuus

laskettiin soveltamalla Schefflerin (2008) esittämää menetelmää (Laukkarinen 2012a). Jokaisessa laboratoriokokeessa koelaitteen $1,2 \times 1,2 \text{ m}^2$ kokoiseen aukkoon oli sovitettu neljä eri rakennetta vierekkäin.

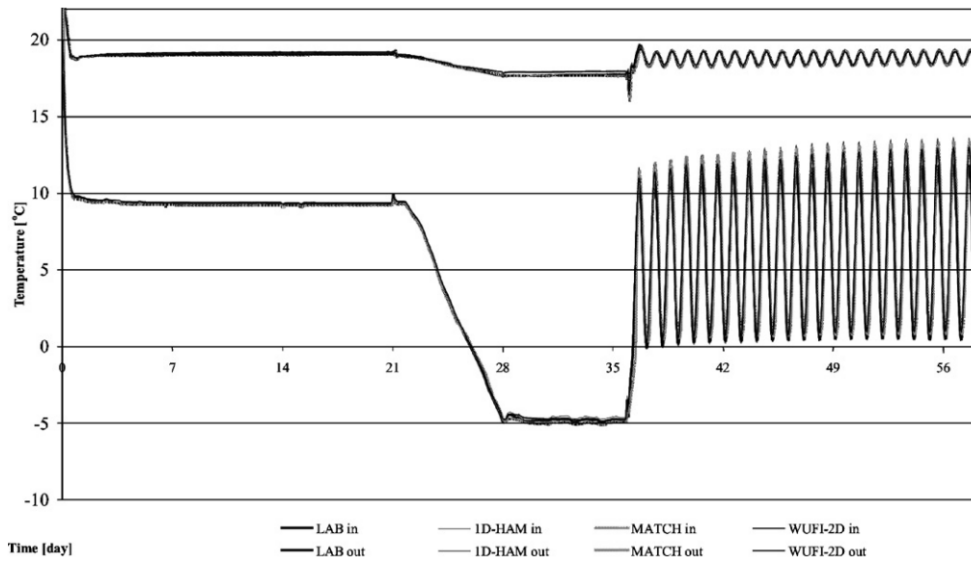
Yksittäisistä seinärakenteista tehtiin laskentaohjelmiin lämmön ja kosteuden liikkeet huomioon ottava 2D-malli. Ilman liikkeitä ei laskentamallissa otettu huomioon. Reunaehtoina laskennassa käytettiin sisäverhouslevyn sisäpinnalta ja tuulensuojalevyn ulkopinnalta mitattuja pintalämpötiloja sekä rakenteen sisältä ja tuuletusvälistä mitattua suhteellista kosteutta. WUFI-laskelmissa pinnan RH laskettiin pinnan viereisen ilman suhteellisesta kosteudesta ottamalla huomioon lämpötilan muutos ilmasta pinnalle ja pitämällä vesihöyryn osapaine samana. Delphin-laskelmissa tätä muunnosta ei tehty. Reunaehtoina laskennassa käytettiin 15 minuutin välein mitatuista olosuhteista laskettuja tuntikeskiarvoja.

Ennen rakennekokeiden alkua koekappaleita säilytettiin olosuhdehuoneissa, jonka perusteella määritettiin laskennan alkuolosuhteet. Rakenteen alkulämpötila kaikissa tapauksissa oli $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ja lämpimän puolen suhteelliseksi kosteudeksi laskennan alussa asetettiin 70 % RH. Lämmöneristeen ja tuulensuojalevyn alkutilanteen suhteellinen kosteus vaihteli ja valittiin mitattujen alkuarvojen mukaan.

Seuraavassa käydään läpi näistä vertailulaskelmista saatuja tuloksia sekä arvioidaan rakenteiden mallintamisen tarkkuutta ja huomioon otettavia asioita.

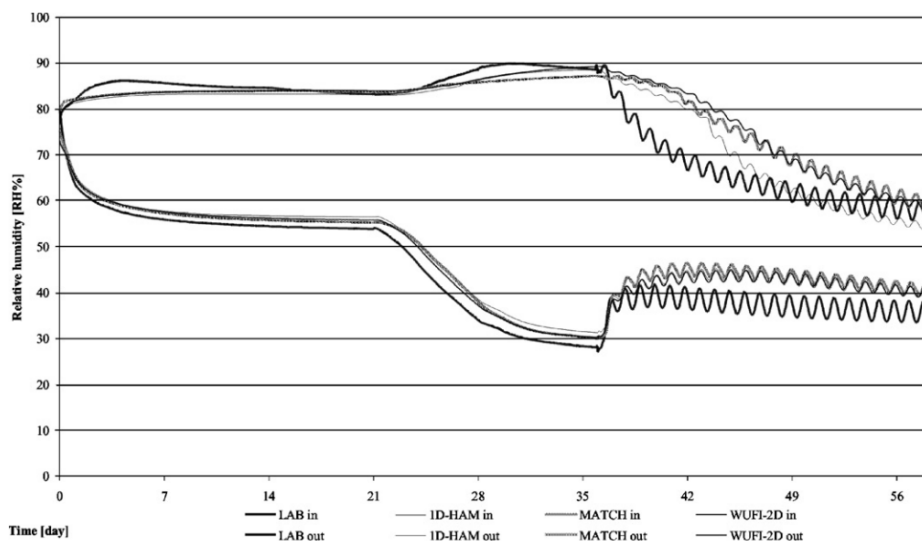
5.5.2 WUFI-ohjelmalla tehdyt vertailut

Kuvassa 5.5.1 on esitetty WUFI-ohjelmalla saatuja vertailutuloksia. Kuvat sisältävät laskentatuloksia myös muista ohjelmista. Kuvassa on esitetty mitattu ja laskettu lämpötila puukuitueristetyn rankaseinän sisä- ja ulkopinnassa (Kalamees & Vinha 2003). Sama seinärakenne on käsitelty lähteessä Vinha (2007) tunnuksella 3b.



Kuva 5.5.1 Mitattu ja laskettu lämpötila seinärakenteen 3b sisä- ja ulkopinnassa (Kalamees & Vinha 2003). Lasketut olosuhteet vastaavat mitattuja olosuhteita hyvin.

Kuvassa 5.5.2 on esitetty mitattu ja laskettu suhteellinen kosteus seinärakenteen sisä- ja ulkopinnassa.

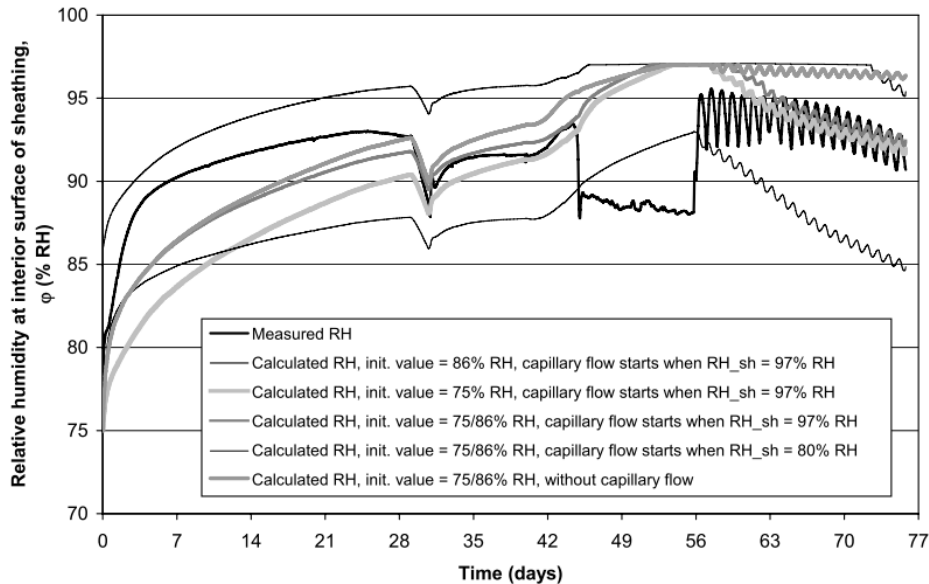


Kuva 5.5.2 Mitattu ja laskettu suhteellinen kosteus seinärakenteen 3b sisä- ja ulkopinnassa (Kalamees & Vinha 2003).

Suhteellisen kosteuden vertailutapauksista nähdään, että rakenteen ulkopinnassa lasketut olosuhteet muuttuvat hitaammin kuin mitatut. Sen sijaan rakenteen sisäpinnassa mittaustulosten loppuosalla laskettu suhteellinen kosteus muuttuu enemmän kuin mitatut arvot. Yleisesti ottaen laskenta- ja mittaustulosten vastaavuus on kuitenkin kohtalaisen hyvä, erityisesti lämpötilan osalta.

Rakennusfysikaalisella tutkimuslaitteistolla tehtyjen seinärakenteiden laboratoriotulosten vertailua laskentatuloksiin on raportoitu myös lähteessä (Vinha 2007). Kuvassa

5.5.3 on esitetty lähteessä tarkastellun rakenteen 10b mittaus- ja laskentatulokset. Kyseessä on puukuitueristetty rankaseinä, jonka sisäpinnassa on bitumipaperi ja ulkopinnassa kova puukuitulevy. Tarkemmat tiedot olosuhteista rakenteen reunoilla sekä muista laskentaan liittyvistä yksityiskohdista löytyvät edellä mainitusta lähteestä.

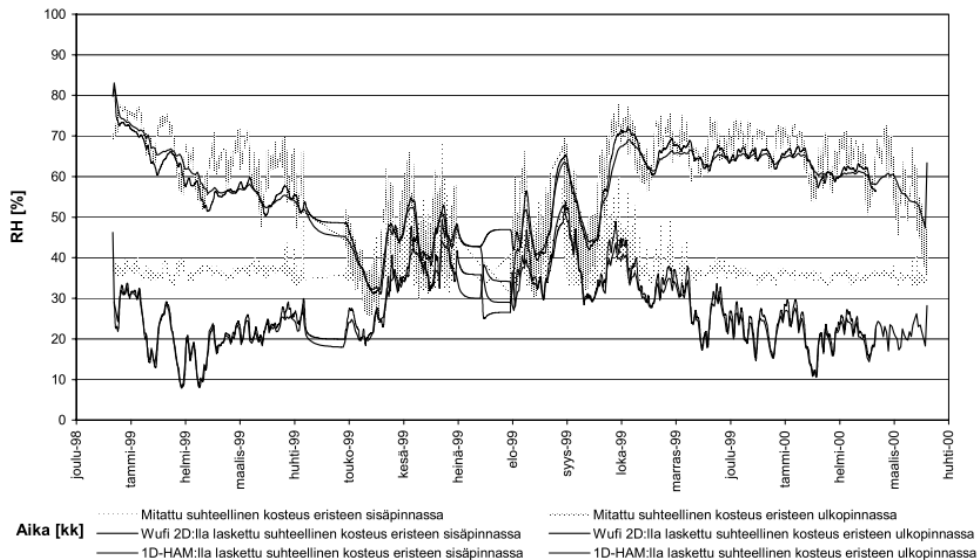


Kuva 5.5.3 Mitattu ja laskettu suhteellinen kosteus lämmöneristeen ulkopinnassa puurunkoseinässä 10b (Vinha 2007).

Sekä rakenteessa 3b että 10b oli sisältä ulospäin lukien kipsilevy, bitumipaperi ja puukuitueriste, mutta rakenteessa 3b oli tuulensuojalevynä huokoinen puukuitulevy 25 mm ja rakenteessa 10b kovalevy 4,8 mm. Molempien seinien sisä- ja ulkopuolen lämpötila- ja RH-olosuhteet olivat kokeissa lähes samanlaiset. Kovalevyn takana suhteellinen kosteus nousi kuitenkin korkeammalle tasolle, koska sen vesihöyrynläpäisevyys on pienempi kuin huokoisella puukuitulevyllä. Näin ollen seinärakenteen 10b kosteusolosuhteet ulkopinnan lähellä olivat selvemmin kapillaarisella alueella kuin seinässä 3b. Tästä johtuen laskentatulosten ja koetulosten väliseen eroon vaikutti voimakkaasti materiaaleille annetut kapillaariset ominaisuudet ja niiden vaikutusta on tarkasteltu kuvassa 5.5.3. Lisäksi kuvassa on tarkasteltu laskennan alussa annettavan materiaalien alkukosteuspitoisuuden vaikutusta tuloksiin.

Kuvan 5.5.3 perusteella voidaan todeta, että materiaalien kapillaaristen ominaisuuksien tarkkuuteen on kiinnitettävä erityistä huomiota, jos rakenteen kosteuspitoisuudet ovat ajoittain kapillaarisella alueella. Kapillaarisuusominaisuudet puuttuvat kuitenkin osalta rakennusmateriaaleista kokonaan ja monissa materiaaleissa ne ovat puutteellisesti määritettyjä. Yksi syy tähän on se, että niiden mittaaminen tarkasti on hankalampaa verrattuna muihin rakennusfysikaalisiin materiaaliominaisuuksiin. Puutteellisista materiaaliarvoista johtuen laskentavirheiden todennäköisyys kasvaa kosteissa olosuhteissa tehdyissä mallinuksissa ja tämä tulee ottaa huomioon mm. rakenteiden kuivumis- ja kondensoitumistarkasteluissa.

Rakenteiden lämpötila- ja kosteusolosuhteita on mitattu myös kenttäolosuhteissa puukuitu- ja mineraalivillaeristetyssä puurunkoisessa ulkoseinässä ja samojen rakenteiden toimintaa on mallinnettu myös rakennusfysikaalisilla laskentaohjelmilla (Vinha et al. 2003). Seuraavassa kuvassa on verrattu mitattua ja laskettua suhteellista kosteutta mineraalivillaeristetyn puurunkoisen ulkoseinän sisä- ja ulkopinnassa.



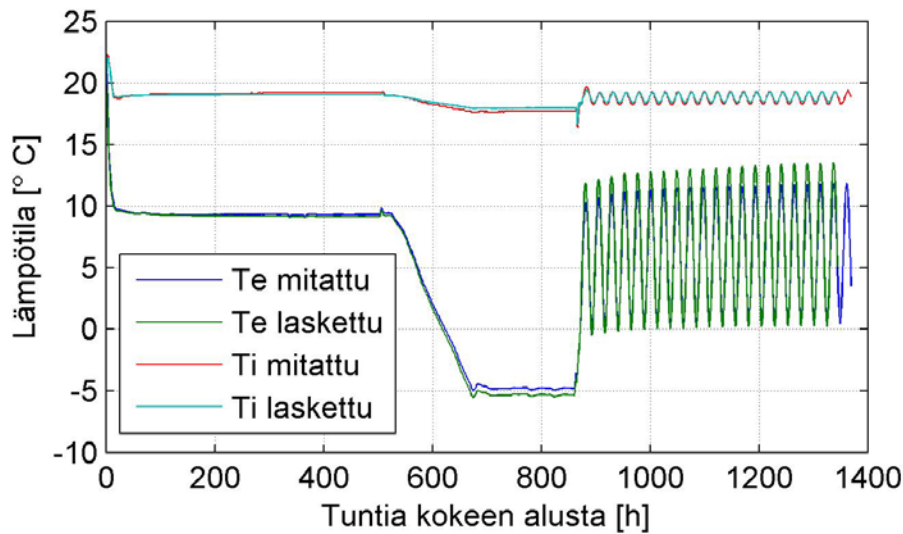
Kuva 5.5.4 Mitattu ja laskettu suhteellinen kosteus mineraalivillaeristetyn ulkoseinän sisä- ja ulkopinnassa kenttäolosuhteissa (Vinha 2003).

Kenttämittauksissa tarkastellulle mineraalivillaeristetylle rakenteelle mitattu suhteellinen kosteus lämmöneristeen sisäpinnassa oli talvisin laskettuja arvoja korkeampi. Myös lämmöneristeen ulkopinnassa mitattu suhteellinen kosteus oli hieman korkeampi kuin laskettu, mutta ei kuitenkaan yhtä paljon kuin lämmöneristeen sisäpinnassa. Kesäkaudella sisä- ja ulkopinnan väliset olosuhde-erot tasoittuvat ja siten myös laskennassa esiintyvät puutteet eivät ole esillä yhtä selvästi kuin talvella. Mitatut ja lasketut lämpötilakentät vastasivat toisiaan kohtalaisen hyvin (lämpötilakuvia ei ole esitetty tässä yhteydessä). (Vinha 2003)

5.5.3 Delphin-ohjelmalla tehdyt vertailut

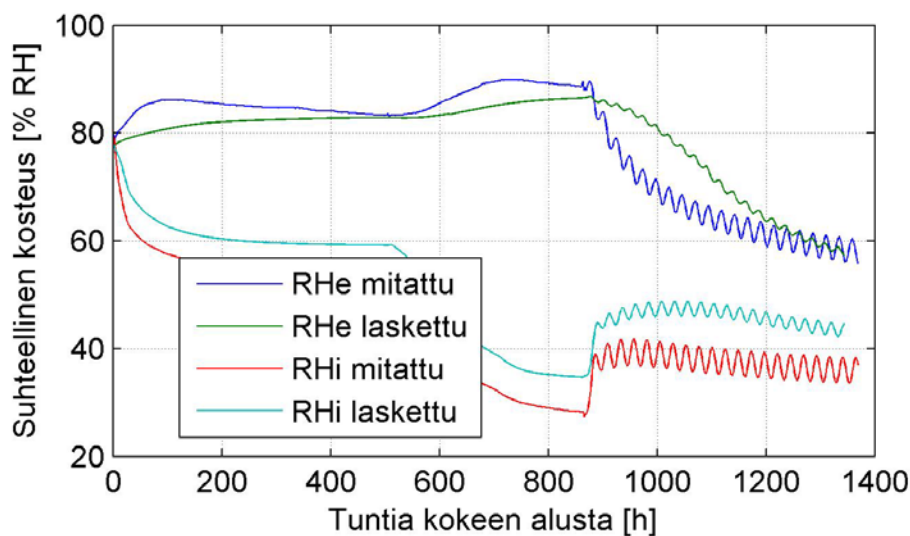
Materiaaliominaisuuksien määritysmenetelmä sekä tulokset useammalle rakenteelle on käsitelty tarkemmin lähteissä (Laukkarinen 2011; Laukkarinen 2012a). Kyseisessä Schefflerin (2008) esittämässä menetelmässä kuppikokeessa kappaleen läpi kulkeva nestemäisen veden virtaus lasketaan ensin kokonaiskosteusvirran ja kuivimman tilanteen kosteusvirran erotuksena. Diffuusiovirran oletetaan tippuvan nollaan täysin kastuneessa materiaalissa. Jäljelle jääneen kosteusvirran ja mittausolosuhteiden perusteella lasketaan materiaalin kosteudenjohtavuus kalibroimalla kyseinen materiaaliominaisuus kosteuspitoisuuden funktiona kuppikoetta simuloimalla.

Seuraavassa kuvassa on esitetty edellisessä luvussa käsitellyn rakenteen 3b laskentatulokset Delphin-ohjelmalla.



Kuv 5.5.5 Mitattu ja laskettu lämpötila lämmöneristeen ulko- ja sisäpinnassa rakenteessa 3b (Laukkarinen 2012a).

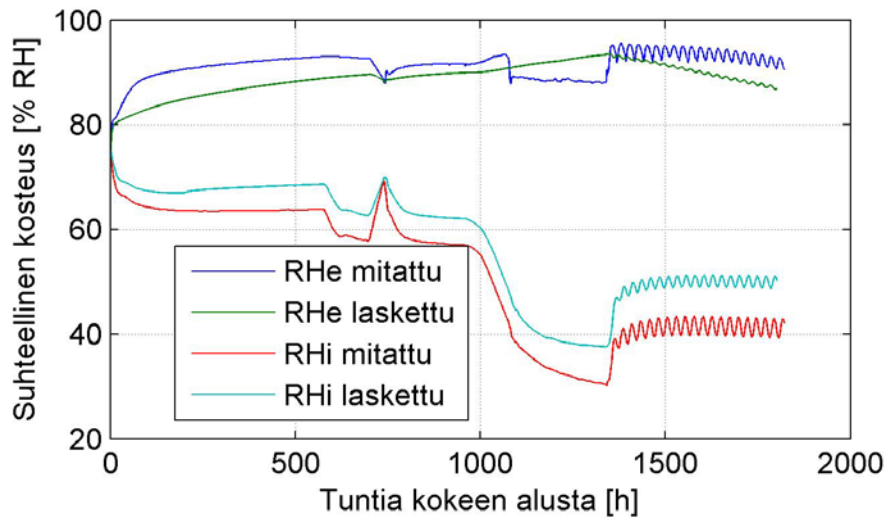
Seuraavassa kuvassa on esitetty suhteellisen kosteuden laskentatulokset rakenteelle 3b.



Kuva 5.5.6 Mitattu ja laskettu suhteellinen kosteus lämmöneristeen ulko- ja sisäpinnassa rakenteessa 3b (Laukkarinen 2012a).

Kuvista 5.5.5 ja 5.5.6 huomataan, että laskentatulosten tarkkuus on samaa suuruusluokkaa kuin aikaisemmin esitetyissä WUFI-laskelmissa. Lämpötilakentän mittaus- ja laskentatulokset vastaavat toisiaan hyvin, mutta suhteellisessa kosteudessa olisi parannettavaa. Koska mitatut ja lasketut lämpötilat vastaavat toisiaan hyvin, johtuvat suhteellisen kosteuden erot todennäköisesti kosteuden siirtymiseen liittyvistä laskelmista.

Seuraavassa kuvassa on esitetty suhteellisen kosteuden mittaus- ja laskentatulokset rakenteelle 10b.



Kuva 5.5.7 Mitattu ja laskettu suhteellinen kosteus lämmöneristeen ulko- ja sisäpinnassa rakenteessa 10b (Laukkarinen 2012a).

Kuvasta 5.5.7 havaitaan, että lämmöneristeen sisäpinnassa (kuivissa olosuhteissa) laskettu suhteellinen kosteus vastaa mitattuja arvoja trendiltään hyvin, mutta arvoissa on lähes vakiosuuruinen virhe läpi koko tarkastelujakson. Lämmöneristeen ulkopinnassa (kosteammassa olosuhteissa) taas suhteellisen kosteuden taso on paremmin kohdallaan, mutta kosteusolosuhteiden muutosten mallinnuksessa on puutteita.

5.5.4 Tulosten arviointia

Olosuhteiden nopea vaihtelu koerakenteen reunoilla vaikeutti laboratoriokeiden mallinnusta. Mitatut arvot olivat herkempiä kosteuden vaihtelulle niin, että mitattu suhteellinen kosteus muuttui nopeammin kuin lasketut arvot. Materiaaliominaisuuksien riippuvuus lämpötilasta ja kosteusolosuhteista vaikeuttaa laskennassa käytettävien arvojen määrittämistä. Laskentaa varten tehdyt yksinkertaistukset ovat voineet tuottaa virhettä mittaus- ja laskentatulosten välille. Verrattaessa laskentatuloksia mittaustuloksiin tulee ottaa huomioon myös mittaustarkkuus sekä materiaali- että rakennekokeissa. Yksittäisen lämpötilan mittaustarkkuudeksi on annettu $\pm 0,4$ °C, lämpötilan keskiarvon tarkkuudeksi $\pm 0,2$ °C, suhteellisen kosteuden tarkkuudeksi $\pm 2-3$ % RH ja ilman vesihöyrypitoisuuden tarkkuudeksi $\pm 0,05-0,5$ g/m³. (Kalamees & Vinha 2003)

Laskentatulosten tarkkuudelle ei ole tällä hetkellä määritetty yksittäistä lukuarvoa. Esimerkiksi suhteellisen kosteuden arvoissa sekä absoluuttinen erotus mittaustuloksiin että trendien samankaltaisuus vaihtelevat.

Edellä esitettyjen kuvien mittasuhteet vaikuttavat tulkintaan virheen suuruudesta. Yleisesti hyväksyttyä tapaa vertailla eri laskentatapauksia keskenään ei kuitenkaan tällä hetkellä ole

olemassa. Jos laskentamalliin tehdään muutoksia, on kalibrointi- ja vertailutapaukset pidettävä erillään. Lisäksi vertailulaskelmien virheen suunnan perusteella ei tule tehdä lopullisia johtopäätöksiä eri rakenteiden laskelmissa esiintyvän virheen suunnasta.

Suhteellisen kosteuden virhe kasvattaa merkitystään korkeissa arvoissa liikuttaessa. Esimerkiksi homeen kasvulle kriittisen suhteellisen kosteuden raja-arvon ylittäminen muuttaa taantuman kasvuksi. Jos laskennassa suhteellinen kosteus muuttuu todellista hitaammin, voi tällöin suhteellisen kosteuden noustessa jäädä homeen kasvulle otollisia olosuhteita pois laskelmista. Vastaavasti taas rakenteen liian hidaskuivuminen voi vääristää tuloksia. Yleisesti ottaen on kuitenkin syytä pyrkiä olemaan laskelmissa varmallalla puolella.

Rakennusfysikaalisissa laskentatarkasteluissa varmuuden lisäämiseen on kuitenkin olemassa vain vähän vaihtoehtoja. Sisäilman kosteuslisän lisääminen todellista suuremmaksi voi tulla kysymykseen joissakin tapauksissa, mutta monessa tapauksessa rakenteiden kosteustekninen toiminta voi riippua pelkästään ulkoilman olosuhteista ja niiden muuttaminen ei ole perusteltua muuten kuin tulevaisuuden ilmastoa arvioitaessa. Lisävarmuuden laittaminen materiaaliominaisuuksiin on myös erittäin hankalaa, koska materiaaliominaisuudet muuttuvat lämpötilan ja suhteellisen kosteuden muuttuessa. Lisäksi on huomattava, että vaipparakenteissa kosteus liikkuu eri vuoden- ja vuorokaudenaikoina eri suuntiin, jolloin materiaaliominaisuuksien muuttaminen parantaa tai heikentää rakenteen toimintaa tilanteesta riippuen. Näin ollen, jos laskentamallit on tehty mahdollisimman hyvin ja oikein, voidaan laskentatarkastelun varmuutta parantaa yleensä ainoastaan valitsemalla toimintakriteerejä kuvaavat raja-arvot riittävän tiukoiksi.

5.6 Laskentatulosten vertailu ylä- ja alapohjien kenttämittaustuloksiin

5.6.1 Yleistä

FRAME-projektin yhtenä osana on ollut tuulettuvien yläpohjien ja ryömintätilaisten alapohjien kenttämittausten toteutus. Viiden tuulettuvan yläpohjan ja kuuden ryömintätilaisen alapohjan lämpötila- ja kosteusolosuhteista on kerätty tunnittaista dataa itsenäisesti toimivilla dataloggereilla yli vuoden ajan kohteesta riippuen. Mittauskohteet sijaitsivat Tampereen ja pääkaupunkiseudun alueella. Mitatut rakennukset olivat 1978–2007 rakennettuja yksi- ja kaksikerroksisia omakotitaloja.

Mittauspisteitä oli kussakin rakenteessa ilmatilan ala-, keski- ja yläosassa, reunoilla ilma-aukkojen vieressä sekä mahdollisimman vähän tuulettuvassa kohdassa. Lisäksi kohteissa on mitattu sisä- ja ulkoilman olosuhteita. Sisäolosuhteita on mitattu Comark Diligence EV N2013 -dataloggereilla, joille valmistajan ilmoittama lämpötilan mittaustarkkuus on $\pm 0,5$ °C toiminta-alueella -20...50 °C (Comark Instruments 2013). Valmistajan ilmoittama tarkkuus suhteelliselle kosteudelle on ± 3 % RH toiminta-alueella 0–97 % RH ja -20...60 °C.

Dataloggerit on hankittu Rakennustekniikan laitokselle aiemman Kosteusvarma terve pientalo –tutkimushankkeen yhteydessä.

Ulkoilman ja rakenteiden olosuhteita mitattiin erikseen hankituilla Rotronic HygroLog HL-NT3 -dataloggereilla, joissa käytettiin HC2-S-antureita. Valmistajan ilmoittama dataloggerien käyttöalue litiumparistoja käytettäessä on näytöttömälle dataloggerille -30...70 °C ja näytölliselle -10...60 °C. Alkaliparistoja käytettäessä käyttöalue olisi kapeampi. Valmistajan ilmoittama anturien käyttöalue on dataloggerin käyttöaluetta laajempi. Laitteiston äly sijaitsee anturissa, jolloin anturin tarkkuus määrää laitteiston tarkkuuden. Valmistajan ilmoittama lämpötilan mittaustarkkuus on $\pm 0,1$ °C lämpötilan ollessa +23 °C ja suhteellisen kosteuden mittaustarkkuus on $\pm 0,8$ % RH lämpötilan ollessa +23 °C. Anturien mittaustarkkuuden muutoksiksi Rotronic ilmoittaa < 1 % RH/vuosi ja $< 0,1$ °C/vuosi. (Rotronic AG 2009–2012a; Rotronic AG 2009–2012b)

Käyttäjä ei pysty itse tekemään Comark Diligence EV N2013 –dataloggerien tehdaskalibrointia, mutta periaatteessa olisi mahdollista määrittää itse korjausfunktio laitteiden mittaamalle lämpötilalle ja suhteelliselle kosteudelle. Laitteiden tarkastuksissa mittauserot ovat kuitenkin suurimmassa osassa laitteista olleet valmistajan ilmoittamien virherajojen mukaisia. Aiemmissä tutkimuksissa laitteiden pitkäaikaispysyvyyden on havaittu heikkenevän ulkoilman olosuhteissa, mutta säilyvän kuitenkin sisäilman olosuhteissa. Näistä syistä käytettävissä olevista dataloggereista valittiin parhaiten keskiarvoa edustavat, joita käytettiin vain kohteiden sisäilman mittauksiin. Jokaisessa kohteessa käytettiin kahta loggeria sisäilman mittauksiin.

Rotronicin antureita ja loggereita testattiin Rakennustekniikan laitoksen säärasituslaitteistossa ennen ostopäätöstä. Ennen asennusta kohteisiin loggerianturien toimintaa testattiin kolmessa eri lämpötilassa (+20, 0 ja -20 °C). Osassa antureita esiintyi datan puuttumista alhaisimmassa lämpötilassa, josta syystä antureita lähetettiin tarkistettavaksi ja vaihdettavaksi maahantuojalle. Kenttämittauksissa uudet anturit ovat kestäneet yksittäisiä ajanhetkiä lukuun ottamatta koviakin (lähes -30 °C) pakkasia.

Kohteiden mallinnusta varten hankittiin lisää säädataa Ilmatieteen laitokselta. Vertailulaskelmissa käytettyjä suureita olivat lämpötilan ja suhteellisen kosteuden lisäksi globaali ja diffuusi säteily vaakapinnalle sekä tuulen suunta, tuulen nopeus ja sade. Osassa kohteista ulkoilmaa mittaava anturi oli sijoitettu räystäään alle rakennuksen eteläpuolelle, jolloin auringonsäteily vaikutti mittaustuloksiin. Tästä syystä vertailulaskelmissa päädyttiin lopulta käyttämään ulkoilman olosuhteina pelkästään Ilmatieteen laitokselta saatua säädataa. Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vertailu mittauskohteen ulkoilmaa mittaavan anturin ja Ilmatieteen laitoksen säädatan välillä näytti hajontaa tunnitteisessa datassa, mutta 24 tunnin lasketut keskiarvot vastasivat toisiaan hyvällä tarkkuudella.

Viisitoista kappaletta kenttämittauksissa käytetyistä Rotronic-loggereista laitettiin mittauksen jälkeen Rakennustekniikan laitoksen kosteushuoneisiin, joissa niiden antamia lukemia

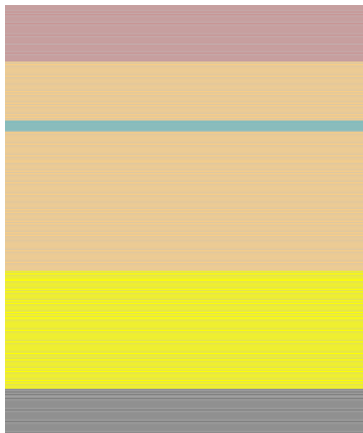
verrattiin referenssianturiin. Tarkistus tehtiin kahdessa eri olosuhteessa, huonelämpötilassa ja 33 % RH sekä 75 % RH suhteellisessa kosteudessa. Koonti anturien tarkastuksesta on esitetty taulukossa 5.5.1. Taulukon tulokset osoittavat, että anturien mittaustarkkuus on pysynyt varsin hyvänä mittaussjakson aikana.

Taulukko 5.5.1 Kenttämittausloggerien jälkitarkastuksen tuloksia. Tarkistettujen anturien mittaustuloksen erotuksen keskiarvo ja keskihajonta kosteushuoneen referenssianturiin nähden.

Suhteellinen kosteus kosteushuoneessa	Lämpötilaero [°C] $\Delta T = T_{\text{loggerianturi}} - T_{\text{kosteushuone}}$		Suhteellisen kosteuden ero [% RH] $\Delta \phi = \phi_{\text{loggerianturi}} - \phi_{\text{kosteushuone}}$	
	35 % RH	75 % RH	35 % RH	75 % RH
Kaikkien anturien erotuksen keskiarvo	0,2	-0,3	1,5	1,1
Kaikkien anturien erotuksen keskihajonta	0,3	0,2	0,8	1,0

5.6.2 Tuulettuvien yläpohjien olosuhteiden vertailut

Seuraavassa kuvassa on esitetty tyypillinen tuulettuvan yläpohjan laskentamalli (ei mittakaavassa).

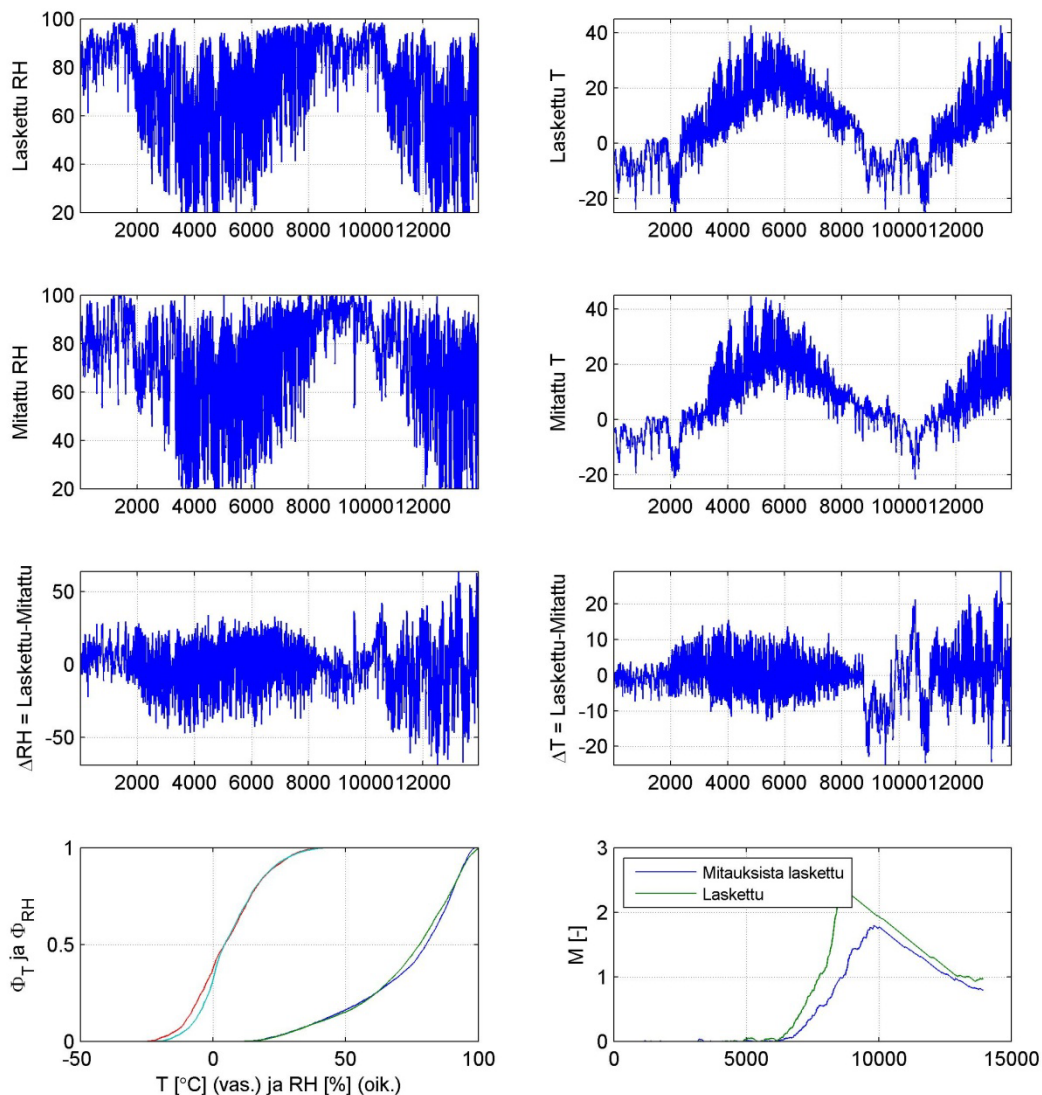


Kuva 5.6.1 Tuulettuvan yläpohjan laskentamalli (ei mittakaavassa). Kerrokset ylhäältä alaspäin ovat: tiilikate, tuuletusväli 20 mm, aluskate, yläpohjan ilmatila, lämmöneriste, höyrynsulku (pelkkänä vastuksena tai materiaalikerroksena) ja kipsilevy.

Rakenteen sisäpinnan höyrynsulku mallinnettiin elementtien välisenä vesihöyrynvastuksena, kun yläpohja oli mineraalivillaeristetty. Puukuitueristetyn yläpohjan tapauksessa höyrynsulku mallinnettiin yhden millimetrin paksuisena kerroksena, jonka vesihöyrynvastus määritettiin vastaamaan haluttua arvoa. Aikaisemmissa materiaalikoikeissa (Vinha et al. 2005b) mineraalivillan vesihöyrynläpäisevyys pysyi samana suhteellisen kosteuden kasvaessa, kun taas puukuitueristeen vesihöyrynläpäisevyys suureni suhteellisen kosteuden kasvaessa. Laskentaohjelmassa mineraalivillassa ei siirry kapillaarisesti vettä, kun taas puukuitueristeessä tapahtunut kosteusvirran kasvu on siirretty kapillaariseksi kosteuden siirtymiseksi. Tällöin mineraalivillaeristetyn lämmöneristeen tapauksessa pelkkä sisäpinnan

vesihöyrynvastus riitti kuvaamaan rakenteen toiminnan ja numeerisen ratkaisun helpottamiseksi ei tarvinnut ottaa huomioon höyrynsulun kosteuskapasiteettia. Puukuitueristeen kanssa höyrynsulku on ollut sekä vesihöyry- että vesitiivis. (Laukkarinen 2012a)

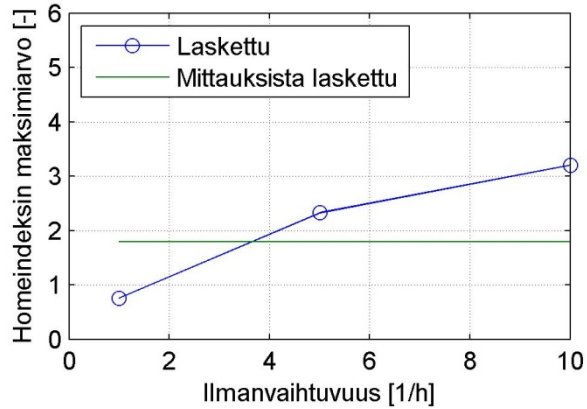
Seuraavassa kuvassa on esitetty mittaus- ja laskentatulosten vertailua Espoossa sijaitsevassa mittauskohteessa. Yläkuivissa on yläpohjan ilmatilan yläosasta mitattu ja laskettu suhteellinen kosteus ja lämpötila. Niiden alla on näiden suureiden erotus. Alimpina kuvaajina ovat lämpötilan ja suhteellisen kosteuden kertymäfunktiot sekä mitatuista ja lasketuista olosuhteista lasketut homeindeksit.



Kuva 5.6.2

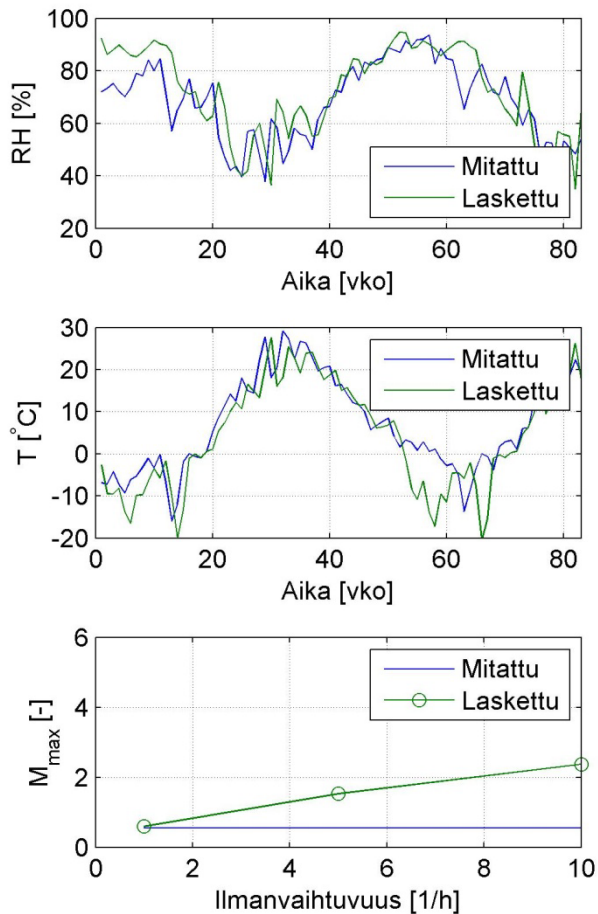
Mittattujen ja laskettujen olosuhteiden vertailua tuulettuvassa yläpohjassa. Mittauskohde sijaitsee Espoossa. Yläpohjan ilmanvaihtuvuutena on käytetty arvoa 5 l/h. Olosuhteet kuvaajissa ovat aikavälillä 22.11.2010 0:00–24.6.2012 23:00. Yläkuivissa on yläpohjan ilmatilan yläosasta mitattu ja laskettu suhteellinen kosteus ja lämpötila. Niiden alla on näiden suureiden erotus. Alimpina kuvaajina ovat lämpötilan ja suhteellisen kosteuden kertymäfunktiot sekä mitatuista ja lasketuista olosuhteista lasketut homeindeksit.

Seuraavassa kuvassa on esitetty saman yläpohjan mitatuista lämpötila- ja kosteusolosuhteista laskettu homeindeksi sekä lasketuista olosuhteista laskettu yläpohjan homeindeksi eri ilmanvaihtuvuuksilla.



Kuva 5.6.3 Tuulettuvan yläpohjan homeindeksin vertailu kenttämittauksien perusteella laskettuun homeindeksiin.

Seuraavassa kuvassa on esitetty lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vertailu toisessa kenttämittauskohteessa. Tulokset on esitetty 24 tunnin keskiarvoina luettavuuden helpottamiseksi.



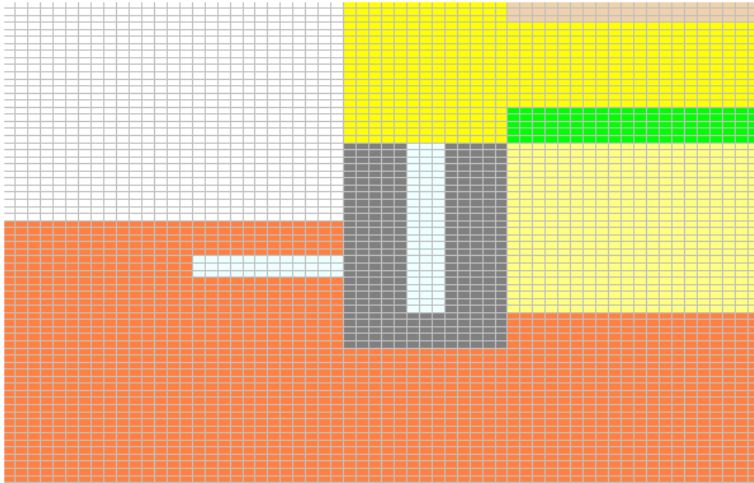
Kuva 5.6.4 Mitattujen ja laskettujen olosuhteiden vertailua tuulettuvassa yläpohjassa. Laskennassa on käytetty yläpohjan ilmanvaihtuvuuksia 1, 5 ja 10 1/h, joista kuvissa on esitetty ilmanvaihtuvuudella 1 1/h saadut tulokset. Tulokset on esitetty olosuhteiden viikkokeskiarvoina.

Kuvista 5.6.3 ja 5.6.4 huomataan, että tietyillä ilmanvaihtuvuuden arvoilla lasketut homeindeksin maksimiarvot vastaavat mitattujen arvojen perusteella laskettuja maksimiarvoja.

Tuulettuvien yläpohjien olosuhteiden tarkempi käsittely, laskentamallien kuvaus sekä vertailulaskelmat on esitetty lähteessä Laukkarinen (2013).

5.6.3 Ryömintätilaisten alapohjien olosuhteiden vertailut

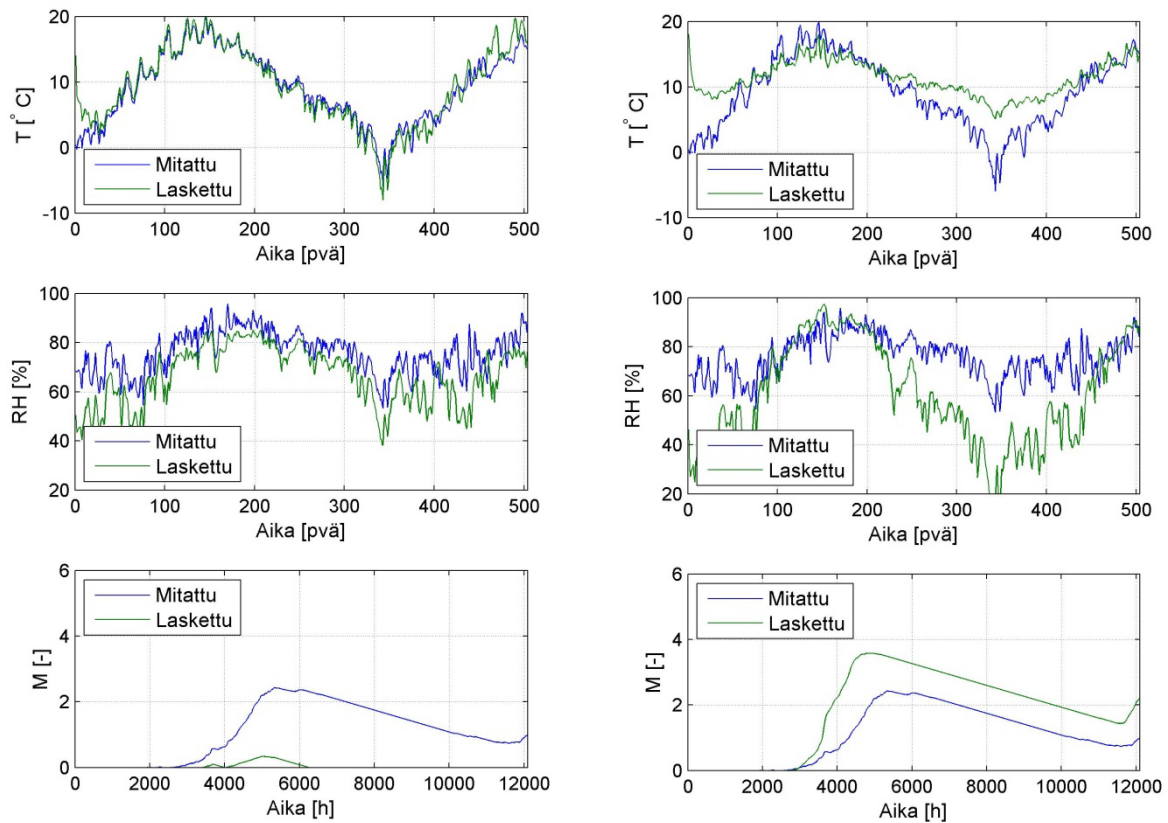
Seuraavassa kuvassa on esitetty tyypillinen ryömintätilaisen alapohjan laskentamalli (ei mittakaavassa). Mitta perustusten ulkopinnoista laskentamallin reunoille on joka suuntaan neljä metriä. Pystyleikkauksissa on käytetty adiabaattireunaehto. Laskentamallin pohjalla oli reunaehtona vakiolämpötila 5 °C ja paineeton vesikontakti (pohjavesi). Laskennan alkuolosuhteet maassa olivat 7 °C tai 10 °C ja 97 % RH.



Kuva 5.6.5 Tyypillinen esimerkki ryömintätilan laskentamallista. Kuva ei ole mittakaavassa.

Kenttämittaushkohteita mallinnettaessa kohdekohtaiset mitat ja materiaalit pyrittiin ottamaan mahdollisimman hyvin huomioon. Kaikkien lähtötietojen tarkkaa määrittämistä ei kuitenkaan katsottu tarpeelliseksi tai ei ollut mahdollista tehdä tämän projektin puitteissa. Näin ollen esimerkiksi lattian lämmöneristeen ja maan lämmönjohtavuus sekä ryömintätilan ilmanvaihtuvuus on ainoastaan arvioitu mahdollisimman hyvin yleisesti käytettyjen ratkaisujen perusteella.

Seuraavassa kuvassa on esitetty mitatut ja lasketut olosuhteet ryömintätalaisessa puurakenteisessa alapohjassa. Kuvissa esitetty mitattu lämpötila ja suhteellinen kosteus on ryömintätilan keskialueelta. Mittaustuloksia on verrattu laskentatuloksiin ryömintätilan reunalta ja keskeltä. Ryömintätilan maanpinnalla on 400 mm kevytsoraeristys. Ilmanvaihtuvuus laskennassa oli 5 1/h. Maan lämmönjohtavuutena käytettiin arvoa 1 W/(mK).

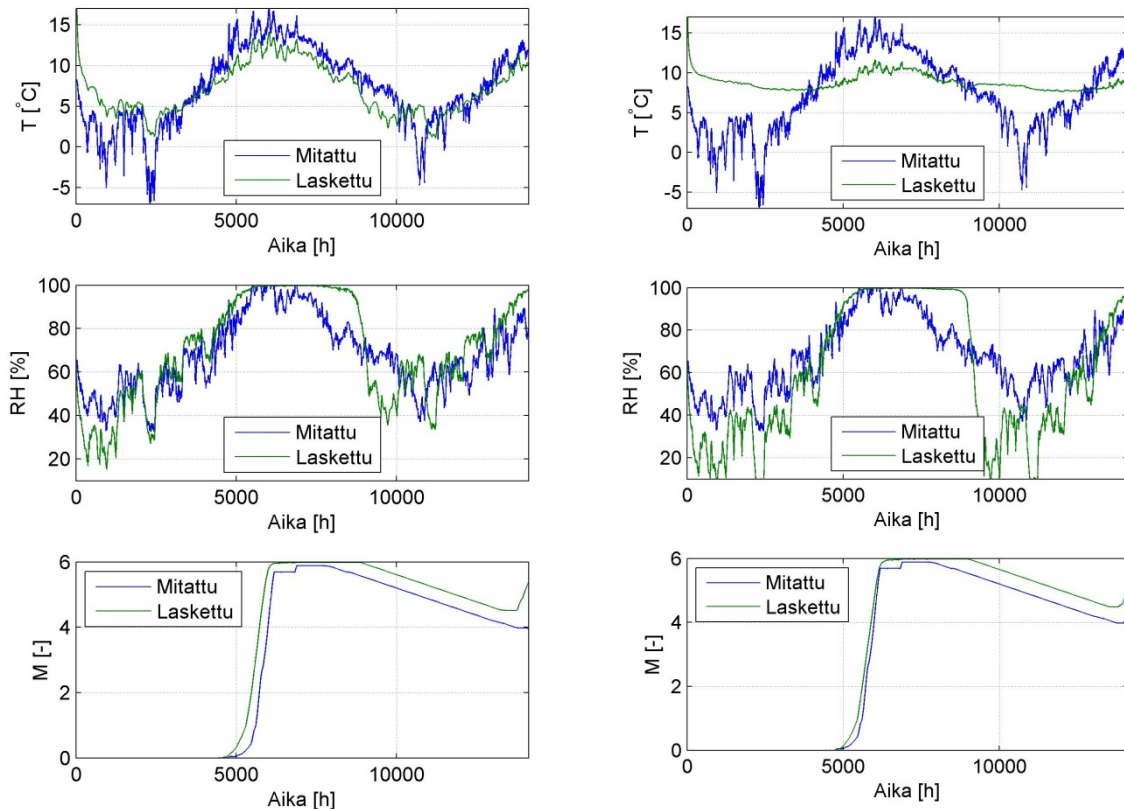


Kuva 5.6.6 *Mitatut ja lasketut olosuhteet ryömintätilaisessa alapohjassa. Vasemmalla ryömintätilan keskialueelta ilmatilan yläosasta mitattujen olosuhteiden vertailu laskentatuloksiin ryömintätilan reunalta ja oikealla vastaavasti vertailu laskentatuloksiin ryömintätilan keskeltä. Lämpötila ja suhteellinen kosteus on esitetty 24 tunnin keskiarvoina. Homeindeksi on laskettu tunnitaisesta datasta VTT-TTY homemallin avulla homeutumisherkkyyoluokassa HHL1.*

Kuvasta 5.6.6 voidaan todeta, että tuulettuvassa ryömintätilassa olosuhteet eivät muutu yhtä nopeasti kuin tuulettuvassa yläpohjassa. Ryömintätilan olosuhteissa 24 tunnin keskiarvot eivät kuvaajissa juuri eroa tunnitaisista arvoista. Laskennassa on kuitenkin syytä käyttää mahdollisimman tarkkaa säädädataa.

Kuvasta nähdään, että ryömintätilan keskeltä mitatut lämpötila- ja RH-olosuhteet korreloivat huomattavasti paremmin ryömintätilan reunan laskentatuloksiin. Toisaalta olosuhteiden perusteella lasketut homeindeksin arvot eroavat tässä tapauksessa toisistaan enemmän kuin ryömintätilan keskiosasta mitatut ja lasketut avot.

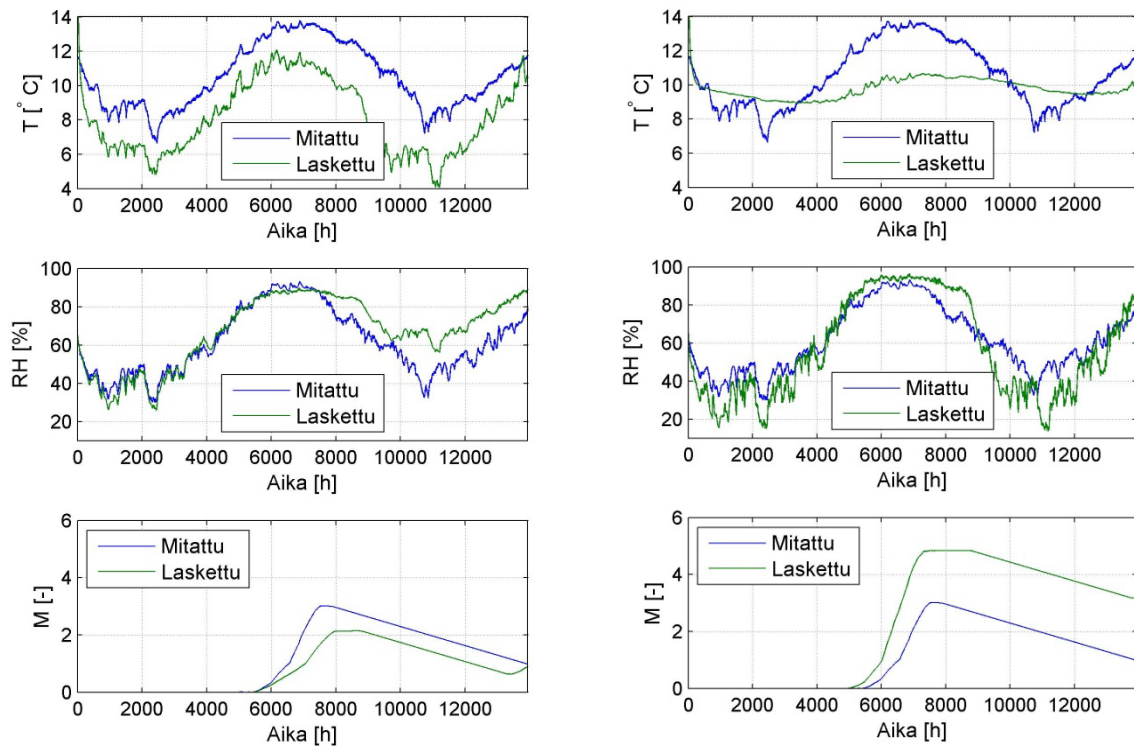
Seuraavassa kuvassa on esitetty mitta- ja laskentatulosten vertailua toisesta puurakenteisesta ryömintätilasta. Ryömintätilan maanpinnalla on muovi ja muovin päällä noin 5–10 cm kerros hiekkaa. Ryömintätilan perusmuurin sisäpuolella ja maanpinnalla olevan muovin alapuolella kiittää yhden metrin kaistaleena 50 mm solumuovieriste. Ilmanvaihtuvuus laskennassa on ollut 5 1/h. Maan lämmönjohtavuutena on käytetty arvoa 2 W/(m·K).



Kuva 5.6.7 *Mitatut ja lasketut olosuhteet ryömintätalaisessa alapohjassa. Vasemmalla ryömintätalain keskialueelta ilmatilan yläosasta mitattujen olosuhteiden vertailu laskentatuloksiin ryömintätalain reunalta ja oikealla vastaavasti vertailu laskentatuloksiin ryömintätalain keskeltä. Homeindeksi on laskettu VTT–TTY homemallin avulla homehtumisherkkyyssluokassa HHL1.*

Kuvasta 5.6.7 voidaan todeta, että tässäkin tapauksessa ryömintätalain keskeltä mitatut lämpötila- ja RH-olosuhteet korreloivat paremmin ryömintätalain reunalta laskettuihin arvoihin. Homeindeksien osalta laskettujen ja mitattujen arvojen välillä ei ole merkittäviä eroja kummassakaan vertailutapauksessa.

Seuraavassa kuvassa on esitetty mitatut ja lasketut olosuhteet kevytbetonirakenteisessa ryömintätalaisessa alapohjassa. Lattiarakenteessa on sisäpuolinen solumuovieristys ja maanpinnalla oleva muovi peittää suurimman osan maanpinnasta. Ilmanvaihtuvuus laskennassa on ollut 1 1/h. Maan lämmönjohtavuutena on käytetty arvoa 2 W/(mK).



Kuva 5.6.8 *Mitatut ja lasketut olosuhteet ryömintätalaisessa alapohjassa. Vasemmalla ryömintätilan keskialueelta ilmatilan yläosasta mitattujen olosuhteiden vertailu laskentatuloksiin ryömintätilan reunalta ja oikealla vastaavasti vertailu laskentatuloksiin ryömintätilan keskeltä. Homeindeksi on laskettu VTT-TTY homemallin avulla homehtumisherkkyyssluokassa HHLI.*

Kuvasta 5.6.8 nähdään, että ryömintätilan keskeltä mitatut lämpötila- ja RH-olosuhteet korreloivat jälleen paremmin ryömintätilan reunalta laskettuihin arvoihin. Tässä tapauksessa myös näistä olosuhteista lasketut homeindeksit olivat lähempänä toisiaan.

Edellä esitettyjen kohteiden lisäksi kahden mittauskohteen mallinnukset poikkesivat edellä esitettyjä enemmän mittaustuloksista. Toisessa kohteessa ryömintätilan suhteellinen kosteus pysyi korkealla tasolla myös talvella (n. 85 % RH) ja nousi vielä lisää kesällä (lähes 100 % RH). Tässä kohteessa maanpinta oli hiekka-/soratyypistä ja kosteustuotto maasta on todennäköisesti ollut todellisuudessa suurempi kuin laskentamallissa.

Toisessa kohteessa mitattu suhteellinen kosteus oli talvella noin 55 % RH ja kesällä 90 % RH, kun se laskentamallissa oli talvella alhaisempi ja kesällä korkeampi. Ryömintätilan lämpötila myös nousi kesällä korkeammalle kuin laskentamallissa. Mittauksista lasketun homeindeksin maksimiarvo M_{\max} oli noin 3 ja lasketuista olosuhteista lasketun homeindeksin maksimiarvo M_{\max} lähes 6. Ryömintätilan lämpötilan jääminen laskennassa mitattua alhaisemmaksi tapahtui useassa kohteessa, mutta maan lämmönjohtavuuden tai ryömintätilan ilmanvaihtuvuuden muuttaminen ei saanut vielä laskentatuloksia vastaamaan mittaustuloksia. Tarkastellussa kohteessa maanpinnalla oli sepeliä ja se oli osittain peitetty muovilla. Muovin ja sepelin huomioon ottaminen laskennassa todennäköisesti parantaisi kosteusolosuhteiden

laskentaa, mutta niillä ei toisaalta ole juuri vaikutusta ryömintätilan lämpötilaan. Ilmavaihdon mallintamisen parantaminen saattaisi parantaa myös mallin toimintaa.

Kolmessa esitetyssä kohteessa laskentatulokset ovat vastanneet mittaustuloksia parhaiten viidestä mitatusta ja mallinnetusta kohteesta. Pääsääntöisesti mitatuissa kohteissa lämpötila ryömintätilan keskellä oli korkeampi kuin laskettu lämpötila. Ryömintätilan mitat, maan ominaisuudet sekä ilmanvaihtuvuus vaikuttavat laskentatuloksiin ja yksittäisten kohteiden mallintamisessa on vielä puutteita. Voi myös olla, että laskentaohjelmaan määritetyt ilman ominaisuudet eivät kuvaa ilman virtausta ja sekoittumista ryömintätilassa riittävän hyvin. Vertailulaskelmien perusteella on päädytty käyttämään ryömintätilan reuna-alueelta laskettuja olosuhteita jatkolaskelmissa, koska ne ovat vastanneet paremmin kenttämittauksia. Ryömintätilan olosuhteista lasketut homeindeksit on laskettu homehtumisherkkyyksiluokalle HHL1, jotta eri tapausten väliset erot tulisivat parhaiten näkyviin. Varsinaisissa ryömintätilan tarkasteluissa on käytetty oikeita homehtumisherkkyyksiluokkia.

Edellä olevat esimerkit osoittavat, että kokonaisuutena laskentatulosten tarkkuudessa olisi vielä parannettavaa. Laskennan tuloksia arvioitaessa mallit kuitenkin käyttäytyivät loogisesti ja sisälsivät lämpötilan ja suhteellisen kosteuden yleisen trendin. Näistä syistä laskentamalleja katsottiin voitavan käyttää myös ryömintätilan olosuhteiden tarkasteluun.

Eri kohteiden mittaustuloksista määritettiin ryömintätilan keskiosan kosteuslisät ulkoilmaan nähden. Otoksen pienuudesta johtuen tuloksista ei voi tehdä tilastollisia päätelmiä, mutta ne on annettu tässä kuitenkin suuntaa-antaviksi tiedoiksi. Kosteuslisän arvot laskettiin tunnittaisesta datasta jään yli koko mittausjaksolle. Mittausjakson pituus on kohteesta riippuen ollut noin 500–580 päivää. Loggeriasennukset tehtiin talvella 2010 ja laitteet kerättiin kohteista kesällä 2012. Ryömintätilan ilman kosteuslisän keskiarvot ulkoilmaan nähden eri kohteissa olivat 3,34; 0,73; 0,4; 0,98 ja 0,69 g/m³. Kosteuslisän keskihajonnat olivat vastaavasti 1,94; 0,95; 1,07; 1,02; 1,57 g/m³. Laskettuja aikasarjoja käytettiin aineistona kosteuslisän normaalisuuden testaamiselle. Testit tehtiin Matlab-ohjelmalla. Kaksisuuntaisen Lilliefors-testin mukaan data ei ole normaalisesti jakautunut (merkitsevyytaso 5 %, $P < 0,001$). Myöskään Kolmogorov-Smirnov-testin mukaan kosteuslisän arvot eivät ole normaalisesti jakautuneita (merkitsevyytaso 5 %, $P \sim 0$). Datan kuvaajia (normal probability plot) tarkastelemalla arvot eroavat normaalijakaumasta erityisesti jakauman hännissä. Tuloksen uskottavuutta lisää se, että ilman kyllästyskosteuspitoisuus riippuu lämpötilasta epälineaarisesti.

5.6.4 Tulosten arviointia

Laskennassa ulkoilman olosuhteina on käytetty lähimmältä Ilmatieteen laitoksen mittausasemalta saatua ilmastodataa. Mittausaseman sijaintipoikkeama aiheutti ilman lämpötilan ja vesihöyrypitoisuuden tuntiarvoissa poikkeamaa, mutta vuorokausitasolla sekä kohteesta että sääasemalta mitatut arvot vastasivat hyvin toisiaan. Muiden ilmastosuureiden mittauspaikan sijaintipoikkeaman vaikutusta ei ole selvitetty.

Rakennuksien pinnat eivät saa auringonsäteilyä symmetrisesti. Tuulettuvien yläpohjien tapauksessa yläpohja on käsitelty kaikissa kohteissa tasakattona, vaikka suurin osa kohteista oli harjakattoisia rakennuksia. Tällä pyrittiin ottamaan huomioon auringonsäteilyn epätasainen jakautuminen katon lappeiden välillä. Auringon diffuusin säteilyn osalta tapa tuottaa oikean säteilytehon, mutta suoran säteilyn osalta menetelmä ei ole tarkka.

Rakenteiden ilmanvaihtuvuus on ollut laskennassa tapauksittain vakio läpi vuoden. Todellisuudessa painovoimainen ilmanvaihto riippuu lämpötilaerojen ja tuulen synnyttämistä paine-eroista. Lämpötilaero ja tuuli vaihtelevat jatkuvasti, jolloin samana pysyvällä ilmanvaihtuvuudella saadaan kuvattua ainoastaan koko vuoden tasolla toteutuvaa keskimääräistä tilannetta. Rakenteiden kosteustekninen toiminta on kuitenkin epälineaarista, joten ilmanvaihtuvuutta kuvaavaa mallia parantamalla saataisiin koko laskentamallin tarkkuutta kehitettyä.

Yläpohjan laskentamallin kosteuskapasiteetti on pienempi kuin todellisessa kohteessa, koska laskentamallissa ei ole mukana yläpohjan puuosia. Tämä selittäisi suhteellisen kosteuden mittaus- ja laskentatulosten välistä vaihtelua. Toisaalta kuitenkin lämpötilan ja suhteellisen kosteuden kertymäfunktiot ovat kuvaajien perusteella lähellä toisiaan ja myös lasketut homeindeksit vastaavat kohtalaisesti toisiaan. Kantavien rakenteiden pintojen olosuhteet poikkeavat epälineaarisesti tuulettuvan yläpohjan ilmatilan olosuhteista, koska kosteus siirtyy materiaaleissa epälineaarisesti. Syklisesti vaihtelevien olosuhteiden tuottaman keskimääräisen suhteellisen kosteuden materiaalien pinnoilla pystyy laskemaan esimerkiksi Kirchhoffin potentiaalin avulla (Arfvidsson 1998).

Mittaus- ja laskentatulosten välille voi syntyä vaihe-eroa kenttämittausloggerien kellon edistäessä/jätättäessä tai laskettujen arvojen muuttuessa nopeammin tai hitaammin kuin mitattujen arvojen. Jos sekä mittaus- että laskentatulokset olisi muodoltaan sinikäyrä, niin ajanhetkellä nolla vaihe-erosta johtuvan virheen voisi kirjoittaa muodossa:

$$\Delta x = A \cdot \sin\left(\frac{2\pi\Delta t}{t_{\text{per}}}\right) \quad (5.6.1)$$

missä

- A on suureen amplitudi
- Δt on mittaus- ja laskentafunktioiden välisen vaihe-eron pituus [s]
- t_{per} on jakson pituus [s].

Yhden tunnin vaihe-erolla funktioiden arvojen erotus on noin $\Delta x = 26 \% \cdot A$. Vaihe-erosta syntyvä virhe vaihtelee sinimuotoisesti. Funktioiden keskiarvoihin vaihe-ero ei vaikuta. Kenttämittausloggerien kellon edistämistä tai jätättämistä ei kirjattu dataa kerätessä talteen, mutta ero oli enimmillään noin 15–30 minuuttia.

Ryömintätilan lopullisiin laskentamalleihin päädyttiin useiden välivaiheiden kautta. Lähtökohtana oli käyttää yhtäaikaisen lämmön- ja kosteudensiirron sisältävää laskentamallia, jossa maan vaikutus olisi otettu huomioon mahdollisimman hyvin. Suuren maamassan ottaminen malliin nosti kuitenkin vaadittavaa laskenta-aikaa, josta syystä maan syvyyttä jouduttiin rajoittamaan. Maan syvyyden olisi suositeltavaa olla vähintään noin kaksi kertaa lämmönjohtumisen jaksollisen tunkeutumissyvyyden verran (Hagentoft 2001 s. 27). Tämä vastaisi noin seitsemää metriä, jolloin vuosilämpötilan kiinnittäminen laskentamallin reunalle tuottaisi analyttiseen ratkaisuun verrattuna alle yhden lämpötila-asteen virheen. Muita tapoja riittävän maamassan arvioimiseksi ovat ainakin standardin SFS-EN ISO 10211 (2008) ohjeet sekä maamallin kasvattaminen, kunnes laskentatulokset eivät muutu edelliseen tulokseen verrattuna.

Laskenta-ajan huomattiin riippuvan laskentapisteidien lukumäärän lisäksi myös tarkasteltavasta tapauksesta. Korkean kosteuden olosuhteet, materiaalien pieni kosteuskapasiteetti ja jyrkät muutokset vierekkäisten materiaalien ominaisuuksissa hankaloittavat numeerisen ratkaisun löytymistä. Esimerkiksi puurakenteisen lattian alapohjapalkkien ottaminen mukaan laskentaan kasvatti huomattavasti laskenta-aikaa (noin yksi vuorokausi → yksi viikko).

Tulosten perusteella on tärkeää pitää yksittäiset rakenneosat mukana mallissa, jos halutaan tarkastella niiden lämpö- ja kosteusteknisiä olosuhteita. Esimerkiksi puurangan kohta eroaa olennaisesti mineraalivillan kohdasta ja tästä syystä mallissa pitää olla kyseiset puurangat, jos niiden toimintaa halutaan arvioida.

Homeindeksin laskennan havaittiin olevan herkkä muutoksille suhteellisessa kosteudessa ja lämpötilassa. Koska suhteellinen kosteus riippuu ilman vesihöyrypitoisuuden ohella olennaisesti lämpötilasta, tulisi rakenteen lämpötilakenttä saada laskettua mahdollisimman hyvin.

6 Vaipparakenteiden kosteusteknisen toiminnan tarkastelut

6.1 Betonirakenteiset ulkoseinät

6.1.1 Betonirakenteiden vaurioituminen muuttuvassa ilmastossa

Betonirakennuksissa julkisivut ja parvekkeet ovat alttiina ympäristön aiheuttamalle säärasitukselle ja tätä kautta rasiutusten aiheuttamille erilaisille vaurioitumisilmiöille. Betonielementtirakenteisissa rakennuksissa näitä rakenneosia ovat tyypillisesti sandwich-seinäelementtien betoniset ulkokuoret sekä parvekkeiden kaide-, laatta- ja pieliementit. Nämä elementtityypit ja niiden valmistustapa ovat säilyneet verrattain samanlaisina jo useamman vuosikymmenen ajan.

Tämän tarkastelun aineisto koostuu betonielementtirakenteisten kerrostalojen kuntotutkimusaineistosta (Lahdensivu et al. 2010). Tarkasteluihin valittiin kohteet, jotka ovat valmistuneet vuonna 1990 tai sen jälkeen ja jotka ovat mahdollisimman paljon nykyisten rakenteiden kaltaisia. Näitä kohteita on tietokannassa 47 koostuen yhteensä 72 rakennuksesta.

Tarkasteluja varten oli käytettävissä kattava 947 rakennuksen kuntotutkimuksen yhteydessä tuotetuista tiedoista koostuva tietokanta, joka on kerätty Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksen tutkijoiden toimesta. Yhteensä tietokannassa on tallennettuna säilyvyyttä kuvaavia mittaustuloksia julkisivuista 280 000 ja parvekkeista 155 000. Tietokannassa olevat rakennukset on rakennettu aikavälillä 1961–1996. Tietokanta sisältää mittaustuloksia mm. betonin huokosrakenteesta, betonin vetolujuudesta, kloridipitoisuudesta, karbonatisoitumissyvyyksistä ja -kertoimista sekä raudoitteiden peitepaksuuksista. Lisäksi tietokanta sisältää silmämääräisesti tehtyjä havaintoja sekä ohuthieanalyysien tuloksia.

Betonin karbonatisoitumisnopeus

Tarkastelut tehtiin kuntotutkimustietokantaan tallennettujen julkisivujen ja parvekkeiden karbonatisoitumistietoihin perustuen. Karbonatisoitumisen etenemistä kuvataan yleisesti Fickin ensimmäisen lain mukaisella kaavalla (Tuutti 1982; Bakker 1988):

$$x = k\sqrt{t} \quad (6.1.1)$$

missä

- x on karbonatisoitumissyvyys [mm]
- k on karbonatisoitumiskerroin [mm/a^{1/2}]
- t on rakennuksen ikä vuosina [a].

Perusoletuksena em. yhtälössä on, että betoni on homogeeninen materiaali. Käytännön betonirakenteissa betoni ei ole ideaalisen homogeeninen materiaali vaan sen ominaisuuksissa

esiintyy vaihtelua mm. tiivistyksestä ja jälkihoidosta riippuen. Betonin karbonatisoitumiskertoimessa esiintyy siten merkittävää vaihtelua samankin elementtityypin sisällä. Keskimääräiset karbonatisoitumiskertoimet vaihtelevat julkisivuissa tyypillisesti välillä 1,0–2,2 ja parvekkeissa 2,5–3,0. Mitä alhaisempi kerroin on, sitä hitaammin karbonatisoituminen etenee.

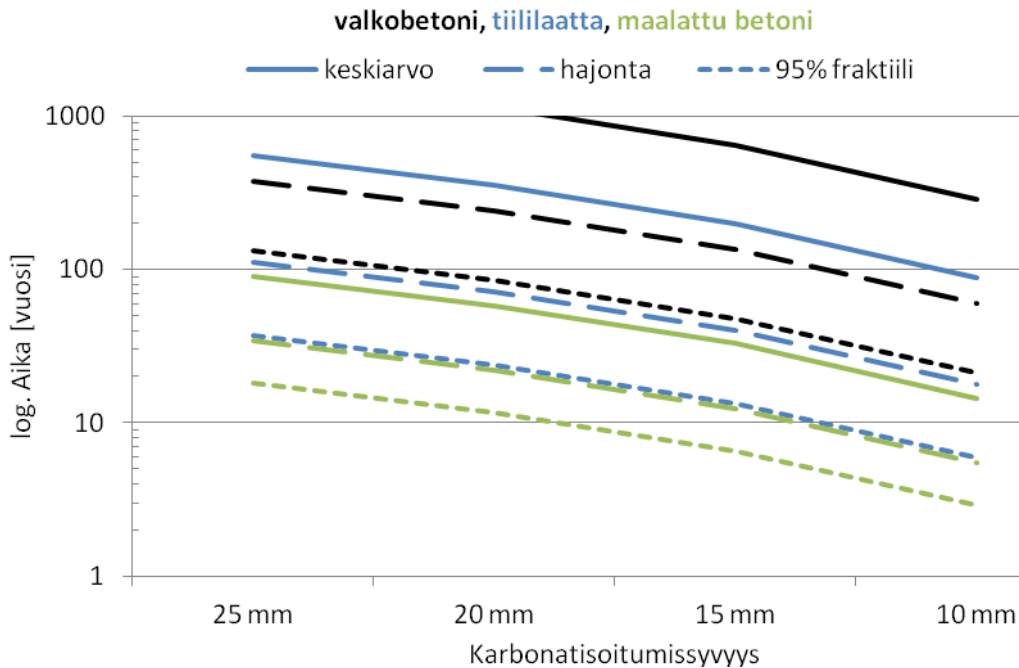
Neliöjuurimallin avulla selvitettiin käänteisesti, kuinka kauan karbonatisoituminen tietyille syvyyksille vie aikaa tarkastelluissa rakenteissa. Tarkasteltavat syvyydet olivat 10, 15, 20 ja 25 mm. 25 mm on tyypillinen raudoituksen peitepaksuuden suunnittelu-arvo. Käytännössä on kuitenkin havaittu runsaastikin tämän arvon alittavia peitepaksuuksia. Rakennetyyppikohtaisesti karbonatisoitumiskertoimien aineistosta laadittiin jakaumaa kuvaavat keskiarvo, keskihajonta sekä 95 % fraktiili.

Karbonatisoitumisaikatarkastelujen tulokset on esitetty taulukossa 6.1.1 ja kuvissa 6.1.1–6.1.4. Taulukossa 6.1.1 on esitetty tarkasteluissa käytetyt karbonatisoitumiskertoimet. Taulukossa ”ka. + keskihajonta” tarkoittaa yhden keskihajonnan verran keskiarvosta haitalliseen suuntaan (nopeampaan) poikkeavaa karbonatisoitumisnopeutta.

Taulukko 6.1.1 Tarkasteluissa käytetyt eri elementtityyppien karbonatisoitumiskertoimet.

	keskiarvo	ka. + keskihajonta	95 % fraktiili
Julkisivut			
valkobetoni	0,59	1,29	2,17
tiililaatta	1,06	2,37	4,11
maalattu betoni	2,62	4,26	5,88
Parveke-elementit			
kaiteen ulkopinta	1,09	2,21	3,95
kaiteen sisäpinta	1,48	2,49	3,49
laatan yläpinta	1,15	2,05	2,82
laatan alapinta	3,21	4,63	6,02
pielen ulkopinta	1,50	2,52	3,47
pielen sisäpinta	1,63	2,87	4,14

Kuvissa 6.1.1–6.1.4 on esitetty betonin karbonatisoitumisaikoja eri julkisivupintatyypeille ja parveke-elementeille karbonatisoitumiskertoimen ja terästen peitepaksuuden vaihdellessa.



Kuva 6.1.1 Karbonatisoitumiseen tietylle syvyydelle kuluva aika vuosina eri julkisivutyypeissä (pystyakseli on logaritminen).

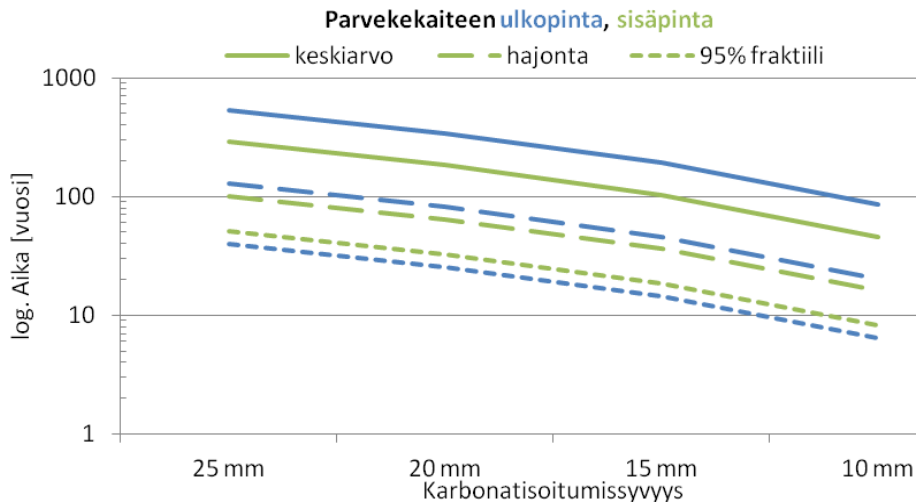
Kuvasta 6.1.1 nähdään, että maalatuissa betonijulkisivuissa betonin karbonatisoituminen etenee huomattavan nopeasti. Karbonatisoitumisrintama saavuttaa 5 % raudoitteista jotka ovat 25 mm syvyydellä jo 18 vuodessa. Sen sijaan tiililaatta tiivistää betonin pintaa merkittävästi ja siten hidastaa karbonatisoitumisen etenemistä. 95 % 25 mm syvyydellä olevista raudoitteista on alkalisessa betonissa vielä 37 vuoden käytön jälkeen. Valkobetonissa karbonatisoitumisen on todettu olevan kaikkein hitainta, joten 95 % rakenteista saavuttaa helposti 100 vuoden käyttöiän.

Kuvasta 6.1.1 voidaan helposti todeta myös riittävän peitepaksuuden merkitys rakenteen käyttöikänsä. Jo 5 mm peitepaksuuden pienennys pienentää karbonatisoitumisaikaa noin 10 vuotta.

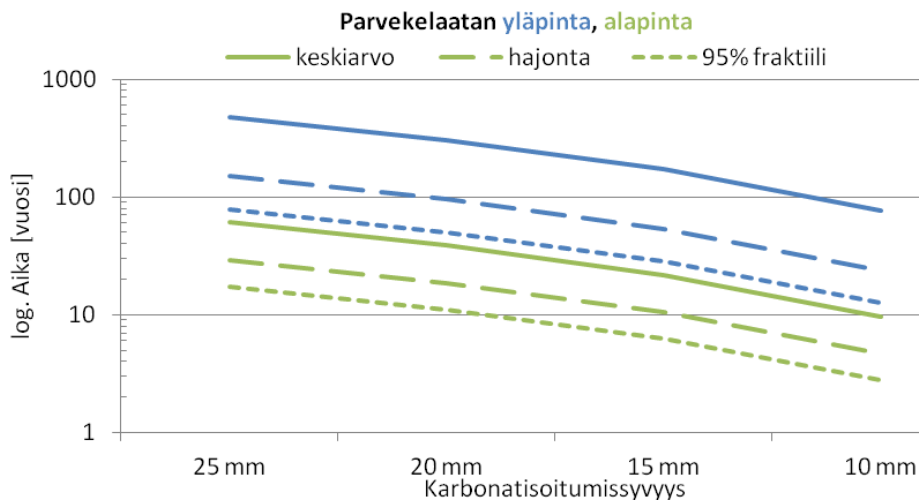
Parvekerakenteissa eniten raudoitusta on kaiteissa sekä laattojen alapinnoissa, joten ne ovat siten kriittisimmät rakenteen käyttöikää rajoittavat alueet (kuvat 6.1.2–6.1.4).

Betoninormien (2012) käyttöikälaskennan mukaan betonirakenteen käyttöikä päättyy silloin, kun karbonatisoitumisrintama saavuttaa betoniteräksessä jossakin kohdassa.

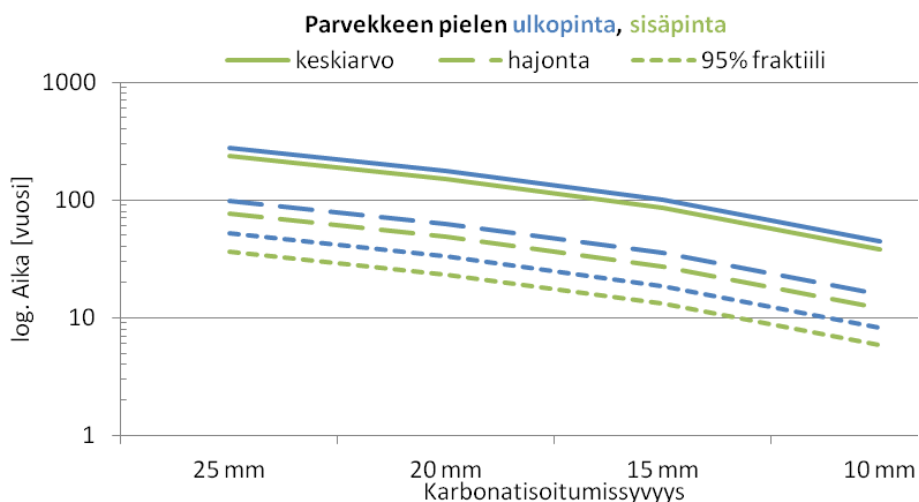
Betonin karbonatisoituminen on nopeinta parvekelaattojen alapinnassa, missä karbonatisoituminen saavuttaa 25 mm syvyydellä olevista raudoitteista 5 % 18 vuodessa ja 20 mm syvyydellä olevat raudoitteet jo 10 vuoden aikana. Parvekelaattojen alapinnan karbonatisoituminen on siten kriittisin tekijä koko parvekerakenteen käyttöiän suhteen, mikäli kriteerinä pidetään betoninormien mukaista rakenteen käyttöikä.



Kuva 6.1.2 Karbonatisoitumiseen tietylle syvyydelle kuluva aika vuosina parvekekaiteissa (pystyakseli on logaritminen).



Kuva 6.1.3 Karbonatisoitumiseen tietylle syvyydelle kuluva aika vuosina parvekelaatoissa (pystyakseli on logaritminen).



Kuva 6.1.4 Karbonatisoitumiseen tietylle syvyydelle kuluva aika vuosina parvekkeen pielissä (pystyakseli on logaritminen).

Aktiivinen raudoitteiden korroosio

Kun raudoitusta ympäröivän betonipeitteen suojaava vaikutus on heikentynyt karbonatisoitumisen seurauksena, raudoituksen ruostuminen voi alkaa. Korroosion etenemiseen tässä vaiheessa vaikuttavat betonin kosteus ja lämpötila. Betonijulkisivu kastuu viistosateen vaikutuksesta, jonka määrä tulee tuulisuuden ja etenkin vuosittaisten sademäärien kasvaessa lisääntymään. Tarkastelussa laskettiin 30 vuoden aikajaksolla korroosiosta aiheutuva teräksen syöpymä ja jaettiin keskimääräiseksi syöpymäksi vuodessa. Tulos muutettiin korroosioajaksi asettamalla syöpymälle kriittinen raja ja laskemalla keskimääräisen syöpymisnopeuden avulla rajan saavuttamiseen kuluva aika vuosina.

Aktiivisen korroosion tarkasteluissa käytettiin hyväksi tutkimustietoa, jonka mukaan vuosittaisen sademäärän ylittäessä 480 mm suojaamattomassa betonissa olevien raudoitteiden korroosio on nopeaa ja sademäärän alittaessa 425 mm korroosionopeus on häviävän pieni (Mattila 2003). Korroosionopeuden ja syöpymän vastaavuus perustuu Andraden tutkimusryhmän tekemään tutkimustyöhön. Nopea korroosio vastaa 10 μm syöpymää vuodessa ja hidas 1 μm vuodessa. Betoniraudoitteiden korroosiolle kriittinen raja on asetettu 50 μm syöpymään (Alonso et al. 1988).

Vuosittaiset sademäärät perustuvat Ilmatieteen laitoksen säädätaan (ks. kuva 4.6.1). Näitä vuosittaisia sadehavaintoja muokattiin vastaamaan tulevaa ilmastoja vuosina 2030, 2050 ja 2100 Ilmatieteen laitoksen REFI-B tutkimushankkeen vuosittaisten sademäärien muuttumisesta tuottamien tuloksien perusteella (ks. taulukko 4.6.1).

Taulukossa 6.1.2 on esitetty syöpymisnopeus keskimäärin vuodessa eri havaintoasemilla sekä taulukossa 6.1.3 aktiivisesta korroosiosta aiheutuvan raudoitteiden syöpymän aika vuosina kriittiseen rajaan asti.

Taulukko 6.1.2 Korroosionopeus keskimäärin vuodessa [$\mu\text{m}/\text{a}$].

	Vantaa	Jokioinen	Jyväskylä	Sodankylä
Nykyilmasto	8,8	8,2	6,1	1,3
2030	9,1	8,8	6,4	1,3
2050	9,4	9,1	6,7	1,3
2100	9,4	9,7	8,2	2,5

Taulukko 6.1.3 Korroosioaika kriittiseen rajaan 50 μm vuosina [a].

	Vantaa	Jokioinen	Jyväskylä	Sodankylä
Nykyilmasto	5,7	6,1	8,2	37,5
2030	5,5	5,7	7,8	37,5
2050	5,3	5,5	7,4	37,5
2100	5,3	5,1	6,1	19,7

Kuten taulukosta 6.1.3 voidaan havaita, karbonatisoitumisen saavutettua raudoitteet, korroosio etenee Etelä-Suomessa varsin nopeasti niin pitkälle, että rakenteisiin syntyy

näkyviä korroosioaurioita. Pohjois-Suomessa aktiivinen korroosio on merkittävästi hitaampaa myös tulevaisuuden ilmastossa huomattavasti vähäisempien vesi- ja räntäsateiden johdosta.

Sellaisten betonirakenteiden, jotka eivät saa viistosaderasitusta, aktiivinen korroosio on huomattavan hidasta. Tästä syystä parvekelaattojen alapinnan nopeasta karbonatisoitumisesta huolimatta niissä esiintyy korroosiota huomattavan harvoin, mikäli laattojen alapintaan ei kohdistu kosteusrasitusta esim. huonosti toimivan parvekkeen vedenpoiston seurauksena. Näin ollen parvekkeen käyttöiän kriittisimmiksi rakenneosiksi muodostuvat viistosaderasitetut kaiteen ulkopinta sekä pielielementin etureuna. Kaiteiden ulkopinnassa karbonatisoituminen saavuttaa 5 % 25 mm syvyydellä olevista raudoitteista 40 vuodessa ja pielissä 52 vuodessa. 20 mm peitepaksuudella vastaavat ajat ovat 26 vuotta ja 33 vuotta.

Yhteenveto raudoitteiden korroosiosta

Raudoitteiden näkyviin korroosioaurioihin kuuluva aika on karbonatisoitumiseen kuluva aika (initiation period) laskettuna yhteen aktiivisen korroosion (propagation period) ajalla. Käytännössä ehjässä betonissa olevien raudoitteiden korroosio ei ala välittömästi kun karbonatisoitumisrintama on saavuttanut teräkset, vaan syvemmältä betonista tuleva huokosvesi on vielä alkalista ja näin huokosveden alkalisuus korjaa terästen rikkoutunutta passiivikalvoa vielä muutamia vuosia.

Korroosion käynnistymiseen vaaditaan riittävän korkea betonin kosteus sekä hapen läsnäoloa. Betonin suhteellisen kosteuden ollessa alle 85 % raudoitteiden korroosion on niin hidasta, ettei sillä ole mitään merkitystä (Tuutti 1982, Andrade 2002). Korroosiovirta on niin alhainen, että raudoitteiden syöpyminennopeus on tuolloin $< 1 \mu\text{m/a}$, mikä vastaa yli 50 vuoden korroosioaikaa näkyvien korroosioaurioiden aikaansaamiseksi.

Julkisivuelementeissä käytettävät pienet teräkset ($\varnothing 4 \text{ mm}$) eivät aiheuta niin suurta painetta, että betonipinta voisi rikkoutua yli 20 mm syvyydeltä. Käytännössä siis vain julkisivuelementtien pieliteräkset ($\varnothing 8 \text{ mm}$) sekä parvekkeissa käytettävät teräkset voivat aiheuttaa näkyviä korroosioaurioita myös 25 mm syvyydeltä.

Raudoitteiden korroosio tapahtuu huomattavasti nopeammin, mikäli raudoitteiden peitepaksuudet ovat työvirheiden seurauksena jääneet liian lähelle pintaa. Jo 15 mm syvyydellä olevissa raudoitteissa karbonatisoitumisen seurauksena tapahtuva korroosio on mahdollinen noin 20 vuoden käyttöiän jälkeen.

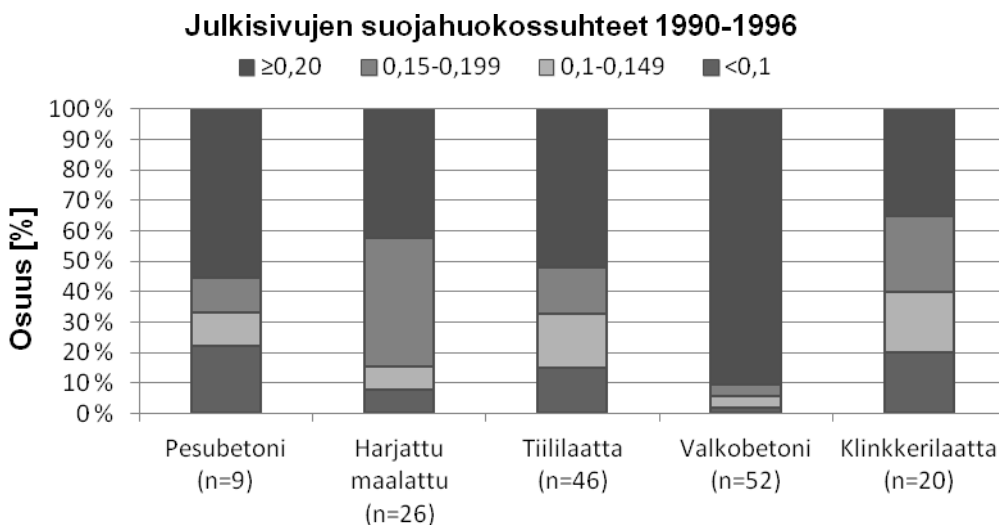
Ilmastomuutoksen aiheuttama sateisuuden kasvu lisää vain jonkin verran raudoitteiden aktiivisen korroosion nopeutta Etelä- ja Keski-Suomessa. Näillä alueilla sateisuus on jo nykyilmastossa niin korkealla tasolla, että aktiivinen korroosioaika on 6–8 vuotta, mikä nopeutuu vuoteen 2100 mennessä 5–6 vuoteen. Merkittävin muutos tapahtuu Sodankylän ilmastoalueella, missä aktiivinen korroosioaika laskee 37,5 vuodesta 19,7 vuoteen.

Betonin pakkasrapautuminen

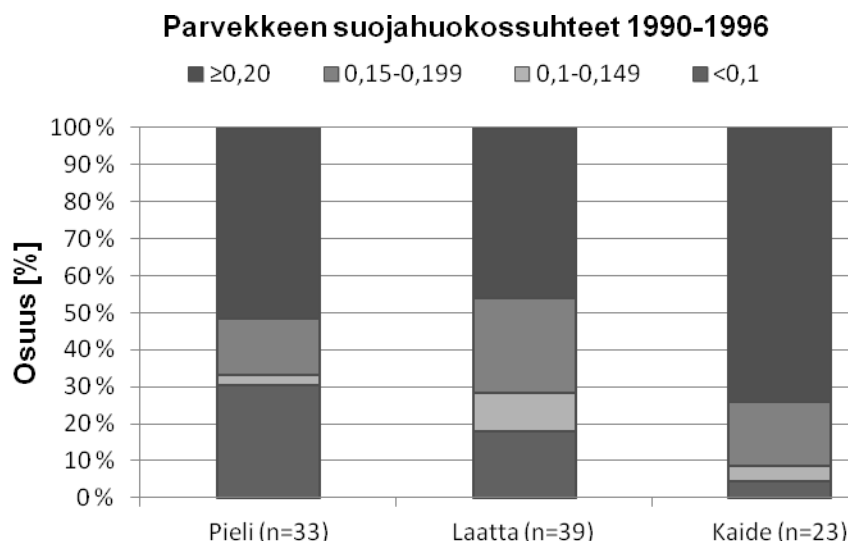
Betonin pakkasrapautumiseen vaikuttavat ensisijaisesti valmistusvaiheessa betonin lisähuokostuksen onnistuminen sekä rakenteen käytön aikana vallitseva räsitusaste. Julkisivuissa ja parvekkeissa käytetyn betonin lisähuokostuksen onnistumista tarkasteltiin BeKo-tietokannan v. 1990 valmistuneiden ja sitä uudempien kohteiden näytetiedoista. Ohjeistus betonin lisähuokostamisesta on annettu vuonna 1976 ja betonin lujuustasoja on nostettu nykytasolle vuoden 1989 säilyvyysohjeissa.

BeKo-tietokannassa betonin lisähuokostuksesta kertova tieto on ilmoitettu betonin suojahuokossuhteena, mikä oli käytäntö vuoteen 2004 saakka. Suojahuokossuhteen tuli olla vähintään 0,20, eli 20 % betonin kokonaishuokoisuudesta tuli olla kapillaarisesti täyttymättömiä. Suojahuokossuhde 0,20 vastaa nykyvaatimuksen huokosjakoa 0,25 mm, millä saavutetaan räsitusluokassa XF 1 100 vuoden käyttöikä.

Kuvissa 6.1.6 ja 6.1.7 on esitetty julkisivujen ja parvekkeiden toteutuneet suojahuokosjakaumat. Kuten kuvaajista voidaan todeta, betonin lisähuokostus on onnistunut varsin vaihtelevasti. Pakkasekestävyysvaatimus täyttyy vain noin 50 % elementeistä. Suojahuokossuhteen ollessa $< 0,1$ betoni ei ole pakkasekestävää kosteusräsituksessa eli tavanomaisissa suomalaisissa ulko-olosuhteissa.



Kuva 6.1.6 Betonijulkisivujen suojahuokossuhteet eri julkisivupintatyypeittäin BeKo-tietokannan mukaan.



Kuva 6.1.7 Eri parveke-elementtien suojahuokossuhteet BeKo-tietokannan mukaan.

Betonin pakkasrapautumisen edellytyksenä on, että huokosverkosto on täyttynyt vedellä yli kriittisen pisteen (Fagerlund 1977) ja että jäätyminen tapahtuu riittävän alhaiseen lämpötilaan (Litvan 1972). Kuivan betonin jäätyminen ei siis aiheuta pakkasrapautumista.

Lahdensivu (2012) on tarkastellut betonirakenteiden jäätymissulamissyklejä seuraavilla kriteerillä:

- vesi- tai räntäsade enintään 3 vrk ennen jäätymistä
- jäätymissulamissyklien määrä lämpötilan laskiessa alle -5 °C
- pakkasrapautumisen tarkastelu ohuthienäytteistä (n = 245 kpl)
- näytteet pesubetonijulkisivuista (ei sadeveden kapillaarista imeytymistä haittaavaa pintakäsittelyä).

Käytössä olevista rakenteista irrotetuissa betoninäytteissä ei pakkasenkestävässä betonissa (suojahuokossuhde $\geq 0,20$) ole ohuthietutkimuksessa havaittu edes alkavaa pakkasrapautumaa yli 500 todellisissa luonnonolosuhteissa tapahtuvan jäätymissulamissyklin jälkeen. Ohuthieessä havaittavaa alkavaa pakkasrapautumaa Jyväskylän ilmastossa havaittiin keskimäärin 388 syklin jälkeen ja Vantaan ilmastossa 307 syklin jälkeen. Sisämaassa jäätymissulamissyklien määrä on Etelä-Suomea suurempi, mutta vähäisemmän sademäärän johdosta samaan vaurioasteeseen tarvittiin enemmän jäätymissulamissyklejä. Yleisen pakkasrapautumisen esiintymiseen tarvittiin vain noin 20 jäätymissulamissykliä enemmän, joten pakkasrapautuminen etenee alkuun päästyään varsin nopeasti. (Lahdensivu 2012).

Taulukkoon 6.1.4 on koottu tulevaisuuden säätietoihin (ks. taulukko 4.6.2) ja em. tutkimukseen perustuva arvio puutteellisesti pakkasrasitusta kestävästä betonin ohuthieessä havaittavan alkavan pakkasrapautuman esiintymiseen tarvittavasta ajasta.

Taulukko 6.1.4 Ohuthieessä havaittavaa alkavaa pakkasrapautumaa, kun vesi- tai räntäsade esiintyy enintään 2 vrk ennen jääymistä.

	Vantaa [vuotta valmistumisesta]		Jyväskylä [vuotta valmistumisesta]	
	alle -5 °C	alle -10 °C	alle -5 °C	alle -10 °C
2000	26	35	37	45
2030	40	61	40	58
2050	50	78	41	59
2100	79	350	53	90

Ilmastonmuutoksen seurauksena betonin märkänä tapahtuvan pakkasrasituksen suhteen olosuhteet helpottuvat eteläisellä rannikkoalueella merkittävästi jo 2030. Sen sijaan sisämaassa olosuhteet pysyvät nykytasolla ja sateisuuden lisääntyessä vielä ankarampana lähes vuosisadan loppuun saakka. Betonin lisähuokostuksen täydellinen epäonnistuminen (suojahuokossuhde $< 0,10$) merkitsee varmaa pakkasrapautumista ennen tavoitellun käyttöiän päättymistä (vähintään 50 vuotta).

Betoninormien (2012) vaatimuksissa betonin pakkasenkestävyyttä tulee testata laboratoriossa jäädytyskulutuskokeessa 100 kierrosta (XF 1, 50 vuotta) tai 300 kierrosta (XF 1, 100 vuotta ja XF 3, 50 vuotta). Laboratoriokokeessa kapillaarisesti kyllästetty koekappale altistetaan lämpötilavaihtelulle $-20...20$ °C. Koestus on siten huomattavasti ankarampi, kuin luonnonolosuhteissa tapahtuvat jäätymissulamissyklit. Voidaankin todeta, että normien mukaisen koestuksen kestävä betoni kestää hyvin myös todellisissa ilmasto-olosuhteissa tavoitellun käyttöiän ajan myös tulevaisuudessa.

Nykyinen betonielementtikanta tulevaisuuden ilmastorasituksessa

1960-luvun lopulta 1980-luvun puoliväliin asti betonielementtirakennuksien julkisivuissa ja parvekkeissa käytetyn betonin säilyvyysominaisuudet ovat varsin puutteellisia. Betonin valmistusvaiheessa notkeutta on haettu vettä lisäämällä, mikä on johtanut korkeaan vesisementtisuhteen ja edelleen suureen kapillaarihuokoisuuteen. Myös tuoreen betonin lisähuokostus on ollut usein puutteellista tai sitä ei ole käytetty ollenkaan. Tämä on johtanut erittäin puutteelliseen pakkasenkestävyyteen useissa elementtityypeissä. Lisäksi nykybetoneihin verrattuna puristuslujuustaso on ollut alhainen, luokkaa K20-K25. Tämä tarkoittaa merkittävästi alhaisempaa jäätymissulamisasiirituksen kestoa nykyisin käytettäviin betonilaatuihin verrattuna. (Lahdensivu 2012) Ilmastonmuutoksen aiheuttama sateisuuden kasvu on merkittävä pakkasrapautumista lisäävä tekijä vanhoille kapillaarisille betonirakenteille, joiden pakkasenkestävyys on puutteellinen ($p_r < 0,10$). Sateisuuden seurauksena betonin huokosverkoston täyttöaste kasvaa merkittävästi nykytasosta, jolloin myös pakkasvaurioiden riski kasvaa oleellisesti vaikka jäätymissulamissyklit tulevaisuudessa vähentyvät.

Lämmöneristepaksuuden vaikutus betonin pakkasrapautumiseen

Betonielementeissä lämmöneristepaksuudet ovat vaihdelleet aikakauden vaatimusten mukaan. Lämmöneristepaksuudet ovat kasvaneet merkittävästi elementtirakentamisen alkuajoista tähän päivään. Ulkoseinän U-arvo on siten pienentynyt luokasta 0,50 W/(m²K) nykytasoon 0,17 W/(m²K). Lämpövirta elementin läpi on huomattavasti vähäisempi nykyisissä rakenteissa kuin vanhoissa elementeissä. Tutkimuksessa *Durability properties and actual deterioration of Finnish concrete facades and balconies* (Lahdensivu 2012) on tarkasteltu mm. lämmöneristykseen paksuuden vaikutusta betonin pakkasrapautumisen esiintymiseen. Näille ei löydetty mitään yhteyttä. Betonin säilyvyysominaisuudet sekä ulkoilman aiheuttama rasiustaso ovat oleellisesti merkittävämpiä betonin pakkasrapautumisen aiheutumiseen.

Päätelmät ja suositukset

Betonin karbonatisoitumisnopeus vaihtelee suuresti betonin ominaisuuksien mukaan. Betoni ei ole homogeeninen materiaali vaan sen ominaisuudet vaihtelevat mm. tiivistyksestä ja jälkihoidosta riippuen. Myös eri sekoituserien välillä voi olla suuria eroja mm. kiviaineksen kosteuspitoisuuseroista ja siten vesisementtisuhteesta riippuen. Betoniteknologialla on suuri vaikutus betonin kapillaarihuokoisuuteen. Yleisesti betonin karbonatisoituminen on hidasta tiiviissä alhaisen vesisementtisuhteen betoneissa, joiden jälkihoito on tehty huolellisesti.

Betoninormien käyttöikälaskennan mukaisesti betonirakenteen käyttöikä päättyy silloin kun karbonatisoituminen saavuttaa raudoitteet. Tällöin ei kuitenkaan tapahdu vielä minkäänlaista vaurioitumista, vaan korrosio voi alkaa, mikäli olosuhteet ovat sille suotuisat (riittävä kosteus, hapen läsnäolo, lämpö). Käyttöikälaskentaa tulee kehittää siten, että myös aktiivinen vaurioitumisen vaihe otetaan huomioon.

Ilmastonmuutos lisää sateiden määrää sekä tuulisuutta, jolloin julkisivuille tulee nykyistä korkeampi viistosaderasitus. Aktiivisen korroosion nopeuteen sateisuuden lisääntymisellä on kuitenkin varsin vähäinen vaikutus, sillä Etelä- ja Keski-Suomessa aktiivinen korrosioaika on jo nykyisellään varsin lyhyt, luokkaa 6–8 vuotta, mikä nopeutuu 5–6 vuoteen vuosisadan loppuun mennessä.

Raudoitteiden peitepaksuuden ollessa betoninormien vaatimalla tasolla (25 mm) näkyvät korrosiovauriot ovat tavanomaisissa julkisivu- ja parvekerakenteissa hyvin harvinaisia, vaikka karbonatisoituminen olisi edennyt raudoitteiden syvyydelle saakka. Erityisesti sateelta suojattujen rakenteiden, kuten parvekelaattojen alapinnoissa tai parvekekaiteiden sisäpinnoissa olevien terästen korrosio on hyvin hidasta.

Liian lähelle (alle 15 mm) ulkopintaa jääneissä betoniteräksissä raudoitteiden korrosiovaurioita tulee esiintymään tulevaisuudessa ennen kuin suunnitteluvaiheessa tavoiteltu käyttöikä on saavutettu. Valmistusvaiheessa raudoitteiden riittävät peitepaksuudet tulee varmistaa välikkein ja huolellisella asennustyöllä. Julkisivuissa on jo pitkään käytetty ruostumattomia raudoitteita, jolloin karbonatisoitumisesta ei aiheudu korrosio-ongelmia.

Ruostumattomien raudotteiden käyttöä tulee harkita myös sellaisiin kohteisiin, joissa vaadittavien peitepaksuuksien aikaansaaminen välikkeiden avulla on epävarmaa.

Sadevettä hylkivillä mutta vesihöyryä läpäisevillä pinnoitteilla on mahdollista estää tai ainakin hidastaa merkittävästi raudotteiden korroosiota karbonatsoituneessa betonissa. Tällaisten pinnoitteiden käyttöä tulee edistää maalattavissa betonijulkisivuissa ja parvekkeissa. On kuitenkin muistettava, että vain ehjä pinnoite suojaa alla olevaa betonirakennetta. Pinnoitteet ovat siis yksi huollettava kohde.

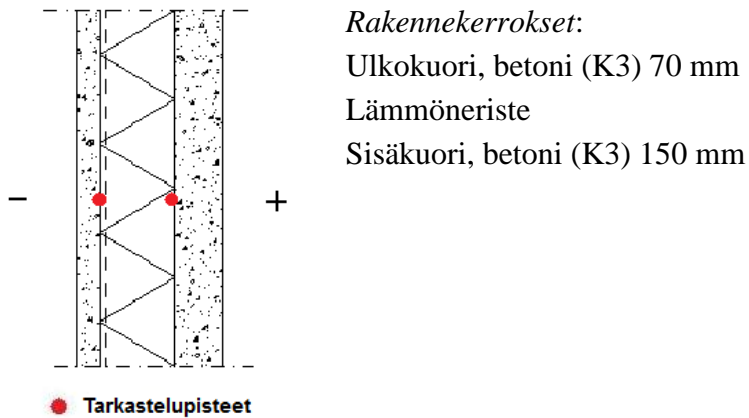
Betonin pakkasenkestävyyden suhteen nykyinen vaatimustaso on riittävä myös tulevaisuudessa. On kuitenkin huolehdittava siitä, että betonin lisähuokostus onnistuu aina. Suojaavat pinnoitteet alentavat betonin kosteustason niin alas, että pakkasrapautuminen ei ole mahdollista.

Parvekkeiden vedenpoiston toimivuuteen on kiinnitettävä huomiota sekä suunnittelussa, toteutuksessa että rakennuksen huoltamisessa. Betonin karbonatsoitumisen seurauksena raudotteiden korrosio on ensimmäisenä mahdollista laatan alapinnan teräksissä. Korrosio ei kuitenkaan etene, mikäli rakenne pysyy kuivana. Parvekelasitus vähentää tehokkaasti parvekkeelle tulevan viistosateen määrää ja näin alentaa parvekkeen rasitustasoa.

6.1.2 Betonisandwich-rakenteen kosteusteknisen toiminnan laskennalliset tarkastelut

FRAME-hankkeessa tutkittiin kantavan betonisandwich-rakenteen kosteusteknistä toimintaa ja eristepaksuuden lisäyksen vaikutusta nykyilmastossa ja tulevaisuuden ilmasto-olosuhteissa. Rakenteen lämpö- ja kosteustekniset laskelmat tehtiin WUFI-1D -ohjelmalla käyttäen materiaalien alkukosteuspitoisuutena 95 % RH:ta vastaavaa suhteellista kosteutta. Tämä kosteus vastaa tyypillistä alkukosteutta työmaalle toimitetuissa seinäelementeissä. Laskentajakson pituus oli 10 vuotta (homeriskitarkasteluissa 6 vuotta) ja laskentatarkastelut tehtiin sekä Jokioisen että Vantaan testivuosilla.

Betonielementtien valmistuksessa pyritään korkeaan lujuuteen ja alhaiseen vesisementtisuhteeseen ($W/C < 0,6$) (BY 50 2012; Erkkilä 2012). Valmistuksessa yleisesti käytetyllä vesisementtisuhteella rakenteeseen ei muodostu jatkuvaa kapillaarihuokosverkostoa (BY 201 1999; Matala 1991). Tarkempien laboratoriokeiden puuttuessa laskentatarkasteluihin valittiin betoni K3 (ks. liite 1). Tutkittava seinäelementti koostui 70 mm paksusta ulkokuoresta, lämmöneristeestä sekä 150 mm paksusta sisäkuoresta (kuva 6.1.8). Lämmöneristeinä käytettiin mineraalivillaa (D1 ja D2), EPS (P3, P4), XPS (P2) ja PU (P1) -eristeitä. Materiaaliominaisuudet on esitetty liitteessä 1.



Kuva 6.1.8 Tarkasteltavan betonisandwich-elementin rakenne ja tarkastelupisteet.

Mineraalivillalla eristetyssä sandwich-rakenteessa otettiin huomioon tuuletusurien vaikutus lisäämällä 1-ulotteiseen ohjelmaan yhtenäinen 20 mm paksu ilmarako. Laskennassa käytetty modifioitu ilmanvaihtuvuus, 0,5 1/h, vastasi tyypillistä 30 mm leveää ja 20 mm paksua uritusta, jotka sijaitsevat 200 mm jaolla eristeen ulkopinnassa. Tuuletusurien vuoksi eristeen ulkopinnassa on rinnakkaisia alueita, joiden lämmönvastukset ja kosteustekninen toiminta eroavat toisistaan. Tuuletusurien välinen alue haluttiin ottaa 1-ulotteisessa laskennassa huomioon sijoittamalla ilmarako 30 mm päähän eristeen ulkopinnasta. Solumuovieristeillä eristetyt sandwich-rakenteet olivat laskentatarkasteluissa tuuletusurittamattomia rakenteita.

Mineraalivillaeristeinen tuuletusurallinen rakenne on lievästi tuulettuva, joten rakenteen ulkokuori otettiin U-arvon laskennassa huomioon ja ulkopinnan pintavastuksena käytettiin arvoa 0,04 m²K/W.

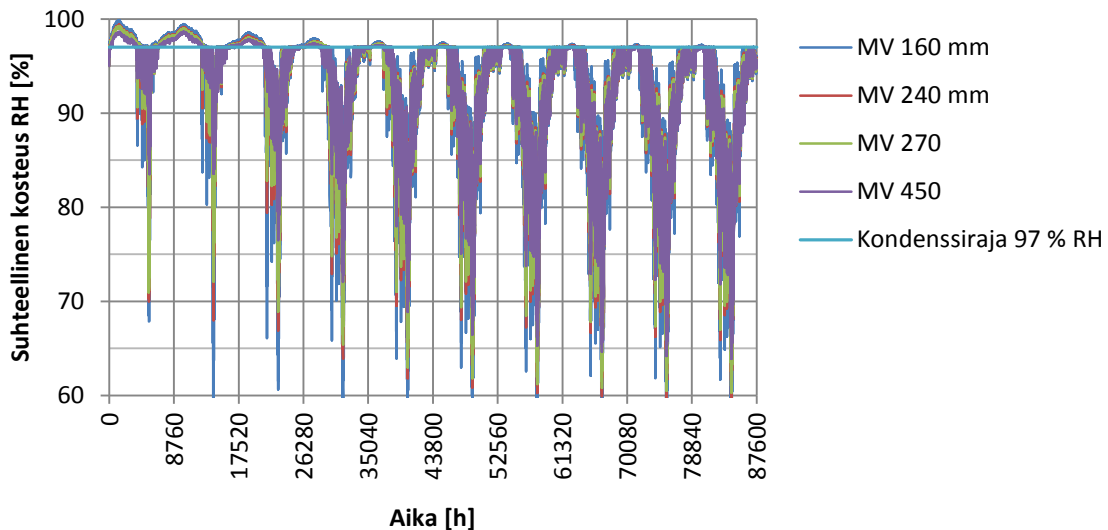
Rakennusaikaisen kosteuden vaikutus rakenteen toimintaan

Sandwich-rakenteen kuivumiskäyttäytymistä tarkasteltiin lämmöneristeen ulko- ja sisäpinnassa 10 vuoden ajanjaksolla ja homeen kasvua 6 vuoden ajanjaksolla. Pitkillä tarkastelujaksoilla pyrittiin lähestymään tilannetta, jossa ylimääräinen kosteus on poistunut materiaaleista ja suhteellisen kosteuden muutokset tapahtuvat rakenteessa vain vuodenajasta riippuen. Hygroskooppinen kyllästyskosteus oli laskelmissa 97 % RH ja tätä korkeampi suhteellinen kosteus on otettu huomioon tiivistyvänä kosteutena rakenteen rajapinnoissa. 10 vuoden pituinen kuivumistarkastelu kuvaa sandwich-rakenteelle erityisen kriittistä olosuhdetta, koska testivuosien on oletettu toistuvan peräkkäisinä vuosina. Todellisessa tilanteessa kriittisiä vuosia esiintyy keskimäärin kahtena vuotena peräkkäin ja kolmas vuosi on yleensä rakenteen toiminnan kannalta suotuisampi. Tarkastelluista testivuosista kriittisemmäksi osoittautui Jokioisen ilmasto, kun tarkastelupisteinä oli mineraalivillan ulkopinta. Muissa laskentatapauksissa kriittisin vuosi oli puolestaan Vantaan ilmasto.

Mineraalivillaeriste

Kuvassa 6.1.9 on esitetty lämmöneristeen ulkopinnan suhteellisen kosteuden riippuvuus kuivumisajasta. Kuvasta voidaan havaita, että suhteellinen kosteus pysyy yli kondenssirajan

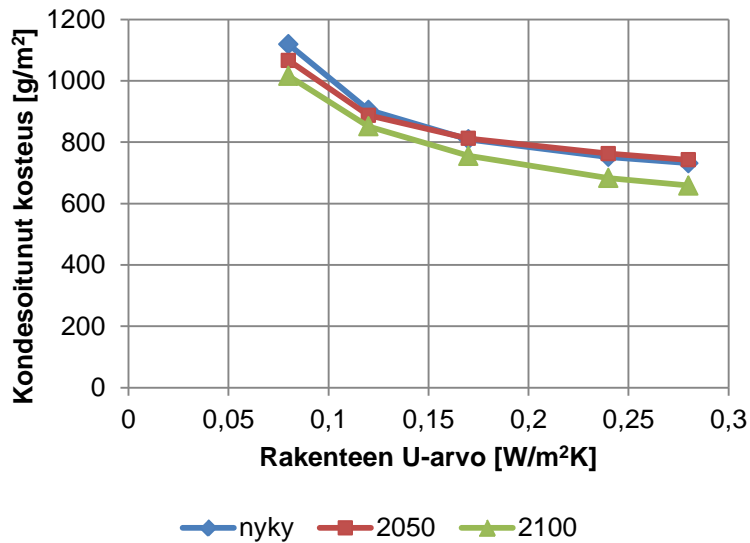
noin 2,5 vuotta kuivumisen alkuketkstä riippumatta eristepaksuudesta. Mineraalivillan suuren vesihöyrynläpäisevyyden vuoksi eristepaksuuden kasvattamisella ei ole suurta vaikutusta rakenteen kokonaiskuivumisaikaan, vaan rakenteen kuivumisaika ja kosteuden tasaantumisnopeus on kaikilla käytetyillä eristepaksuuksilla likimain samansuuruinen. Talviaikana lämmöneristeen ulkopinnassa esiintyy ulkoilman olosuhteista johtuvaa kosteuden kondenssia kaikilla käytetyillä eristepaksuuksilla vielä rakennuskosteuden poistuttuakin rakenteesta.



Kuva 6.1.9 Suhteellinen kosteus mineraalivillaeristeen ulkopinnassa Jokioisen 2004 ilmastossa.

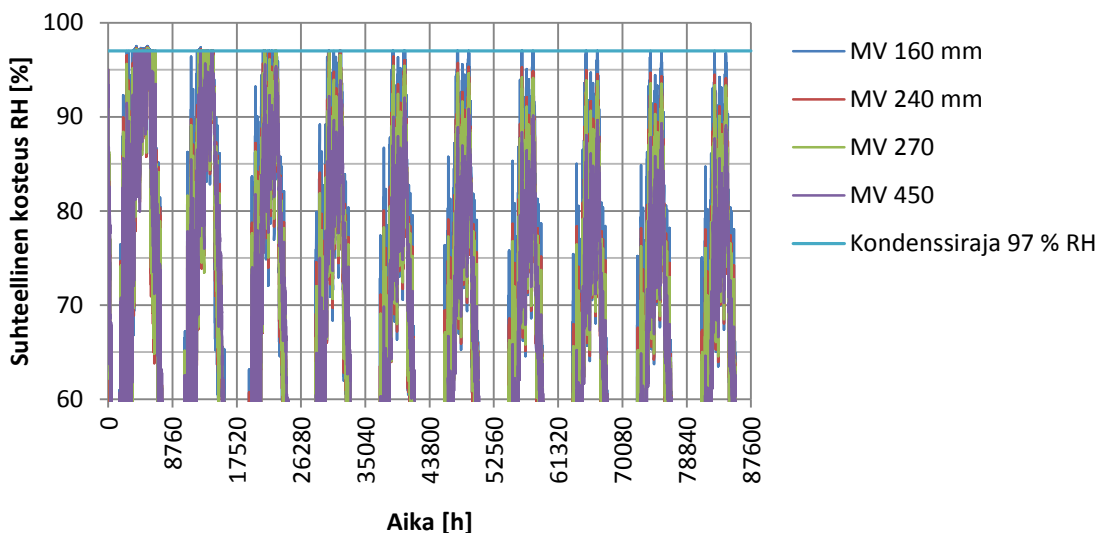
Rakentamisen jälkeisenä ensimmäisenä vuotena mineraalivillan ulkopinnassa havaitaan suurimmat tiivistyneet kosteusmäärät. Mineraalivillan ulkopintaan tiivistyy ensimmäisenä vuotena eristepaksuudesta riippuen $650\text{--}1100\text{ g/m}^2$ kosteutta. Passiivitason rakenteessa (eristeen paksuus 450 mm) kondenssimäärät olivat noin 450 g/m^2 suurempia kuin 140 mm mineraalivillalla eristetyssä sandwich-rakenteessa (kuva 6.1.10). Kosteusmäärä ylitti myös DIN 4108-3 (1981) standardissa mainitun suurimman sallitun kosteuden (1000 g/m^2), mutta koska kosteuskuorma on rakenteelle vain hetkellinen, sillä ei ole haitallista vaikutusta rakenteen kosteustekniseen toimivuuteen. Laskentatulosten mukaisesti lämmöneristeen kasvattaminen lisää kondensoituneen kosteuden määrää ja heikentää rakenteen kosteusteknistä toimivuutta heti rakentamisen jälkeisinä vuosina.

Ylimääräinen kosteus poistui mineraalivillalla eristetyistä betonisandwich-rakenteista noin neljän vuoden aikana. Neljän vuoden jälkeen tiivistyneen kosteuden määrä pysyi mineraalivillaeristeisessä sandwich-rakenteessa alle 100 g/m^2 eikä kosteuden määrä enää ollut haitallisen suuri. Kondenssimäärät mineraalivillan ulkopinnassa olivat lähes samansuuruisia kaikissa ilmastoissa (nykyilmasto, vuoden 2050 ilmasto ja vuoden 2100 ilmasto).



Kuva 6.1.10 Tiivistyneet kosteusmäärät mineraalivillan ulkopinnassa rakentamisen jälkeisenä vuotena Jokioisen ilmastossa.

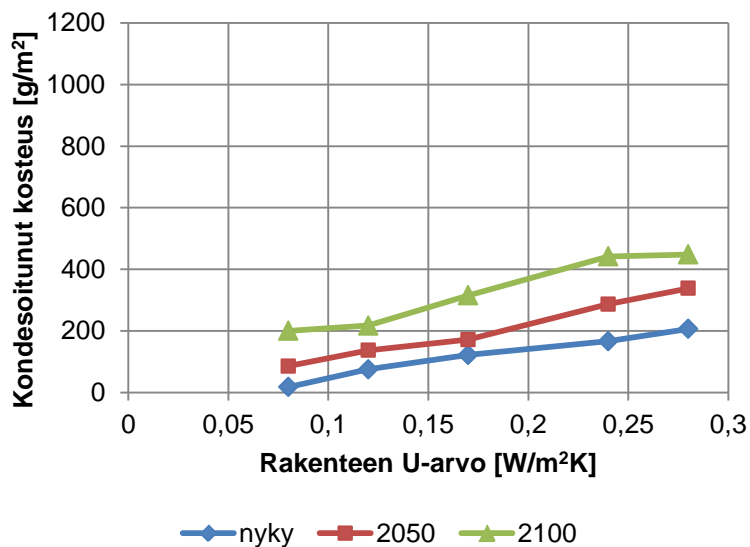
Mineraalivillaeristeen sandwich-rakenteen sisäpinnassa ei ole havaittavissa selkeitä eroja suhteellisen kosteuden arvoissa erilaisilla eristepaksuuksilla (kuva 6.1.11). Mineraalivillaeristeestä ei muodostu kosteutta rajoittavaa kerrosta vaan sisäkuoren rakennekosteus pääsee kuivumaan sekä ulos- että sisälle päin. Mineraalivillaeristeen sisäpinnassa RH on talvella matala ja kosteana kesäaikana se nousee korkeaksi. Kuvasta 6.1.11 on havaittavissa, että sisäkuoren ja mineraalivillan rajapinta saavuttaa tasapainokosteuden noin 4,5 vuoden kuluttua rakentamisesta.



Kuva 6.1.11 Suhteellinen kosteus mineraalivillaeristeen sisäpinnassa Vantaan 2007 ilmastossa.

Mineraalivillaeristeen ja sisäkuoren rajakohdassa kondensoituneet kosteusmäärät olivat rakentamisen jälkeisenä ensimmäisenä vuotena 100–450 g/m² rakenteen U-arvosta ja ilmastosta riippuen (kuva 6.1.12). Kolmantena vuonna rakentamisesta sisäpinnassa havaittiin

tiivistynyttä kosteutta maksimissaan vain noin 50 g/m^2 . Eristeen sisäpinta kuivui selkeästi ulkopintaa nopeammin.

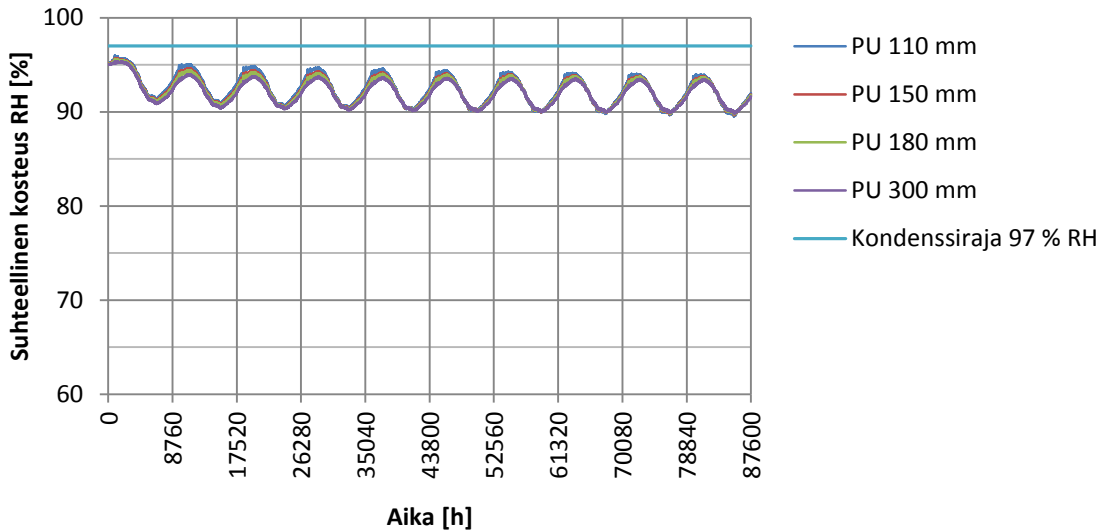


Kuva 6.1.12 Tiivistyneet kosteusmäärät mineraalivillan sisäpinnassa rakentamisen jälkeisenä vuotena Vantaan ilmastossa.

Solumuovieriste

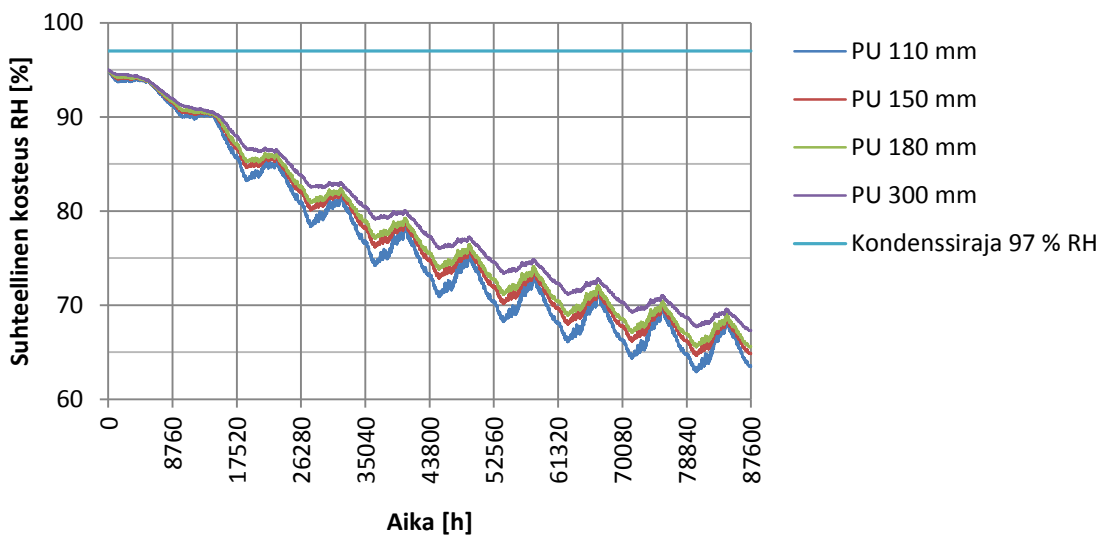
EPS-, XPS- ja PU-eriste käyttäytyivät betonielementissä kosteuden tiivistymisen kannalta keskenään hyvin samalla tavalla. Vesihöyrytiivimpinä eristeinä solumuovieristeet muodostavat selvästi suuremman vesihöyrynvastuksen sisäpuolelta ulospäin diffuusiolla siirtyvälle kosteudelle kuin mineraalivilla. Kuvissa 6.1.13 ja 6.1.14 on tarkasteltu esimerkkinä polyuretaanieristeen käyttäytymistä betonisandwich-rakenteessa.

Kuten kuvasta 6.1.13 voidaan havaita, ulkokuoren ja polyuretaanieristeen välisen rajapinnan suhteellinen kosteus pysyy hyvin matalalla tasolla myös heti rakentamisen jälkeisinä vuosina. Päinvastoin kuin mineraalivillalla, rakenteen toiminta paranee eristepaksuuden kasvaessa. Tämä johtuu solumuovieristeiden mineraalivillaa suuremmasta vesihöyrynvastuksesta, jonka vaikutus kasvaa entisestään paksuja eristeitä käytettäessä. Tiivis ja paksu solumuovieristekerros vähentää merkittävästi kosteuden siirtymistä rakenteen sisäosista ulkosiin. Kondensoituvan kosteuden määrät polyuretaanieristeen ulkopinnassa olivat $1\text{--}10 \text{ g/m}^2$ vuodessa. Määrät ovat niin pieniä, että niillä ei ole käytännön vaikutusta rakenteen toimintaan.



Kuva 6.1.13 Suhteellinen kosteus PU-eristeen ulkopinnassa Vantaan 2007 ilmastossa.

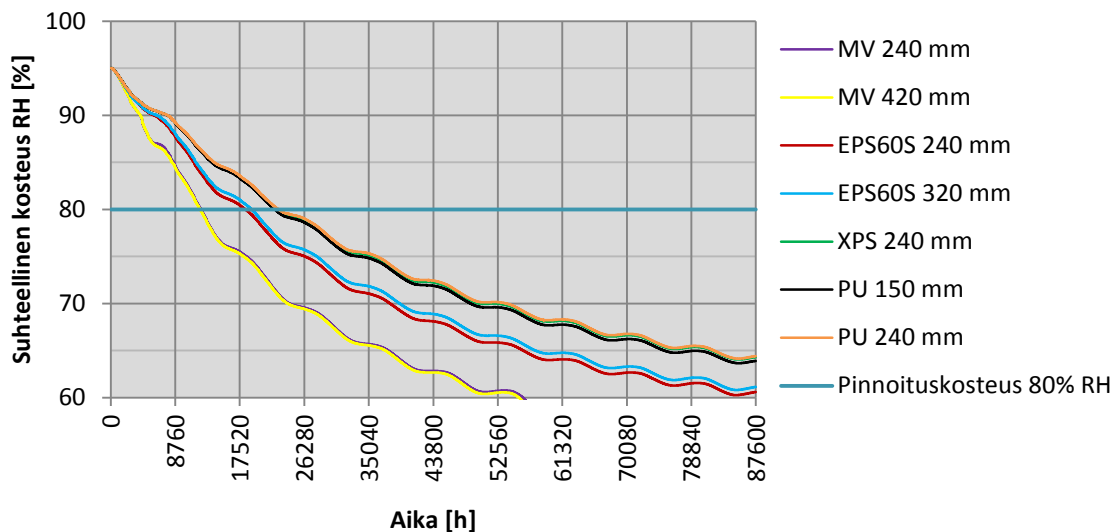
Kuvasta 6.1.14 voidaan havaita, että polyuretaanieristeellä eristetyyn betonisandwich-rakenteen suhteellinen kosteus kasvaa jonkin verran lämmöneristeen sisäpinnassa eristepaksuutta kasvatettaessa. Tämä johtuu siitä, että eristepaksuuden kasvaessa samalla myös rakenteen vesihöyrynvastus kasvaa, jolloin elementin sisäkuoren kuivuminen ulospäin hidastuu. Solumuovieristeitä käytettäessä lämmöneristeen sisäpinnassa ei havaittu kosteuden tiivistymistä missään käytetyssä ilmastossa.



Kuva 6.1.14 Suhteellinen kosteus PU-eristeen sisäpinnassa Vantaan 2007 ilmastossa.

Sisäkuoren kuivuminen on hitainta vesihöyrytiivillä PU- ja XPS-eristeillä, joilla kuivuminen esimerkiksi pinnoituskosteuteen 85 % RH kestää n. 7 kuukautta pidempään kuin mineraalivillaeristeisellä elementillä (kuva 6.1.15). PU- ja XPS-eristeillä kokonaiskuivumisaika 85 % RH pinnoituskosteuteen on n. 19 kk, EPS-eristeellä n. 16 kuukautta ja mineraalivillaeristeellä n. 12 kuukautta. Suhteellinen kosteus on laskettu 0,4d syvyydeltä sisäpuolisen betonikuoren sisäpinnasta, missä d on betonikuoren paksuus (150

mm). Mineraalivillaeristettä käytettäessä sisäkuori kuivuu molempiin suuntiin, jolloin huokosilman suhteellista kosteutta voitaisiin tarkastella myös 0,2d syvyydellä sisäpinnasta. Tässä syvyydessä rakenne saavuttaa 85 % RH pinnoituskosteuden n. 5,5 kuukaudessa. Eli todellisuudessa ero mineraalivillan ja solumuovieristeiden välillä on vielä suurempi kuin kuvassa 6.1.15 on esitetty. Laskennassa betonikuorien alkukosteudeksi on oletettu 95 % RH:ta vastaava suhteellinen kosteus, joka vastaa betonissa kosteusmäärää 118 kg/m^3 . Tulevaisuuden ilmastoissa kuivumisajat pitenevät solumuovilla eristetyillä rakenteilla 40–60 % ja mineraalivillaeristeisillä rakenteilla 20–40 %.



Kuva 6.1.15 Rakennusaikaisen kosteuden kuivuminen 150 mm paksun betonielementin sisäkuoresta pinnoituskosteuteen eri eristelaatuja käytettäessä Vantaan 2007 ilmastossa. Seurantapiste on 60 mm syvyydellä betonielementin sisäpinnasta.

Kuvassa 6.1.15 esitettyihin kuivumisaikoihin vaikuttaa oleellisesti se, millaiset sisäilman olosuhteet rakennuksessa vallitsevat rakennusaikana. Laskennassa on oletettu, että lämpötila- ja kosteusolosuhteet vastaavat kosteusluokan 2 käytön aikaisia mitoitusolosuhteita (ks. kuva 3.2.2) myös rakennusaikana. Olosuhteiden muuttuessa kuivumisajat voivat joko pidentyä tai lyhentyä kuvassa 6.1.15 esitetyistä ajoista.

Betonisen sisäkuoren hidaskuivuminen on otettava huomioon silloin, kun betonin sisäpinta pinnoitetaan suhteellisen vesihöyrytiivillä pinnoitteella (esim. vedeneristeellä kosteissa tiloissa) tai jos pinta peitetään kaapistoilla tai rakenteilla, jotka hidastavat betonin kuivumista ja pitävät peittävät rakenteet pitkään kosteina.

Homeen kasvu rakenteissa

Uusi betoni on voimakkaasti alkalista, joka suojaa mineraalivillan ja betonikuoren välistä rajapintaa homehtumiselta. Tämän takia homehtumisriskitarkasteluissa on käytetty homehtumisherkkyyssluokkaa HHL4. On kuitenkin huomattava, että betonin karbonatisoitua sen kemiallinen suoja häviää tai heikkenee, jolloin rakenteeseen saattaa kosteusvuototilanteessa muodostua homeen kasvua. Tässä osiossa on kuitenkin tarkasteltu

ainoastaan sellaisten rakenteiden käyttäytymistä kuivumisen aikana ja käyttötilanteessa, joissa ei esiinny kosteusvuotoja. Tarkasteluissa on oletettu, että rakenne on tehty hyvää rakennustapaa noudattaen siten, että rakenteeseen ei pääse ylimääräistä kosteutta ilmavuotojen tai sadevesivuotojen seurauksena.

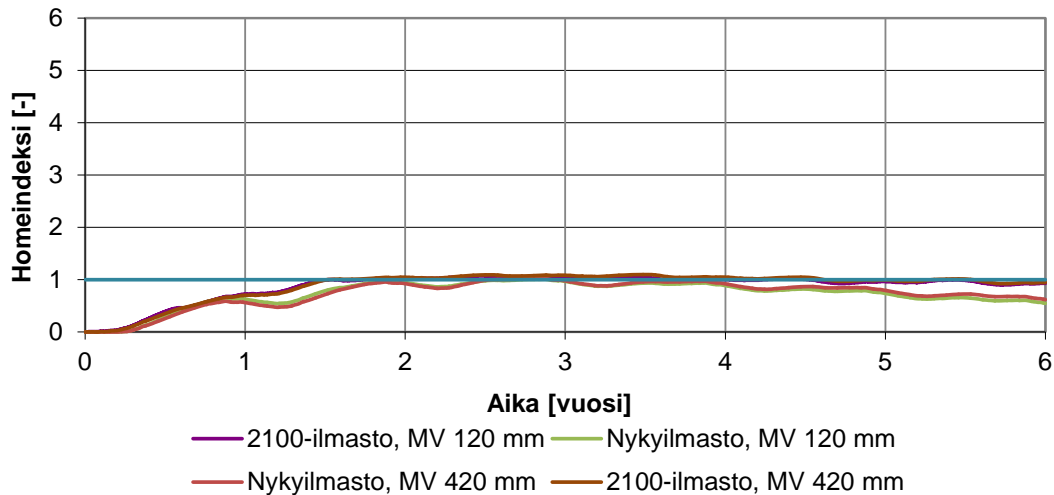
Mineraalivillaeriste

TTY:llä on tutkittu kenttätutkimuksin mikrobikasvuston esiintymistä mineraalivillalla eristetyistä betonisandwich-elementeistä ulkokuoren läpi porattujen reikien kautta otetuista eristenäytteistä (Pessi et al. 1999). Kaikista tutkituista näytteistä (1713 kpl) vain 6,6 % oli selvästi havaittavaa mikrobikasvustoa ja tutkituista elementeistä 63 % oli luokiteltavissa mikrobien suhteen täysin puhtaiksi. Elementin laitaosat lähellä saumojen mahdollisia vuotokohtia olivat odotetusti mikrobivaurioituneita. Elementin eristetilä osoittautui tutkimuksessa homesienille ja sädesienibakteereille kuitenkin suhteellisen epäsuotuisaksi kasvualustaksi.

Mineraalivillalla eristetyssä betonisandwich-elementissä eristepaksuuden kasvattamisella ei ole suurta vaikutusta lämmöneristeen ulkopinnan homehtumisriskiin (kuva 6.1.16). Sitä vastoin tulevaisuudessa ilmastonmuutoksen seurauksena lisääntyvä saderasitus, pilvisuus ja korkeampi ulkoilman suhteellinen kosteus kasvattavat jonkin verran myös lämmöneristeen ulkopinnan homehtumisriskiä. Mineraalivillan ulkopinnassa homeindeksi saavuttaa 1,5–2 vuoden jälkeen homeen kasvun raja-arvon ($M_{\max} = 1,1$). Homeindeksi pysyy tässä tasossa nykyilmaston olosuhteissa noin neljä vuotta laskennan alkuhetkestä.

Ylimääräisen rakennekosteuden poistuttua betonista myös homeindeksi kääntyy laskuun. Tulevaisuuden kosteassa ilmastossa rakenteen kuivuminen on hitaampaa, joka näkyy kuvassa 6.1.16 rakenteen hitaampana kuivumisnopeutena. Nykyilmaston kuvaajasta on nähtävissä selkeästi homeindeksin vuosittainen sykli, syksyn kasvuvaihe ja talven taantumavaihe. Lämmöneristeen ulkopinnan osalta tulokset osoittavat, että lämmöneristeen eristepaksuuden kasvattamisen aiheuttama suhteellisen kosteuden nousu ei lisää homeen kasvulle otollisia olosuhteita, koska samalla eristeen lämpötila laskee.

Mineraalivillaeristettä tarkasteltaessa on otettava huomioon, että homeen kasvua voi esiintyä myös mineraalivillan sisällä, jossa betonipinnan alkalisuus ei suojaa eristettä. Toisaalta suhteellinen kosteus on suurimmillaan eristeen ulkopinnassa ja laskee nopeasti sisälle päin mentäessä, jolloin myöskään olosuhteet eivät ole enää homeen kasvulle niin suotuisat. Mineraalivillan sisällä homehtumisriskitarkasteluja voidaan tehdä tarvittaessa homehtumisherkkyyssluokassa HHL3, mutta tässä yhteydessä on tarkasteltu ainoastaan betonin ja eristeen rajapintojen olosuhteita.

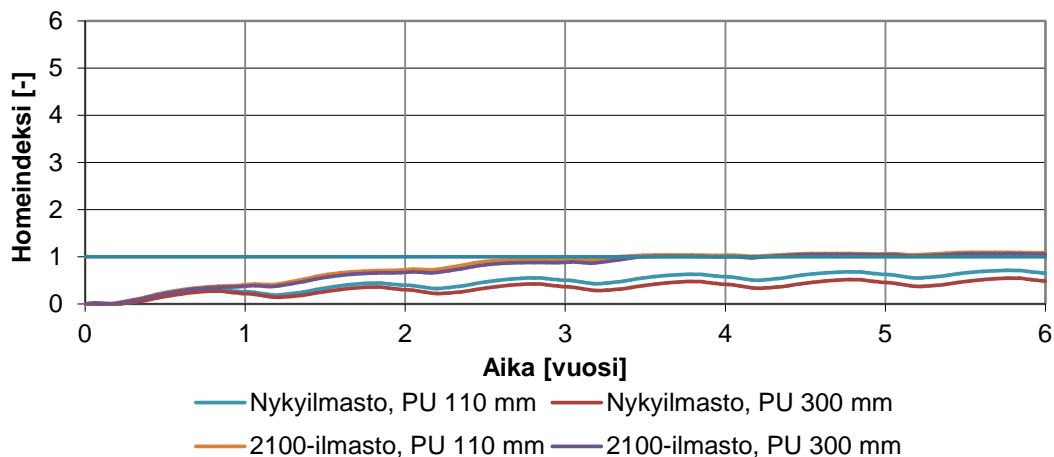


Kuva 6.1.16 Homeen kasvu (HHLA) mineraalivillan ulkopinnassa Jokioisen ilmastossa.

Mineraalivillan sisäpinnassa homeindeksi pysyy nollassa eikä sisäpinta ole mineraalivillalla eristetyissä sandwich-rakenteissa kriittinen. Kosteuspotentiaali on kaikkina vuodenaikoina lämmitetyissä rakennuksissa pääasiassa ulospäin, jolloin hyvin vesihöyryä läpäisevää eristettä (mineraalivillaa) käytettäessä lämmöneristeen ulkopinta on sisäpintaa kriittisempi.

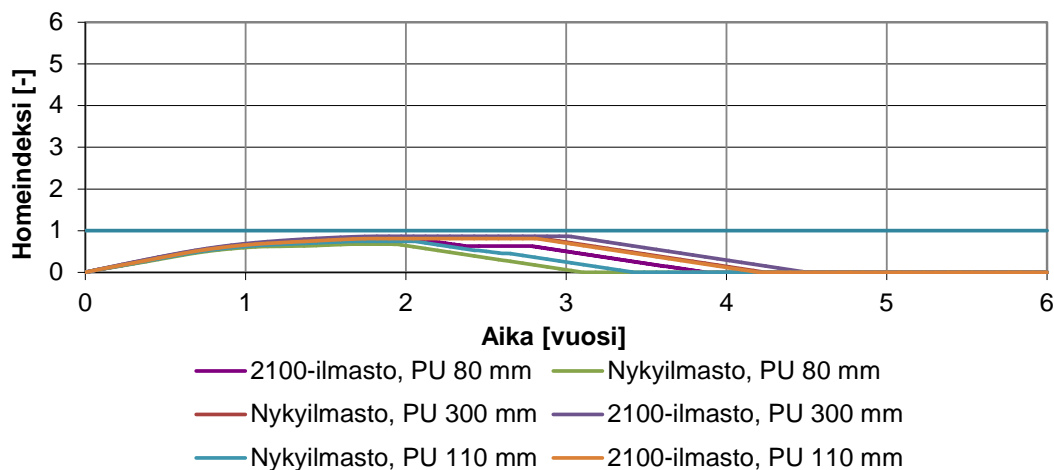
Solumuovieriste

Solumuovilla (EPS, XPS ja PU) eristetyissä sandwich-elementeissä homeindeksin nousunopeus on lämmöneristeen ulkopinnassa hyvin hidasta ja homeen kasvua ei käytännössä juurikaan tapahdu eristeen ja betonin välisessä rajapinnassa (kuva 6.1.17). Kuvasta 6.1.17 havaitaan, että odotettavissa oleva ilmastonmuutos heikentää jonkin verran myös rakenteen ulko-osan kosteusteknistä toimivuutta solumuovieristeillä eristetyissä betonisandwich-rakenteissa. Homeen kasvua tarkasteltaessa solumuovieristeellä eristetty rakenne paranee eristepaksuuden kasvaessa, koska lämmöneristeen lisääntynyt vesihöyrynvastus vähentää kosteuden siirtymistä sisältä rakenteen ulko-osiin.



Kuva 6.1.17 Homeen kasvu (HHLA) PU-eristeen ulkopinnassa Vantaan ilmastossa.

Solumuovieristeen sisäpinnassa eristepaksuuden kasvattaminen nostaa myös homeindeksin arvoa, mutta homeen kasvua ei kuitenkaan tapahdu ($M_{\max} < 1$) (kuva 6.1.18). Tämä johtuu lämmöneristekerroksen kasvattamisen aiheuttamasta vesihöyrynvastuksen kasvamisesta, jolloin rakenteen kuivuminen ulospäin hidastuu ja suhteelliset kosteudet eristeen sisäpinnassa nousevat.

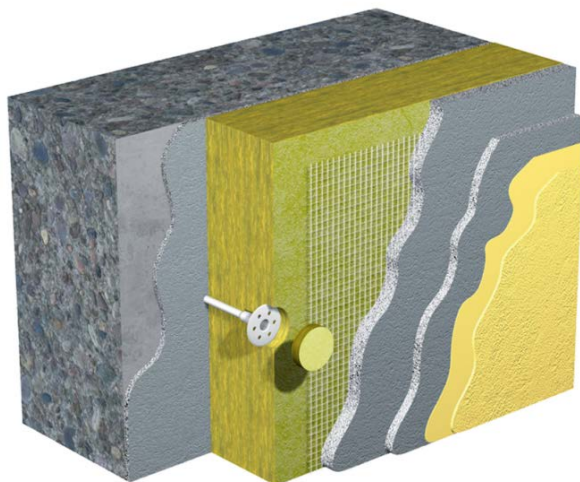


Kuva 6.1.18 Homeen kasvu (HHL4) PU-eristeen sisäpinnassa Vantaan ilmastossa.

Yhteenvedona voidaan sanoa, että betonisandwich-rakenne on käyttötilanteessa toimiva, mutta rakennusaikainen kosteus saattaa aiheuttaa lämmöneristeen rajapintoihin kosteuden tiivistymistä. Lämmöneristeen ulkopinnassa olosuhteissa ei tapahdu suurta muutosta eristepaksuutta kasvatettaessa. Homeen kasvulle otollisia olosuhteita esiintyy mineraalivillaeristeen ulkopinnassa ja solumuovieristeen sisäpinnassa tulevaisuuden ilmastossa enemmän kuin nykyilmaston olosuhteissa. Alkalinen betoni suojaa kuitenkin rakennetta käytännössä riittävästi, jotta homeen kasvua ei rakenteessa esiinny.

6.1.3 Eristerapatun ulkoseinän kosteusteknisen toiminnan laskennalliset tarkastelut

Eristerappauksia on käytetty Suomessa jo 1970-luvulta saakka, mutta niiden suosio on kasvanut uudis- ja korjausrakentamisessa merkittävästi vasta aivan viime vuosina (BY 57 2011). Eristerappauksessa laastikerros levitetään suoraan rappausjärjestelmään soveltuvien lämmöneristeiden päälle (kuva 6.1.19). Lämmöneristeenä käytetään joko mineraalivillaa tai solumuovia.



Kuva 6.1.19 Periaate eristerappausjärjestelmästä (Saint-Gobain Weber 2012).

Yhtenä osana FRAME-hanketta tutkittiin betonisen sisäkuoren päälle tehdyn eristerappauksen kosteusteknistä toimivuutta. Lämpö- ja kosteustekniset laskelmat tehtiin WUFI 1D-ohjelmalla käyttäen laskennassa tiheää elementtiverkkojakoa. Rakenteita tutkittiin sekä Jokioisen 2004 että Vantaan 2007 testivuosilla.

Sisäkuoren paksuus oli 100 mm ja sisäpinta käsittelemätön kaikissa laskentatarkasteluissa. Lämmöneristeenä käytettiin tarkasteluissa joko EPS- tai mineraalivillaeristettä. Mineraalivillana käytettiin kivivillaa (D2, ks. liite 1), joka vastasi keskimäärin rappausalustana käytetyn kivivillalevyn ominaisuuksia ja EPS-eristeenä EPS 60 S-tyyppin seinäeristettä (P3, ks. liite 1). Betonisessa sisäkuoressa betonin lujuus on käyttöikävaatimusten mukaisesti (BY 50 2012) yleensä vähintään K35, jolloin betonin vesisementtisuhde vaihtelee tyypillisesti välillä 0,45–0,55. Tällöin kapillaariverkosto ei ole rakenteessa yhtenäinen (Matala 1991) ja rakenteen kuivumiseen vaikuttaa merkittävästi myös diffuusiolla tapahtuva kosteuden siirtyminen. Rakenteen toimintaa tarkasteltiin tämän takia pääsääntöisesti betonilaadulla K3 (ks. liite 1), jossa kapillaarinen veden liike ei ole niin hallitseva kuin tyypissä K4 (ks. liite 1). Lämmöneristeen ulkopinnassa käytettiin taulukoiden 6.1.5 ja 6.1.6 mukaisia rappausjärjestelmiä. Näistä järjestelmistä paksurappaus (paksu 1 ja 2, ks. taulukko 6.1.6) käytettiin ainoastaan mineraalivillan ulkopinnassa, koska EPS-eristeen ulkopintaan tätä rappausjärjestelmää ei suositella tehtäväksi (BY 57 2011).

Rappauslaastit karbonatisoituvat ulkoilman vaikutuksesta noin 2–4 viikon kuluttua pinnoituksesta (Alakulju 2012), jolloin ne menettävät rajapintaa kemiallisesti homehtumiselta suojaavan vaikutuksen. Tämän takia lämmöneristeen ja rappauksen välisessä rajapinnassa käytettiin kaikissa tarkasteluissa homehtumisherkkyysluokkaa HHL3.

Taulukko 6.1.5 Tarkasteltujen ohutrappausjärjestelmien rakennekerrokset.

Rappausjärjestelmä		Paksuus [mm]	Huom.
Ohutrappaus 1			
Silikonihartsipinnoite	M2	2	ulkopinta riippuen U-arvotasosta sisäpinta
Silikonihartsimaali	M3	0,3	
Ohutrappauslaasti S #0–1 mm	R11	6	
Lämmöneriste	D2 tai P3	120–480	
Betoni	K3 tai K4	100	
Ohutrappaus 2			
Hiertopinnoite S #0–1 mm	M1	3	ulkopinta riippuen U-arvotasosta sisäpinta
Ohutrappauslaasti S #0–1 mm	R11	10	
Lämmöneriste	D2 tai P3	120–480	
Betoni	K3 tai K4	100	

Taulukko 6.1.6 Tarkasteltujen paksurappausjärjestelmien rakennekerrokset.

Rappausjärjestelmä		Paksuus [mm]	Huom.
Paksurappaus 1			
Silikonihartsipinnoite	M2	2	ulkopinta riippuen U-arvotasosta sisäpinta
Silikonihartsimaali	M3	0,3	
Oikaisu- ja täyttölaasti KS 25/75/500	R5	20	
Lämmöneriste	D2 tai P3	120–480	
Betoni	K3 tai K4	100	
Paksurappaus 2			
Jalolaasti KS 50/50/600	R2	2	ulkopinta riippuen U-arvotasosta sisäpinta
Täyttölaasti KS 35/65/500	R3	10	
Pohjalaasti KS 20/80/500	R4	13	
Lämmöneriste	D2 tai P3	120–480	
Betoni	K3 tai K4	100	

Toiminta käyttötilanteessa

Eristerapatussa betoniseinässä rakennuskosteus ja diffuusion kuljettama vesihöyry tiivistyvät talvikautena rappauspinnoitteen sisäpintaan. Tiivistyneestä kosteudesta osa imeytyy kapillaarisesti rappauslaastien huokosverkostoon ja osa kulkeutuu painovoimaisesti alaspäin. Tätä painovoimaisesti rakenteessa siirtyvää kosteutta ei ole laskennassa otettu huomioon vaan kosteuden on oletettu siirtyvän rajapinnasta joko kapillaarisesti tai diffuusiolla rakenteessa vallitsevan kosteuspotentiaalın suuntaan.

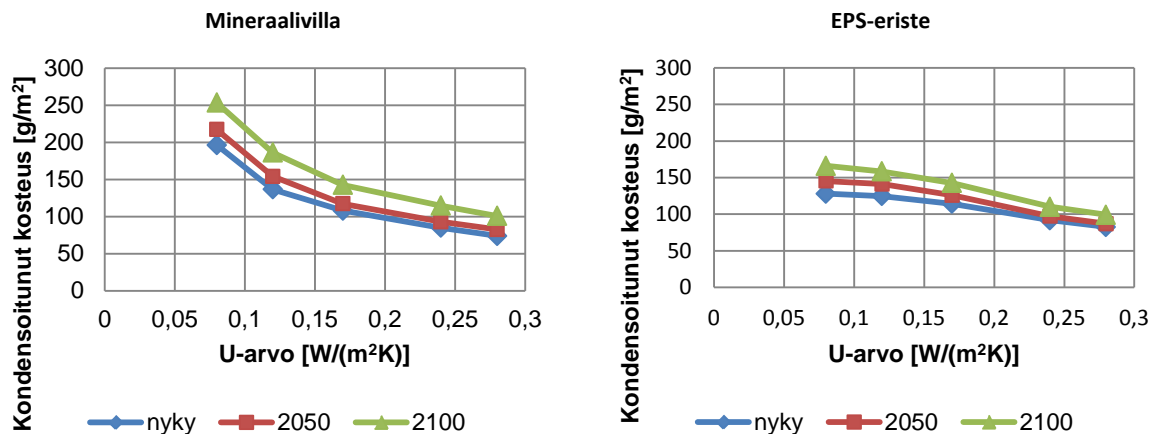
Seinä rakenteen läpi tapahtuva kosteuden diffuusiiovirtaus on talvikautena pääsääntöisesti sisältä ulospäin. Kosteus kondensoituu ulko-osissa, kun huokosilmaa vastaava vesihöyrypitoisuus on suurempi kuin lämpötilaa vastaava kyllästyskosteuspitoisuus lämmöneristeen kylmällä puolella. Tiivistyvät kosteusmäärät lisääntyvät rakenteen ulko-osissa lämmöneristepaksuuden kasvaessa. Tämä johtuu ulko-osien viilenemisestä, koska lämpövirta rakenteen läpi pienenee.

Lämmöneristeen sisäpinnan ja betonisen sisäkuoren välisessä rajapinnassa ei havaittu millään tutkitulla rakenteella homeen kasvua. Kriittisin kohta homeen kasvun ja kosteuden kondensoitumisen kannalta oli kaikissa tutkituissa rakenteissa lämmöneristeen ja rappauksen välinen rajapinta.

Vantaan ilmasto osoittautui kaikissa tutkituissa rakenteissa Jokioisen ilmastoa kriittisemmäksi niin homehtumisen kuin kondensoitumisenkin kannalta katsottuna.

Ohutrappaus 1

Ehjä, vesitiivis silikonihartsipinnoite estää sadeveden siirtymisen kapillaarisesti rakenteen sisäosiin. Lämmöneristeen ulkopintaan tiivistyy talvikautena 70–220 g/m² kosteutta riippuen käytetystä lämmöneristeestä ja rakenteen U-arvosta (kuva 6.1.20). Kosteuden kondenssimäärät lisääntyvät eristepaksuuden kasvaessa ja tulevaisuudessa ilmaston muututtua kosteammaksi ja sateisemmaksi.



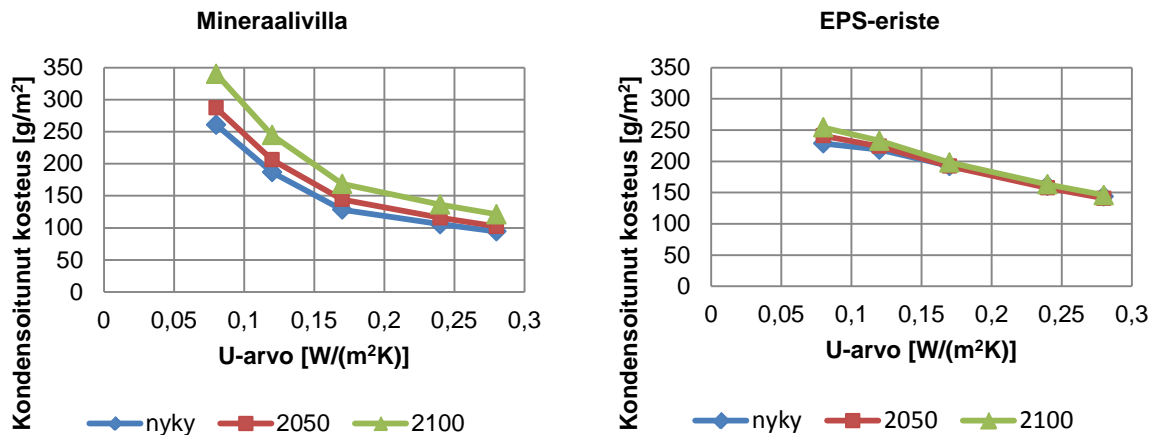
Kuva 6.1.20 *Tiivistyneet kosteusmäärät lämmöneristeen ulkopinnassa Vantaan ilmastossa, kun lämmöneristeenä käytetään mineraalivillaa (vasen kuva) tai EPS-eristettä (oikea kuva) ja pinnoitteena ohutrappaus 1.*

EPS-eristettä käytettäessä lämmöneristeen ja sisäkuoren rajapinnassa ei esiintynyt kosteuden kondensoitumista. Kun lämmöneristeeksi vaihdettiin mineraalivillaa, sisäkuoren ulkopintaan tiivistyi kosteutta maksimissaan 35 g/m². DIN 4108-3 (1981) standardin mukaan kapillaariselle rakennusmateriaalille sallittu tiivistyvä kosteusmäärä on 1000 g/m², ennen kuin kosteudesta on haittaa rakenteelle. Laskennasta saadut kosteusmäärät alittavat tämän arvon, eivätkä siten ole betonirakenteelle kriittisiä.

Oletettu ilmastonmuutos kasvattaa jonkin verran rakenteen homeindeksin arvoa, mutta ei mahdollista ehjässä rakenteessa homeen kasvua. Eristepaksuuden kasvattamisella ei havaittu olevan vaikutusta rakenteessa vallitsevaan homeindeksin arvoon, kun eristeen pinnassa oli ohut 1-järjestelmän mukainen ohutrappaus.

Ohutrappaus 2

Hiertopinnoitteella päällystetty sementtirappaus toimii kosteusteknisesti lähes samalla tavoin kuin ohutrappaus 1. Tämä johtuu siitä, että sementtilaasti muodostaa jo yksinään riittävän vesitiiviin pinnan. Lämmöneristeen ulkopintaan tiivistyy talviaikana kosteutta 95–340 g/m² rakenteen U-arvosta ja lämmöneristeestä riippuen (ks. kuva 6.1.21). Passiivitason rakenteella (0,08 W/(m²K)) tiivistyvä vesimäärä on mineraalivillaeristeellä noin 40 % suurempi kuin EPS-eristettä käytettäessä.

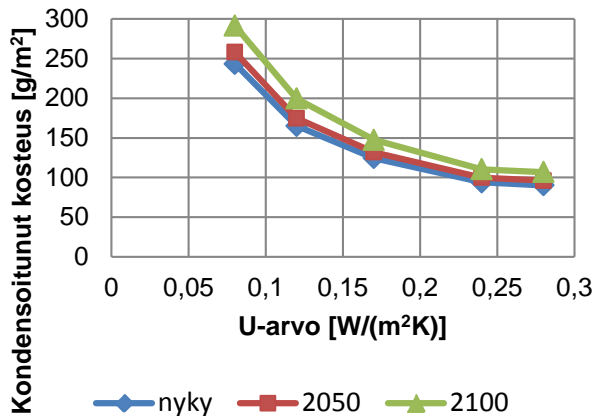


Kuva 6.1.21 Tiivistyneet kosteusmäärät lämmöneristeen ulkopinnassa Vantaan ilmastossa, kun lämmöneristeenä käytetään mineraalivillaa (vasen kuva) tai EPS-eristettä (oikea kuva) ja pinnoitteena ohutrappausta 2.

Mineraalivillaeristeen sisäpinnassa havaittiin tiivistynyttä kosteutta maksimissaan noin 25 g/m². EPS-eristettä käytettäessä lämmöneristeen ja sisäkuoren välisessä rajapinnassa ei havaittu kosteuden tiivistymistä. Käyttötilanteen tarkasteluissa ohut 2-järjestelmän mukaiset rakenteet olivat toimivia, eikä niissä esiintynyt homeen kasvua.

Paksurappaus 1

Paksurappaus 1 on ns. moderni paksurappaus (ks. taulukko 6.1.6), jonka ulkopinnassa käytetään sadevedelle tiivistä silikonihartsipinnoitetta. Lämmöneristeen ja rappauksen rajapintaan tiivistyy tällä rappausjärjestelmällä talvikautena 30–290 g/m² kosteutta (ks. kuva 6.1.22).

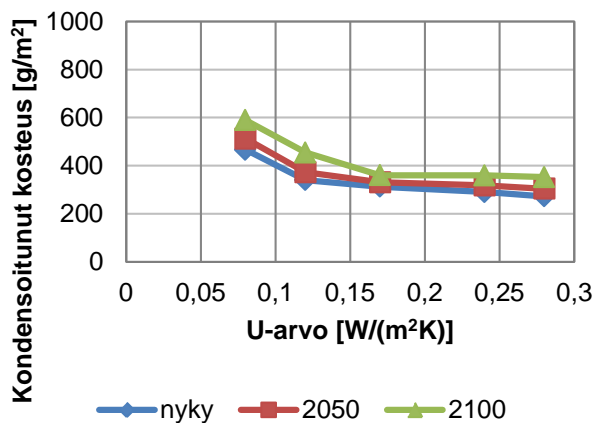


Kuva 6.1.22 Tiivistyneet kosteusmäärät lämmöneristeen ulkopinnassa Vantaan ilmastossa, kun lämmöneristeenä käytetään mineraalivillaa ja pinnoitteena paksurappausta 1.

Lämmöneristeen sisäpinnassa kondenssimäärät ovat vähäisiä, maksimissaan noin 10 g/m^2 . Rakenteen sisäosiin ei muodostu modernia paksurappausta käytettäessä homeen kasvulle otollisia olosuhteita.

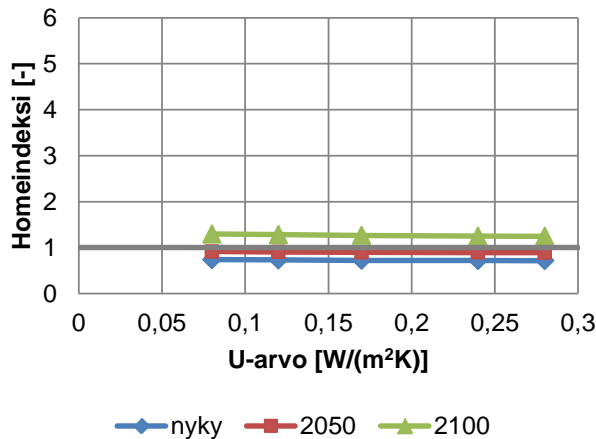
Paksurappaus 2

Perinteinen kalkkisementtilaasteilla päällystetty eristerapattu betoniseinä on nopeasti kastuva ja kuivuva rakenne. Huokoinen kalkkisementtilaasti imee tehokkaasti sadevettä, jonka takia ulkopinnassa havaitaankin tällä rappausjärjestelmällä suurimmat tiivistyvät kosteusmäärät. Lämmöneristeen ulkopintaan kondensoituu paksu 2-järjestelmää (ks. taulukko 6.1.6) käytettäessä maksimissaan noin 590 g/m^2 kosteutta (ks. kuva 6.1.23).



Kuva 6.1.23 Tiivistyneet kosteusmäärät lämmöneristeen ulkopinnassa Vantaan ilmastossa, kun lämmöneristeenä käytetään mineraalivillaa ja pinnoitteena paksurappausta 2.

Rakenteen sisäosiin tiivistyvät kosteusmäärät ovat tällä rakenteella tutkituista rakenteista suurimpia. Sisäpuolisen betonikuoren ja lämmöneristeen rajapinnassa havaitaan tiivistynyttä kosteutta maksimissaan noin 150 g/m^2 . Perinteinen paksurapattu rakenne on kriittisin myös homeen kasvun kannalta. Vuoden 2100 ilmastossa lämmöneristeen ulkopinnassa havaitaan mikroskooppista homeen kasvua (kuva 6.1.24). Nykyilmastossa ja vuoden 2050 ilmastossa homeindeksin maksimiarvo on myös hyvin lähellä homeen kasvun raja-arvoa 1,0.



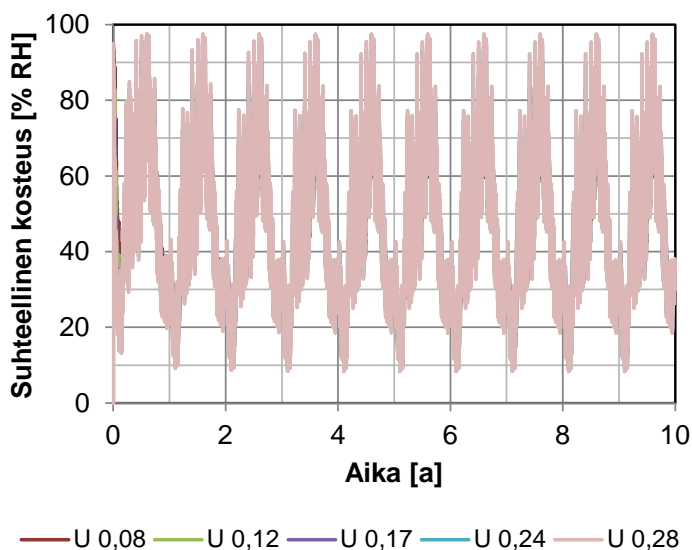
Kuva 6.1.24 Homeindeksin maksimiarvo lämmöneristeen ulkopinnassa käytettäessä paksurappausjärjestelmää 2 ja lämmöneristeenä mineraalivillaa.

Rakennusaikaisen kosteuden kuivuminen

Rappausjärjestelmän ja lämmöneristeen vaikutus

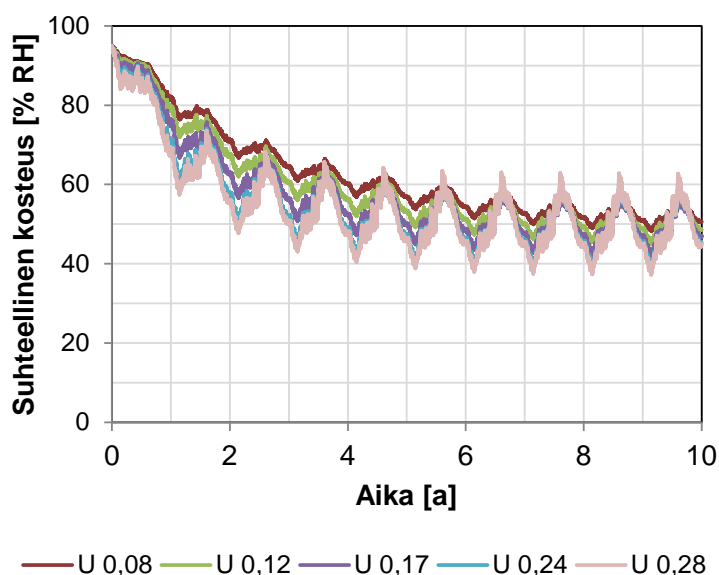
Rakennusaikaisen kosteuden kuivumista tutkittiin lämmöneristeen sisäpinnan ja betonisen sisäkuoren välisessä rajapinnassa nykyilmastossa. Kuivumistarkasteluissa kriittisemmäksi ilmastoksi osoittautui Vantaa 2007, jossa sademäärä on suuri. Laskentatarkasteluissa ei otettu huomioon betonin hydratoitumiseen sitoutuvaa kosteutta. Laskennassa käytetty betonikuoren alkukosteus (95 % RH) vastasi tyypillistä kosteutta työmaalle toimitetuissa ja asennetuissa elementeissä. Laskenta-aika oli kuivumistarkasteluissa 10 vuotta. Tehty tarkastelu edusti rakenteelle erityisen kriittistä olosuhdetta, koska samat kriittiset olosuhteet toistuivat ulkoilmassa kaikkina peräkkäisinä laskentavuosina.

Kaikilla tutkituilla rappausjärjestelmillä suhteellinen kosteus vaihtelee lämmöneristeen sisäpinnassa samalla tavalla. Suurimmat vaikutukset rakenteen kuivumiskäyttäytymiseen on lämmöneristeen vesihöyrynvastuksella. Mineraalivillassa suhteellisen kosteuden vaihtelut ovat huomattavasti suurempia kuin EPS-eristeessä. Avohuokoinen lämmöneriste reagoi nopeasti rajapinnoissa tapahtuviin kosteusmuutoksiin. Kuvasta 6.1.25 nähdään, että sateisena kesäaikana diffuusiovirran suunta on kohti rakenteen sisäosia, jolloin suhteellinen kosteus nousee mineraalivillan sisäpinnassa korkealle. Pakkaskautena sade tulee lumena ja se ei kastele samalla tavalla julkisivupintaa kuin lämpimänä kautena, jolloin kosteuspotentiaali on sisältä ulospäin ja suhteellinen kosteus pysyy mineraalivillan sisäpinnassa matalalla tasolla. Mineraalivillan suuresta vesihöyrynläpäisevyydestä johtuen lämmöneristepaksuudella ei ole vaikutusta eristeen sisäpinnassa vallitseviin suhteellisiin kosteuksiin. Korkean alkukosteuden (95 % RH) vaikutus näkyy RH-kuvaajassa vain muutamana ensimmäisenä kuukautena laskennan alkuhetkestä. Tämän jälkeen kosteusvaihtelu on rakenteessa hyvin samankaltaista kaikkina tarkasteltuina vuosina.



Kuva 6.1.25 Suhteellinen kosteus mineraalivillaeristeen sisäpinnassa Vantaan 2007 ilmastossa, kun ulkopinnassa käytetään ohutrappausta 1.

EPS-eristettä käytettäessä sisäpinta reagoi ulkoilman kosteuteen ja saderasitukseen selvästi hitaammin kuin mineraalivillaa käytettäessä. Tämä johtuu EPS-eristeen suuremmasta vesihöyrynvastuksesta. Kuvasta 6.1.26 voidaan havaita, että paksuimmilla eristeillä kosteusmuutokset ovat hitaampia, jolloin suhteellinen kosteus ei ehdi laskea samalle tasolle talviaikana kuin ohuempia eristeitä käytettäessä. Ylimääräinen kosteus poistuu sisäkuoresta noin viiden vuoden aikana, jonka jälkeen rakenne saavuttaa tasapainon ympäristönsä kanssa. Rakenteen saavutettua tasapainokosteuden lämmöneristeen sisäpinnassa tapahtuvat kosteusmuutokset riippuvat ainoastaan ympäristössä tapahtuvista muutoksista.



Kuva 6.1.26 Suhteellinen kosteus EPS-eristeen sisäpinnassa Vantaan 2007 ilmastossa, kun ulkopinnassa käytetään ohutrappausta 1.

Käytetyllä rappauspinnon tyypillä tai ilmastonmuutoksella ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta rakenteen kuivumiskäyttäytymiseen lämmöneristeen ja betonikuoren välisessä rajapinnassa.

Betonin vaikutus

Kapillaarinen kosteudenliike pienentää tehokkaasti rajapinnoissa esiintyneitä kondenssimääriä. Betonilaadulla K4 lämmöneristeen ja rappausten rajapinnassa havaittiin tyypillisesti noin 100 g/m^2 vähemmän tiivistynyttä kosteutta talviaikana kuin tiiviimpää betonilaatua K3 käytettäessä. Tiiviissä betonissa hallitsevana kosteudensiirtymismuotona on diffuusiolla siirtyvä kosteus, jolloin myös rakenteen kuivumisajat ovat selvästi pidempiä. Esimerkiksi EPS-eristettä käytettäessä ylimääräinen rakennekosteus poistui betonista K4 noin vuodessa, kun taas tiiviissä betonissa K3 ylimääräisen rakennekosteuden poistumiseen kului noin viisi vuotta.

Yhteenveto laskentatuloksista

Tutkitut rakenteet toimivat kosteusteknisesti hyvin riippumatta käytetystä lämmöneristetyypistä. Lämmöneristeen paksuuden muuttaminen lisäsi rappausten sisäpintaan kondensoituvan kosteuden määrää, kun rakenteita tarkasteltiin käyttötilanteessa. Myös ilmastonmuutos lisäsi tutkittujen rakenteiden kondenssimääriä ja jonkin verran myös homeindeksien maksimiarvoja, mutta varsin monessa tapauksessa erot eri ilmasto- ja rakenteiden välillä olivat hyvin pieniä. Mineraalivillaa käytettäessä lämmöneristeen ulkopintaan kondensoituneet kosteusmäärät olivat suurempia kuin EPS-eristettä käytettäessä, mikä selittyi lämmöneristeiden erilaisella vesihöyrynvastuksella. Kaikissa tutkituissa rakenteissa kondenssimäärät olivat kuitenkin niin pieniä, että ne eivät vaikuttaneet merkittävästi rakenteen kosteustekniseen toimintaan. Homeindeksin maksimiarvot pysyivät selvästi alle 1,0 kaikissa muissa tarkastelluissa rakenteissa paitsi paksurappausjärjestelmässä 2 (ks. taulukko 6.1.6), jossa se kohosi maksimissaan arvoon 1,3 vuoden 2100 ilmastossa. Lämmöneristeen sisäpinnalla ei ilmennyt merkittävää kondenssia eikä homeenkasvua.

Kun tarkastellaan rakennusaikaisen kosteuden poistumista, on eri lämmöneristeiden välillä enemmän eroja kuin käyttötilan tarkasteluissa. Mineraalivillaa käytettäessä eristeen sisäpinta seuraa nopeammin sisä- ja ulko-olosuhteiden muutosta kuin EPS-eristettä käytettäessä. Mineraalivillan osalta tutkittujen rakenteiden tulokset eivät juuri muuttuneet lisättäessä lämmöneristepaksuutta tai vaihdettaessa betonin materiaaliarvoja. Mineraalivillalla eristetty rakenne pääsi kuivumaan tehokkaasti diffuusiolla molempiin suuntiin, johtuen hyvin vesihöyryä läpäisevästä avohuokoisesta lämmöneristeestä.

Kun lämmöneristeeksi vaihdettiin EPS-eriste, betonin materiaaliominaisuudet vaikuttivat enemmän tuloksiin. Betonin kapillaarisilla ominaisuuksilla näytti olevan erityisen suuri vaikutus tutkittujen rakenteiden kuivumisaikaan. Paljon kapillaarihuokosia sisältävä betoni kykeni siirtämään tehokkaasti suuria määriä kosteutta rakenteen sisäpintaan, josta

ylimääräinen kosteus myös kuivui nopeasti huoneilmaan. Vähemmän kapilaarista betonia käytettäessä kuivumisaika oli oleellisesti pidempi, koska tällöin rakenteen kuivuminen tapahtui pääasiassa diffuusiolla. Diffuusiolla tapahtuvassa kosteuden siirtymisessä betonin ulkopuolisen vesihöyrynvastuksen (EPS-eristeen) merkitys korostui. Ilmastonmuutoksella ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta tutkittujen rakenteiden kuivumiskäyttäytymiseen.

Betonirakenteisessa eristerapatusta seinässä sisäpinnan kuivuminen pinnoituskosteuteen tapahtuu samalla tavoin kuin betonisandwich-rakenteessa (ks. kuva 6.1.15), joten tätä tarkastelua ei tehty uudestaan eristerappausrakenteella.

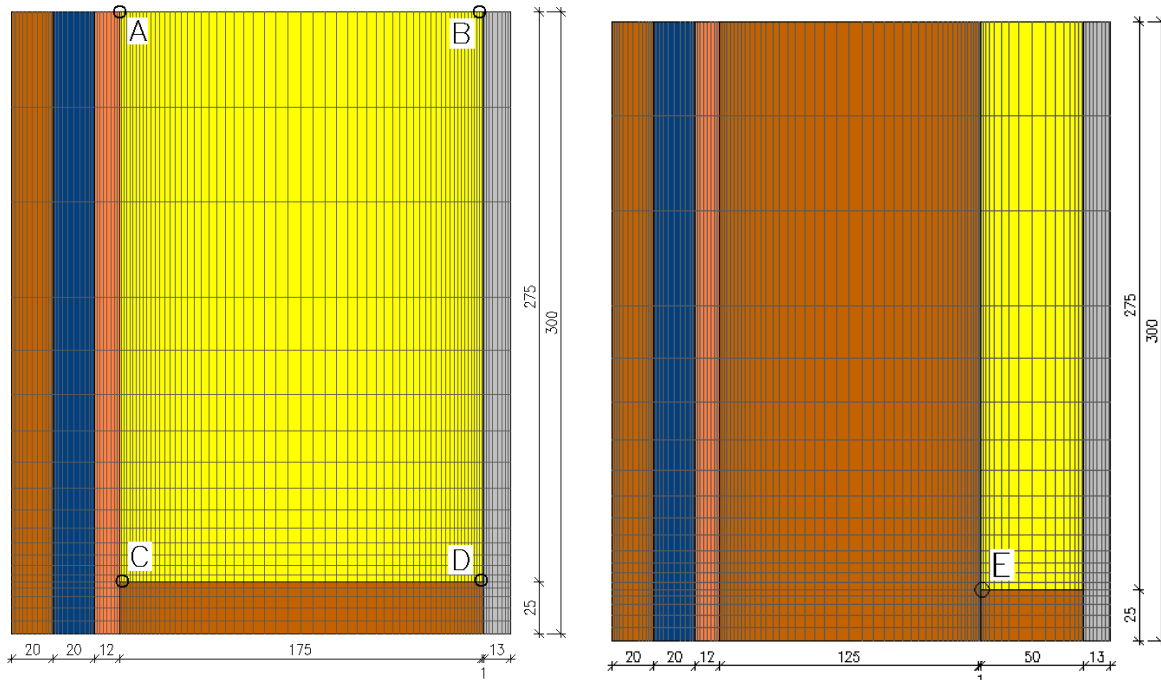
Tuloksia tarkasteltaessa on otettava huomioon että tarkastellut rakenteet olivat ideaalisia, jolloin rakennusvirheistä tai muista syistä johtuvat muutokset käytännön rakenteessa aiheuttavat poikkeavuuksia myös niiden kosteusteknisessä toiminnassa.

6.2 Rankarakenteiset ulkoseinät

6.2.1 Yleistä

Rankarakenteinen ulkoseinä koostuu runkotolpista, niiden väliin asennettavasta lämmöneristeestä sekä ulko- ja sisäverhouksesta. Tämän tyyppinen ulkoseinärakenne on käytetyin ratkaisu pien- ja rivitaloissa Suomessa.

Rankarakenteisten ulkoseinien lämpö- ja kosteustekniset laskelmat suoritettiin numeerisesti epästationäärisessä tilanteessa, käyttäen laskennassa WUFI-1D ja -2D -ohjelmia. Laskennassa käytetty differenssiverkko oli tiheimmillään materiaalien rajapinnoissa, joissa sen leveys oli pienimmillään noin 2 mm. Rakennemalli oli 300 mm korkea, joka vastasi 600 mm runkotolppajaolla toteutettua ulkoseinärakennetta (kuva 6.2.1).



Kuva 6.2.1 Esimerkit laskentamalleista ja tarkastelupisteistä lämmöneristeen kohdalta (vasen puoli) ja pystyrungon kohdalta (oikea puoli).

Kuvassa 6.2.1 on esitetty laskennassa käytetyt tarkastelupisteet lämmöneristeen ulko- ja sisäpinnassa (A, B), puurungon ulko- ja sisäpinnassa (C, D) sekä sisäpuolisen koolauksen ulkopinnassa puurungon kohdalla (E). Näissä tarkastelupisteissä lämpötila- ja kosteusmuutokset olivat suurimmillaan. Ulkoverhouksen ja sisemmän seinärakenteen välissä käytettiin tuuletusväliä. Tuuletusvälissä otettiin huomioon pystysuuntaisen ilmavirtauksen vaikutus siten, että ilmanvaihtuvuuden arvona käytettiin eteläpuoleisissa tiiliverhotuissa ulkoseinissä 10 vaihtoa tunnissa ja pohjoispuoleisissa puu- ja levyverhotuissa ulkoseinissä 500 vaihtoa tunnissa. Poikkeuksena oli eristerapattu rankaseinä, joka oli tuulettumaton rakenne.

Puu- ja paneeliverhousien lämpökapasiteetti on pieni, jolloin julkisivu jäähtyy merkittävästi pilvettöminä öinä. Ulkoverhoukseen varautunut lämpöenergia säteilee infrapunasäteilynä (pitkääaltoisena ulkosäteilynä) taivaalle laskien samalla rakenteen lämpötilaa. Tämän takia näissä rakenteissa käytettiin todellista suurempaa ilmanvaihtuvuutta, jolla pyrittiin ottamaan huomioon ulkopinnan ja ympäristön välisen säteilytaseen viilentävää vaikutusta.

Tiiviysvaatimuksen (RakMK C2 1998) takia kaikissa seinärakenteissa oli ilmasulku rakenteen sisäpinnalla. Vesihöyryn liikettä vastustava ilmansulku toimi rakenteessa myös höyrynsulkuna. Verhouslevynä käytettiin sisäpinnassa pinnoittamatonta 13 mm paksua kipsikartonkilevyä. Sisäpuolisten pinnoitteiden ja tapettien vaikutusta kosteuden ja lämmön siirtymisessä ei otettu huomioon.

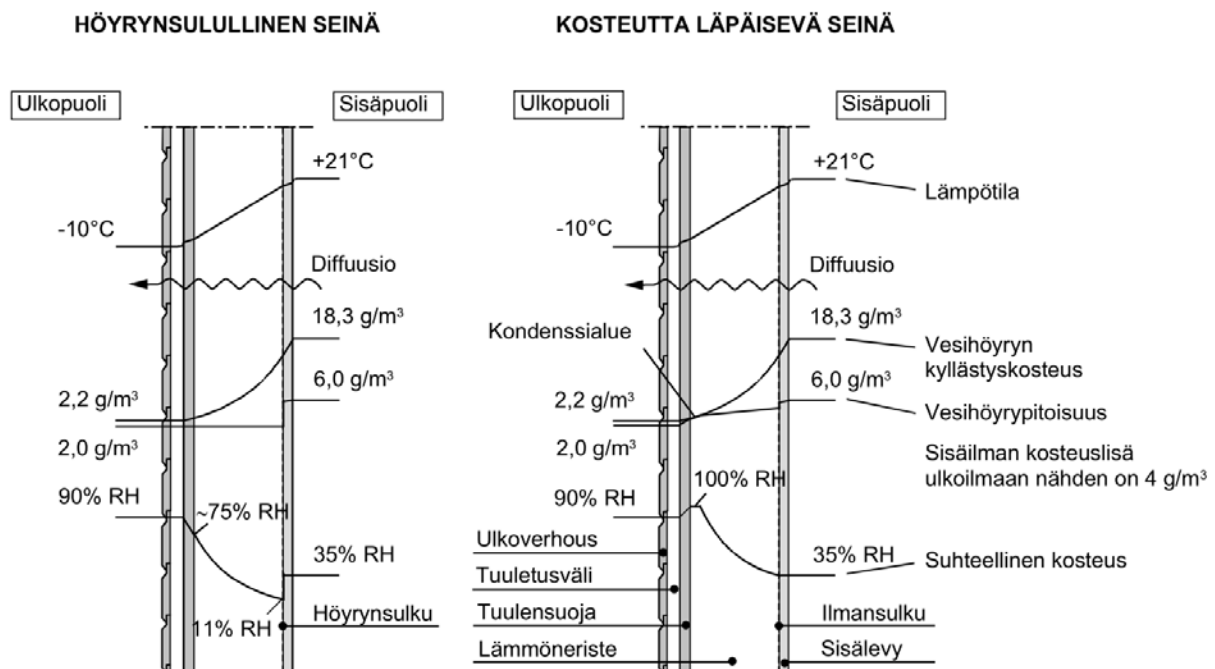
Sisäpuolisena koolauksena tutkittiin $50 \times 50 \text{ mm}^2$ rimoitusta 600 mm jaolla sekä pysty- että vaakasuunnassa. Rimojen väliin oli sijoitettu 50 mm vahvuinen lasivillaeriste (D1, ks. liite 1),

joka oli avohuokoisena ja kosteutta läpäisevänä eristeenä kriittisin höyrinsulun toiminnan kannalta. Tarkempi erittely laskennassa käytetyistä lähtöarvoista ja tuloksista on esitetty lähteessä Mäkitalo (2012).

Ulkoilman olosuhteina käytettiin puuverhotuissa rankaseinissä Jokioisen testivuotta ja tiiliverhotuissa rankaseinissä Vantaan testivuotta (ks. luku 3.2.1). Sisäilman kosteuskuormituksen oli laskennassa ulkoilman lämpötilasta riippuva kosteuslisän mitoitussarvo kosteusluokassa 2 (ks. kuva 3.2.2). Sisäilman lämpötila oli vakio 21 °C koko laskentajakson aikana.

6.2.2 Puu- ja levyverhotut rankaseinät

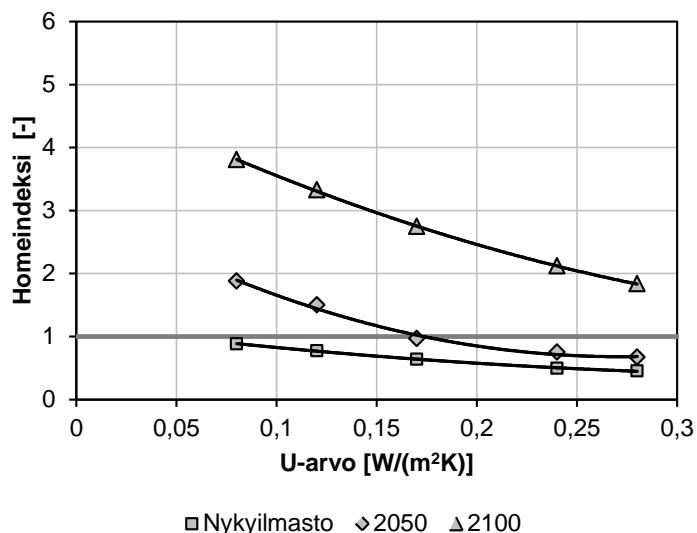
Kosteuden siirtymisuurta on lämmitetyissä puu- ja levyverhotuissa seinärakenteissa pääsääntöisesti sisältä ulospäin. Tämä johtuu sisäilman ulkoilmaa suuremmasta vesihöyrypitoisuudesta ja ulkoverhouksen sateenpitävyydestä, jolloin vesihöyrypitoisuuden potentiaaliero ulospäin on myös suurempi. Vesihöyrypitoisuuden tasaantumisenopeus riippuu avohuokoisella lämmöneristeellä eristetyissä ulkoseinissä pääasiassa sisäpinnan vesihöyrynvastuksesta, koska lämmöneristeen vesihöyrynvastus on pieni. Vesihöyryä läpäisevässä seinärakenteessa kosteus kondensoituu seinärakenteen ulko-osiin, jos tuleva kosteusmäärä on suurempi kuin huokosilman lämpötilaa vastaava kyllästyskosteus lämmöneristeen kylmällä puolella (kuva 6.2.2). Kondenssi- ja homehtumisriskin välttämiseksi rakenteen sisäpinnassa tarvitaan aina riittävän vesihöyrynvastuksen omaava höyrinsulku.



Kuva 6.2.2 Periaate höyrinsulullisen ja kosteutta läpäisevän rankarakenteisen ulkoseinän kosteusteknisestä toiminnasta talviolosuhteissa. (Vinha 2007)

Sisäilmasta diffuusiolla siirtyvän kosteuden haittavaikutuksia estetään parhaiten käyttämällä lämmöneristeen lämpimällä puolella höyrönsulkumuovia. Tiiviin höyrönsulun käyttö rakenteen sisäpinnassa on myös tehokkain tapa pienentää ulkoseinän ulko-osan kosteus- ja homevaurioriskiä. Höyrönsulkumuovia voidaan käyttää sekä puukuitu- että mineraalivillaeristeisissä seinissä. Vesihöyryä vastustavaa sisäpintaa ei voida korvata hygroskooppisella lämmöneristeellä, vaikka se hidastaakin rakenteen kostumista syys- ja talviolosuhteiden aikana. Hygroskooppinen lämmöneriste ei pysty estämään rakenteen kondensoitumis- tai homehtumisriskiä, jos sisäpinnan vesihöyrynvastus ei ole riittävä. (Mäkitalo 2012)

Tuulensuojan pieni lämmönvastus nostaa seinärakenteen ulko-osan suhteellista kosteutta talvijaksolla. Huonosti eristävä tuulensuoja on myös erityisen kriittinen tulevaisuudessa lisääntyvien sateiden ja korkeamman ulkoilman suhteellisen kosteuden seurauksena. Diffuusioavoimen tuulensuojakalvon käyttö kasvattaa rakenteen homehtumisriskiä selvästi jo vuoden 2050 ilmastossa (kuva 6.2.3).



Kuva 6.2.3 Homeen kasvu runkotolpan ulkopinnassa (HHL1) puuverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään diffuusioavoimaa tuulensuojakalvoa (Mäkitalo 2012).

Tuulensuojan lämmönvastusta parantamalla voidaan vaikuttaa merkittävästi ulkoseinän kosteustekniseen toimivuuteen. Lämpöä eristävä tuulensuoja nostaa lämpötilaa runkotolpan ulkopinnassa, jolloin huokosilman suhteellinen kosteus laskee ja olosuhteet muuttuvat homeille epäsuotuisammiksi. Mineraalivillatuulensuojan lämmönvastuksen tulisi olla vähintään $0,4 \text{ m}^2\text{K/W}$, jotta rakenne toimisi kosteusteknisesti hyvin myös tulevaisuuden ilmastoissa. Tuulensuojan hyvä lämmönvastus ei ole kuitenkaan yksistään riittävä, vaan seinärakenteen sisäpinnan tulee olla myös riittävän diffuusiotiivis.

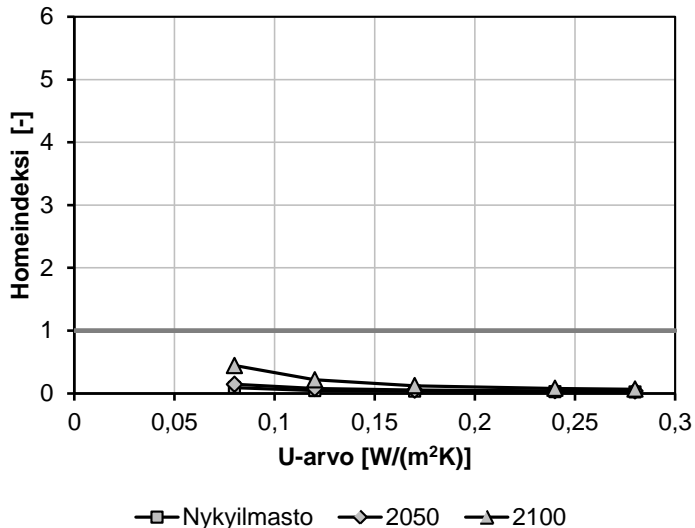
Kosteutta sitova tuulensuojalevy hidastaa rakenteen kostumista samalla tavoin kuin hygroskooppinen lämmöneriste. Kevätolosuhteissa vaikutus on päinvastainen, mutta keväällä ilmasto-olosuhteet eivät ole homeen kasvun kannalta yhtä kriittisiä kuin syysolosuhteiden aikana. Hygroskooppisella tuulensuojalla on rakenteen kosteusteknistä toimintaa parantava

vaikutus siirryttäessä syksystä talviolosuhteisiin, jolloin huokosilman suhteellinen kosteus nousee seinän ulko-osissa. Tuulensuojan hygroskooppisuudella voidaan pienentää tuulensuojalta vaadittavaa lämmönvastusta. Hygroskooppisen tuulensuojan lämmönvastuksen tulisi olla pääsääntöisesti kuitenkin vähintään $0,2 \text{ m}^2\text{K/W}$, jotta homeen kasvua ei vuoden 2100 ilmastossa esiintyisi. Tällaiseksi rakenteeksi riittää esimerkiksi 12 mm paksu huokoinen puukuitulevy.

Vanerirakenteen toimintaa tuulensuojana tutkittiin homehtumisherkkyyssluokassa HHL2 (ks. taulukko 3.2.5). Laskentatapauksissa sisäpuolisella höyrynsulkumuovilla varustettu havuvanerirakenne toimi hyvin, eivätkä homeindeksit ylittäneet homeen kasvun raja-arvoa ($M_{\max} < 1$) myöskään tulevaisuuden ilmastoissa. Kentällä tehdyt havainnot yläpohjarakenteista (Laamanen 2012) ovat kuitenkin osoittaneet, että vaneri on ollut useissa tapauksissa herkempi homehtumaan kuin samoissa olosuhteissa ollut sahatavara, joka luokitellaan homehtumisherkkyyssluokkaan HHL1. Laboratoriokokeissa (Viitanen & Ojanen 2007) on myös tehty havaintoja, että havuvaneri käyttäytyy vakio-olosuhteissa samalla tavoin kuin muut puupohjaiset levyt, mutta on vaihtelevissa olosuhteissa selvästi herkempi homehtumaan. Tämä johtuu materiaalissa olevan kosteuden kertymisestä liiman vaikutuksesta pintaviiluun. Näiden havaintojen perusteella homesuojaamaton vaneri tuleeekin lisäeristää ulkopuolelta, jos sitä halutaan käyttää ulkoseinärakenteissa tuulensuojana.

Lämmöneristeen paksuuden kasvattaminen pienentää rakenteen läpi tapahtuvia lämpöhäviöitä ja nostaa samalla suhteellista kosteutta rakenteen ulko-osissa. Tämä heikentää seinärakenteen kosteusteknistä toimivuutta ja lisää home- ja kondenssiriskiä rakenteen kylmissä osissa. Vähäisetkin kosteusvuodot vaikuttavat haitallisesti hyvin lämmöneristetyn rakenteen toimivuuteen, koska matala lämpövirta rakenteen läpi ei enää kykene pitämään rakennetta kuivana.

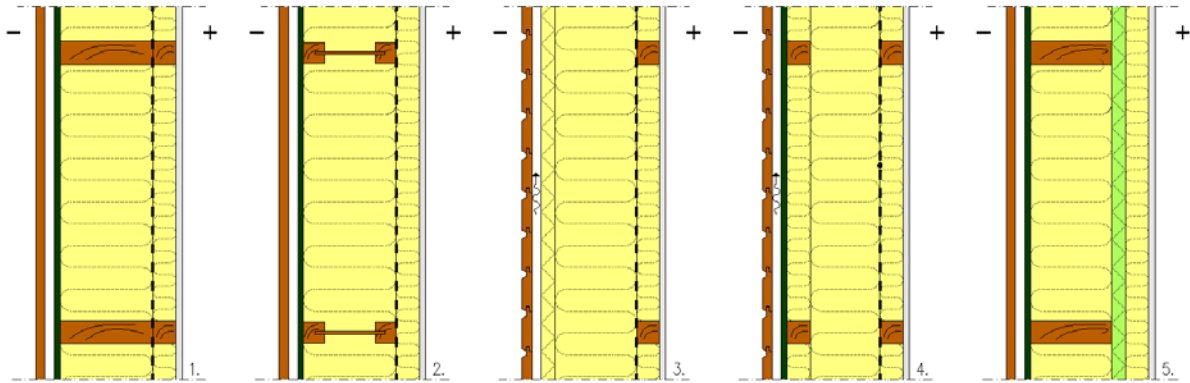
Hyvin vesihöyryä läpäisevän lämmöneristeen (esim. mineraalivillalevyn) käyttö homehtumisherkan tuulensuojalevyn ulkopinnassa nostaa rakenteen lämpötilaa, jolloin suhteellinen kosteus laskee tuulensuojalevyssä. Tällä on vaikutusta ulkoseinän homehtumisriskiin erityisesti syysolosuhteiden aikana, jolloin ulkoilman suhteellinen kosteus on jo itsessään korkea. Talviolosuhteissa lämpötilan nousu näkyy tuulensuojan kuivumiskyvyn paranemisena, jolloin se pysyy pitkään veden jäätymispisteen yläpuolella ja kuivuminen nopeutuu. Kuvasta 6.2.4 voidaan havaita, että lämmöneristeen käyttö rakenteen ulkopinnassa torjuu tehokkaasti homeen kasvun esimerkiksi levyjäykisteenä yleisesti käytetyssä kipsikartonkilevyssä vuoden 2100 ilmastossa.



Kuva 6.2.4 Homeen kasvu lämmöneristeiden ulkopinnassa puuverhotussa rankaseinässä, kun tuulensuojana käytetään 9 mm paksua tuulensuojakipsilevyä ja 30 mm paksua mineraalivillalevyä (A1+A3). (Mäkitalo 2012)

Puurunkoisissa ulkoseinissä höyrynsulku asennetaan ilmatiiviysvaatimuksen takia usein 50 mm syvyyteen seinärakenteen sisäpinnasta, jotta sähköasennukset voidaan tehdä höyrynsulkua rikkomatta. Kriittisin kohta kosteuden kondensoitumisen ja homeen kasvun kannalta on tällaisessa rakenteessa runkotolpan alueella, jossa kylmäsiirtavaikutus on suurimmillaan. Puurunko laskee lämpötilaa höyrynsulun kohdalla, jolloin materiaalin huokosilman suhteellinen kosteus kasvaa. Tämä lisää rakenteen homehtumis- ja kondensoitumisriskiä. Homeen kasvu höyrynsulun sisäpinnassa voidaan välttää parhaiten jättämällä lämmöneriste kokonaan pois höyrynsulun sisäpuolelta tai käyttämällä höyrynsulun sisäpuolella pystysuuntaista koolausta kantavia runkotolppia vasten. Sisäpuolinen pystykoolausta toimii kaikissa nykymääräysten (RakMK D3 2012) mukaisissa ja passiivitason ulkoseinissä tuulensuojasta, sen lämmöneristävyydestä ja ulkoilman olosuhteista riippumatta (Mäkitalo 2012).

Käytettäessä sisäpuolista vaakakoolausta vuoden 2050 ilmastossa tuulensuojan lämmönvastuksen tulee olla hygroskooppista tuulensuojaa käytettäessä vähintään 0,2 W/(m²K) ja ei-hygroskooppisella tuulensuojalla vähintään 0,4 W/(m²K), jotta homeen kasvulle otollisia olosuhteita ei esiintyisi höyrynsulun sisäpuolella. Vuoden 2100 ilmastossa vain hyvin lämpöä eristävä mineraalivillatuulensuoja ($R_{sh} \geq 0,8 \text{ m}^2\text{K/W}$) tai vähintään 50 mm paksu pystyrungon ulkopuolinen ristikoolausta ja lämmöneristys estävät homeen kasvun höyrynsulun sisäpuolella pystyrungon kohdalla. Runkotolpan ulkopuolelle tuleva lisälämmöneristys nostaa lämpötilaa ja laskee suhteellista kosteutta höyrynsulun kohdalla parantaen rakenteen kosteusteknistä toimivuutta. Vaihtoehtoisesti rungon kylmäsiirtavaikutuksen katkaisemiseksi voidaan sisäpinnassa käyttää höyrynsulkuna solumuovieristettä, jonka lämmönvastus on vähintään 0,8 m²K/W. Myös kuitulevyumainen runkotolppa (kuva 6.2.5) tai eriytetty runko (kaksoisrunko) vähentävät runkotolppien kylmäsiirtavaikutuksesta aiheutuvaa homehtumisriskiä.



Kuva 6.2.5 Kosteusteknisesti toimivia puurunkorakenteita, joissa käytetään sisäpuolista koolausta: 1 sisäpuolinen pystykoolaus, 2 kuitulevyumainen runkotolppa, 3 sisäpuolinen vaakakoolaus ja tuulensuojamineraalivilla, 4 sisä- ja ulkopuolinen ristikoolaus ja 5 sisäpuolinen vaakakoolattu rakenne, jossa höyrynsulkuna käytetään solumuovieristettä. Kaikissa rakenteissa on lämpöä eristävä tuulensuoja. Rakenteet 3 ja 4 on kuvattu sivulta päin ja muut rakenteet ylhäältä päin.

Paksuilla lämmöneristeillä muodostuu usein taloudellisemmaksi rakenteeksi ristikoolattu ulkoseinä, jolloin seinässä voidaan käyttää kantavana pystyrunkona läpimitaltaan pienempää puutavaraa. Höyrynsulun sijainti syvällä rakenteessa lisää kuitenkin kosteuden kondensoitumis- ja homeutumisriskiä rakenteen sisäosissa. Laskentatulosten mukaan sisäpuolista ristikoolausta käytettäessä noin 2/3 lämmöneristeestä tulisi sijaita höyrynsulun ulkopuolella vuoden 2050 ilmastossa. Vastaava arvo vuoden 2100 ilmastossa on noin 3/4. Rakenteen lisäeristys on suositeltavaa tehdä aina höyrynsulun ulkopuolelle.

Vaakasuuntaista koolausta käytettäessä höyrynsulun sisäpintaan tiivistyvät kosteusmäärät ovat tuulensuojasta riippuen 0–21 g/m² vuodessa, kun rakenteen U-arvo on $\leq 0,17$ W/(m²K) (Mäkitalo 2012). Edellä mainittu kondensoituneen kosteuden määrä ei ole suuri ja kriittisemmäksi tekijäksi muodostuukin sisäpuolisen puukoolauksen homeindeksi ja sen pysyminen tasolla, jossa homeetta ei esiinny ($M_{\max} < 1$). Tiloissa, joissa sisäilman kosteus on normaalia huoneilman kosteutta suurempi, tulisi lämmöneriste jättää höyrynsulun sisäpuolelta pois, jotta home- ja kosteusvaurion riskiltä vältyttäisiin. Myös suurta kosteusrasitusta aiheuttavat työvaiheet (esimerkiksi lattialaatan valu) tulisi tehdä ennen sisäpuolisen lämmöneristeen asentamista.

Rakenteen kuivumisen kannalta tärkein ominaisuus on tuulensuojan vesihöyrynvastus. Pieni vesihöyrynvastus parantaa rakenteen kuivumiskykyä, mutta se voi myös aiheuttaa kosteuden kerääntymistä rakenteeseen syys- ja talvijaksoilla, mikäli tuulensuojan lämmönvastus ei ole riittävän suuri (Mäkitalo 2012). Suuri tuulensuojan vesihöyrynvastus taas estää tehokkaasti rakenteen kostumista ulkoilman olosuhteiden vaikutuksesta, mutta hidastaa sen kuivumista. Ulkoseinän kuivumiskyky on erityisen tärkeä rakentamisen jälkeisessä tilanteessa, kun ylimääräinen alkukosteus pyrkii poistumaan rakennusmateriaaleista. Myös yllättävissä kosteusvuototilanteissa rakenteilla on oltava riittävästi kuivumiskykyä. Tuulensuojalta sallittava suurin vesihöyrynvastus riippuu sen lämmönvastuksesta. Tuulensuojan vesihöyrynvastuksen kasvaessa suuremmaksi kuin $1,2 \times 10^9$ m²sPa/kg (9×10^3 s/m) rakenteen

kuivumiskyky heikkenee selvästi. Tuulensuojan vesihöyrynvastuksen suositeltava enimmäisarvo on kuitenkin alhaisempi, $0,68 \times 10^9 \text{ m}^2 \text{ sPa/kg}$ ($5 \times 10^3 \text{ s/m}$), jotta sisäosista diffuusiolla siirtyvä kosteus ei haitallisesti kerääntyisi tuulensuojalevyn sisäpintaan (Mäkitalo 2012).

Sisäilman kosteuslisä on suurin talviaikana ja se pyrkii tasoittumaan diffuusiolla ulkoilmaan (ks. kuva 6.2.2). Jos seinärakenteen sisäpinnan vesihöyrynvastus ei ole riittävä, kosteutta voi siirtyä haitallisessa määrin rakenteen ulko-osiin, mikä voi johtaa kosteuden kondensoitumiseen tai homeen kasvuun. Valitusta tuulensuojasta riippuen rakenteelta vaadittava sisäpinnan ja tuulensuojan välinen vesihöyrynvastuksien suhde vaihtelee välillä 1–40:1. Suomen rakentamismääräyskokoelmassa esitetty vastussuhde, 5:1 (RakMK C2 1998), ei ole riittävä vuoden 2100 ilmastossa rakenteissa, joissa tuulensuojan lämmönvastus R_{sh} on pienempi kuin $0,8 \text{ m}^2 \text{ K/W}$. Näissä rakenteissa vaaditaan seinärakenteelta huomattavasti suurempaa vesihöyrynvastussuhdetta. Taulukossa 6.2.1 on esitetty vaaditut sisä- ja ulkopinnan väliset vesihöyrynvastussuhteet ja sisäpinnalta vaaditut vesihöyrynvastuksen minimiarvot vuosien 2050 ja 2100 ilmastoissa.

Taulukko 6.2.1 Sisäpinnan vesihöyrynvastuksen ($Z_{p,i}$) ja sisä- ja ulkopinnan välisen vesihöyrynvastussuhteen (Z_i/Z_e) vaaditut minimiarvot puurunkoisissa ulkoseinissä vuosien 2050 ja 2100 ilmastoissa, kun sisäilman kosteuslisä on talviaikana 5 g/m^3 ja kesäaikana 2 g/m^3 .

Tuulensuoja	Lämmöneriste							
	Ei-hygroskoopinen				Hygroskoopinen			
	Z_i/Z_e		$Z_{p,i} \times 10^8$		Z_i/Z_e		$Z_{p,i} \times 10^8$	
	[-]		[$\text{m}^2 \text{ sPa/kg}$]		[-]		[$\text{m}^2 \text{ sPa/kg}$]	
	2050	2100	2050	2100	2050	2100	2050	2100
Mineraalivillalevy 30 mm (A3)	1:1	2:1	0,2	3,4	1:1	1:1	~0	1,8
Huokoinen puukuitulevy 12 mm (A13)	5:1	38:1	17,8	128	2:1	40:1	5,1	134
Huokoinen puukuitulevy 25 mm (A2)	2:1	10:1	12,6	60,1	1:1	9:1	5,6	55,3
Havuvaneri 9 mm (A11)	4:1	10:1	80,6	178	3:1	8:1	57,4	150
Tuulensuojakipsilevy 9 mm (A1)	15:1	Ei hyv.	54,7	Ei hyv.	3:1	Ei hyv.	10,9	Ei hyv.
Havuvaneri 9 mm (A11) + Mineraalivillalevy 30 mm (A3)	3:1	5:1	61,5	109	2:1	4:1	46,5	72,4
Kipsikartonkilevy 9 mm (A1) + Mineraalivillalevy 30 mm (A3)	1:1	5:1	6,8	28	1:1	2:1	1,6	13

Taulukosta 6.2.1 voidaan havaita, että muovitiivistyspaperit, joiden vesihöyrynvastus on $\geq 13,7 \times 10^9 \text{ m}^2 \text{ sPa/kg}$ ($130 \times 10^3 \text{ s/m}$) ovat riittävän tiiviitä höyrynsulkuja kaikissa hyväksyttävissä tapauksissa. Pelkän havuvanerituulensuojan kanssa vaadittu vesihöyrynvastus olisi suurempi, mutta kuten edellä todettiin, homesuojaamatonta vaneria ei tule käyttää tuulensuojana yksinään sen homehtumisherkkyydestä johtuen. Vesihöyryä hyvin läpäisevää bitumivuorauspaperia, jonka vesihöyrynvastus on välillä $0,5\text{--}1,0 \times 10^9 \text{ m}^2 \text{ sPa/kg}$ ($3,5\text{--}7,0 \times 10^3$

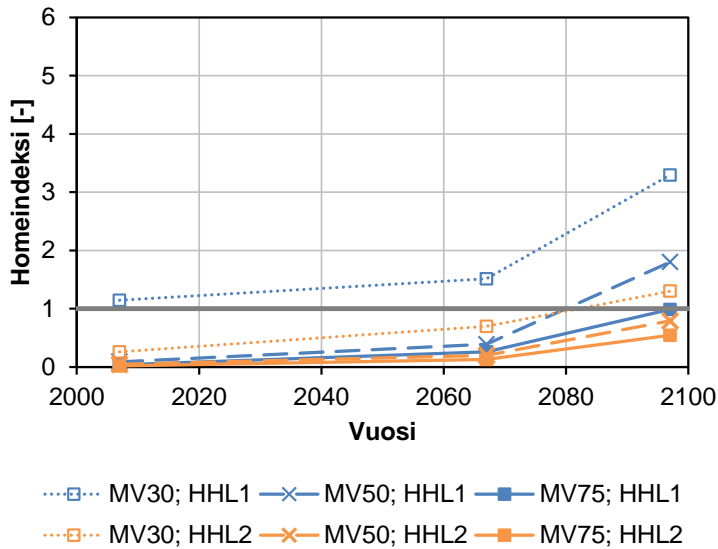
s/m), on rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta mahdollista käyttää silloin, kun tuulensuojana käytetään hyvin lämpöä eristävää ja vesihöyryä läpäisevää mineraalivillalevyä. Hygroskooppisen lämmöneristeen käytöllä voidaan yleensä pienentää seinärakenteelta vaadittavaa vesihöyrynvastussuhdetta ja sisäpinnan vesihöyrynvastusta jonkin verran.

Vesihöyryä läpäiseviä rakenteita käytettäessä sisäilman suhteellinen kosteus voi laskea merkittävästi talviaikana. Vuosina 2002–2003 tehdyissä kenttämittauksissa havaittiin, että vesihöyryä läpäisevässä vaipparakenteessa (sisäpinnassa paperi-ilmansulku) sisäilman suhteellinen kosteus oli talvijaksolla 41 % ajasta alle raja-arvon 20 % RH, kun taas vesihöyrytiivissä rakennuksissa (sisäpinnassa muovikalvo tai polyuretaanieriste) sisäilman suhteellinen kosteus oli vain 29 % talviajasta alle raja-arvon (Vinha et al. 2005a). Ihmisten on osoitettu kärsivän liian kuivassa sisäilmassa hengitysteiden limakalvojen, silmien sidekalvojen ja ihon kuivumisesta (Sisäilmayhdistys ry 2012). Kuivan sisäilman välttämiseksi vesihöyrynvastuksen tulisi olla kaikissa rakenteissa vähintään 5:1 ja rakenteesta riippuen vieläkin suurempi. Tästä syystä esimerkiksi pelkän bitumipaperin käyttö ilmansulkuna ei ole suositeltavaa missään rakenteessa, vaikka rakenteen kosteustekninen toiminta sen sallisikin.

6.2.3 Tiiliverhottu rankaseinä

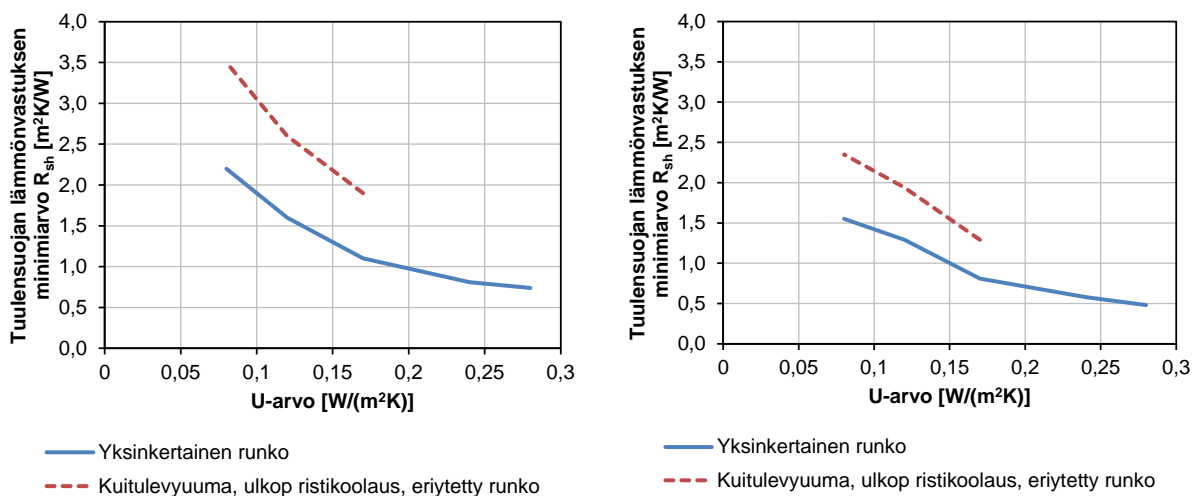
Tiili on huokoinen materiaali ja sen kapillaarinen vedenimukyky ja vedenimunopeus on suuri. Sateella ohut julkisivumuuraus voikin olla täysin vedellä kyllästynyt. Muuraukseen imeytynyt kosteus siirtyy auringonsäteilyn vaikutuksesta haihtumalla rakenteen takana olevan tuuletusvälin ilmatilaan. Vesihöyryyn pitoisuuserot rakenteen eri puolilla pyrkivät tasoittumaan seinärakenteessa siirtymällä diffuusiolla kohti rakenteen sisäosia. Kosteusvirtaa rakenteen sisäosiin tehostaa entisestään tuuletusvälin pieni ilmanvaihtuvuus. Tiiliverhotussa seinässä tuuletusvälin tulokanavat ovat pieniä ja niitä on harvassa, jolloin ilmanvaihtuvuus tuuletusvälissä on normaalien sääolosuhteiden aikana 0–40 vaihtoa tunnissa rakennuksen korkeudesta riippuen (Sandin 1991; Straube & Finch 2009; Straube et al. 2004; Mäkitalo 2012). Tiiliseinän suuren lämpökapasiteetin ja tuuletusvälissä virtaavan ilman pienen virtausnopeuden takia lämpötila nousee tuuletusvälissä kesäaikana keskimäärin 10 °C ja talviaikanakin 2 °C korkeammalle kuin ulkoilman lämpötila (Vinha 2007). Olosuhteet kuorimuuratun rakenteen tuuletusvälissä ovat jo nykyilmastossa otollisia homeen kasvulle. Ilmaston lämpeneminen ja lisääntyvä saderasitus heikentävät entisestään tiiliverhottujen rankarakenteisten ulkoseinien kosteusteknistä toimivuutta.

Matalan tiiliverhotun seinärakenteen toimintaa voidaan parantaa tuulensuojan lämmönvastusta parantamalla. Lämmönvastuksen lisääminen alentaa tuulensuojan sisäpinnan suhteellista kosteutta ja siten myös puurungon ulko-osan homehtumisriskiä. Kuvassa 6.2.6 esitetään matalan ulkoseinän ($h \leq 10$ m) runkotolpan ulkopinnan homeindeksi, kun tuulensuojana käytetään 30–75 mm mineraalivillalevyä ja eristekerroksen läpi ulottuvana runkorakenteena joko sahattua mäntyä (HHL1) tai höylättyä kuusta (HHL2).

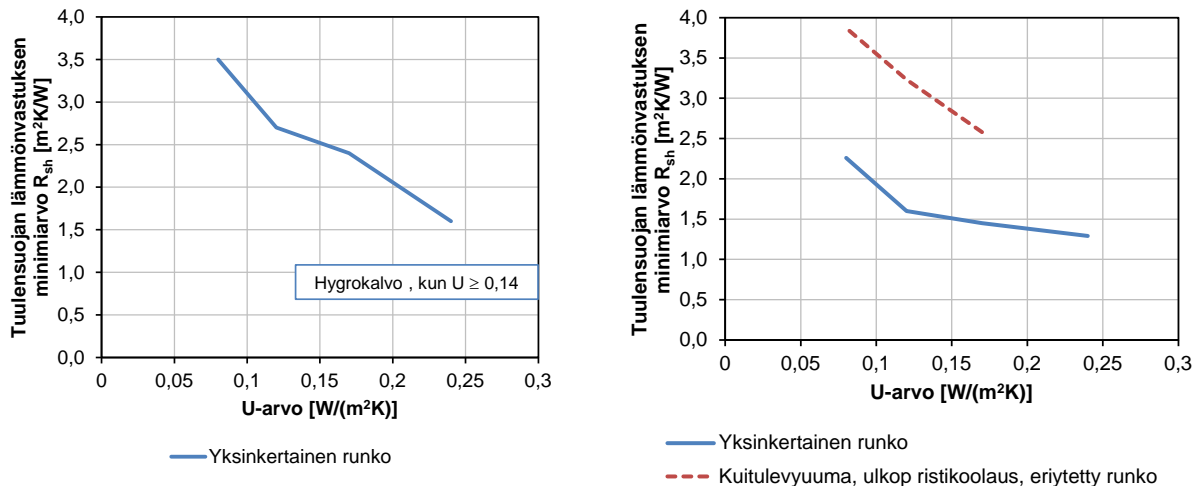


Kuva 6.2.6 Homeen kasvu runkotolpan ulkopinnassa matalassa (≤ 10 m) tiiliverhotussa rankaseinässä ($U = 0,17 \text{ W/(m}^2\text{K)}$), kun tuulensuojana käytetään mineraalivillalevyä (MV) ja/tai runkotolpan homehtumisherkeydenluokkaa (HHL) muutetaan. (Mäkitalo 2012)

Kuvasta 6.2.6 havaitaan, että matalassa tiiliverhotussa rankaseinässä homeenkasvu runkotolpan ulkopinnassa voidaan estää hyvin lämpöä eristävällä tuulensuojalla ja/tai hometta kestävämmällä runkomateriaalilla. Matalissa teräsrankaisissa tiiliverhotuissa ulkoseinissä tuulensuojan lämmönvastuksen on puolestaan oltava vähintään $0,8 \text{ m}^2\text{K/W}$, jotta homeen kasvu ei olisi mahdollinen homehtumisherkeydenluokan HHL3 mukaisen lämmöneristeen ulkopinnassa (Mäkitalo 2012). Tuulensuojalta vaadittava minimilämmönvastus riippuu rakenteen lämmöneristystasosta siten, että seinärakenteen U-arvon pienentyessä tuulensuojalta vaadittava lämmönvastus suurenee. Kuvissa 6.2.7 ja 6.2.8 on esitetty tuulensuojalta vaadittava minimilämmönvastus U-arvon funktiona matalassa kuorimuuratussa rankaseinässä ($h \leq 10$ m) vuosien 2050 ja 2100 ilmastoissa.



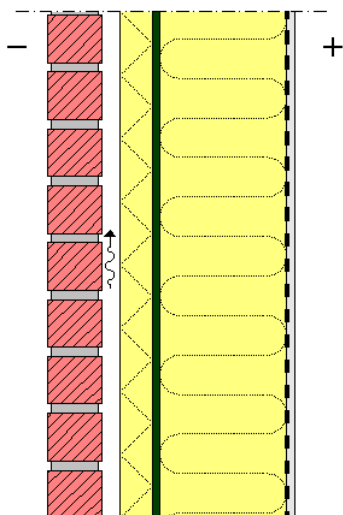
Kuva 6.2.7 Tuulensuojan lämmönvastuksen minimiarvo matalassa tiiliverhotussa rankaseinässä vuoden 2050 ilmastossa, kun runkorakenteena käytetään HHL1-luokan puutavaraa (vasen kuva) tai HHL2-luokan puutavaraa (oikea kuva).



Kuva 6.2.8 Tuulensuojan lämmönvastuksen minimiarvo matalassa tiiliverhotussa rankaseinässä vuoden 2100 ilmastossa, kun runkorakenteena käytetään HHL1-luokan puutavaraa (vasen kuva) tai HHL2-luokan puutavaraa (oikea kuva).

Eristekerroksen läpi jatkuvaa puurunkoa käyttämällä voidaan seinärakenteen tuulensuojana käyttää pienemmän lämmönvastuksen omaavaa tuulensuojaa verrattuna muunlaisiin rakenneratkaisuihin. Kuvista 6.2.7 ja 6.2.8 voidaan havaita, että esimerkiksi HHL1-luokan puurimoin ulkopuolelta ristikoolattu rakenne ei ole enää hyväksyttävissä vuoden 2100 ilmastossa. Tässä ilmastossa ulkopuolinen ristikoolaus on korvattava homehtumista kestävämmällä materiaalilla, esimerkiksi höylätyllä kuusella (HHL2) tai käyttämällä ulkopuolisena koolauksena teräsrankaa. Runkotolpan ulkopuolinen lämmöneriste voidaan teräsrankaa käytettäessä laskea mukaan tuulensuojalta vaadittavaan lämmönvastukseen.

Puuelementtiteollisuudessa puurunkoisten ulkoseinien jäykistys vaakavoimille toteutetaan yleensä sijoittamalla runkorakenteen ulkopintaan jäykistävä tuulensuojalevy. Jäykistäviä rakennuslevyjä voidaan käyttää myös tiiliverhotussa puurankaseinässä, kun levyn ulkopintaan sijoitetaan riittävä lämmöneristys (kuva 6.2.9). Tuulensuojan ulkopuolisessa mineraalivillaeristekerroksessa tuulen aiheuttama konvektio ei juuri heikennä rakenteen lämmöneristystä, jolloin ulkopuolinen eriste voidaan laskea mukaan koko ulkoseinärakenteen U-arvoon. Tuulensuojan ulkopuolinen avohuokoinen lämmöneriste parantaa myös rakenteen kuivumiskykyä talviaikana selvästi, koska tuulensuojan lämpötila pysyy pitkään jäätymisalueen yläpuolella. Ulkopuolelta eristetyn rakenteen toimivuuden edellytyksenä on kuitenkin riittävän tiiviin höyrynsulun käyttö rakenteen sisäpinnassa.



Kuva 6.2.9 Periaate jäykistävän levyn käytöstä tiiliverhotussa rankaseinässä. Levyn ulkopinnassa on avohuokoinen lämmöneriste.

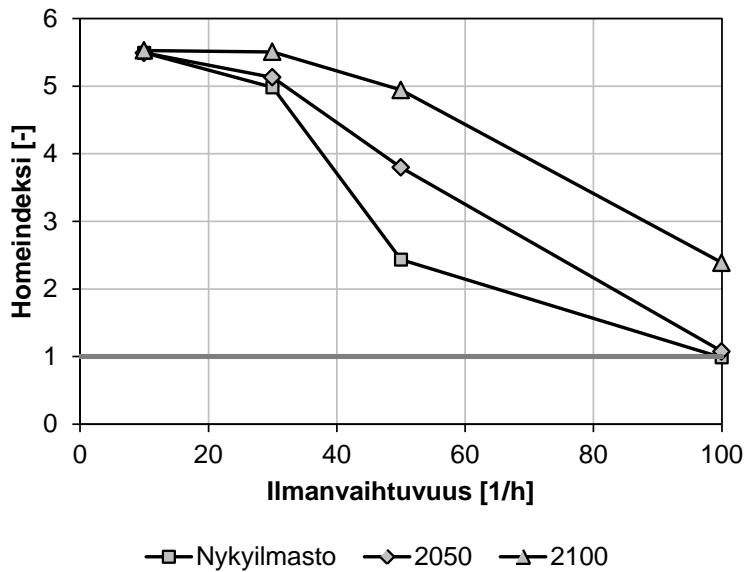
Taulukossa 6.2.2 on esitetty levyn ulkopuoliselta mineraalivillakerrokselta vaadittava lämmönvastuksen minimiarvo joillekin levyjäykistykseenä toimiville tuulensuojalevyille. Taulukosta havaitaan, että jäykistävän levyn käyttö runkorakenteen (HHL1) ja ulkopuolisen mineraalivillaeristeen välissä pienentää jonkin verran ulkopuolelta vaadittavan avohuokoisien lämmöneristeen lämmönvastusta verrattuna kuvien 6.2.7 ja 6.2.8 tapauksiin. Taulukossa 6.2.2 esitetty lämmönvastuksen minimiarvo on laskettu ulkoseinälle, jonka U-arvo on $\geq 0,12$ W/(m²K). Tätä pienemmän lämmönläpäisykertoimen (U-arvon) omaavalle seinärakenteelle lämmönvastuksen minimiarvo on vastaavasti suurempi.

Taulukko 6.2.2 Jäykistävän tuulensuojalevyn ulkopintaan sijoitettavan avohuokoisien lämmöneristeen lämmönvastuksen minimiarvo tiiliverhotussa puurunkoisessa ulkoseinässä vuosien 2050 ja 2100 ilmastoissa.

Jäykistävä tuulensuojalevy	Levyn ulkopuolisen avohuokoisien lämmöneristeen lämmönvastuksen minimiarvo R [m ² K/W]			
	Eristekerroksen läpäisevä puurunko		Muut runkoratkaisut ¹	
	2050	2100	2050	2100
Huokoinen puukuitulevy 12 mm (A3)	1,45	2,26	1,87	3,87
Huokoinen puukuitulevy 25 mm (A2)	1,03	1,94	1,61	3,07
Havuvaneri 9 mm (A11)	1,61	2,58	1,94	3,87
Tuulensuojakipsilevy 9 mm (A1)	1,94	3,07	2,58	Ei hyv.
Magnesiumoksidilevy (MgO) 8 mm (E2)	1,29	2,00	1,94	2,74
Kuitusementtilevy 6 mm (E3)	1,36	2,19	2,10	2,90

¹ Esimerkiksi ulkopuolinen ristikoolaus tai kuitulevyuomainen runkotolppa.

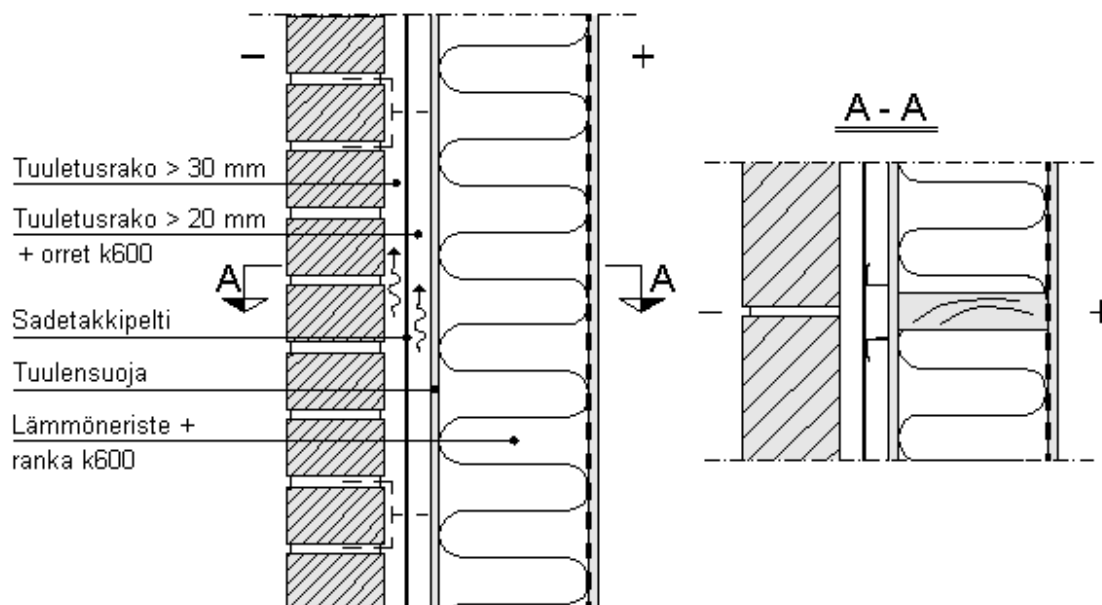
Taulukosta 6.2.2 havaitaan, että ulkopuolelta puurakenteisella ristikoolauksella ja tuulensuojakipsilevyllä varustettu tiiliverhottu rankaseinä ei ole enää hyväksyttävissä vuoden



Kuva 6.2.11 Homeen kasvu runkotolpan ulkopinnassa (HHL1) korkeassa (> 10 m) tiiliverhotussa rankaseinässä ($U = 0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$), kun tuulensuojana käytetään 100 mm paksua mineraalivillalevyä.

Korkeassa tiiliverhotussa rankaseinässä kosteusteknistä toimintaa voidaan parantaa vain seinän sisäosan kosteuskuormitusta pienentämällä. Tämä saadaan aikaan muodostamalla julkisivun taakse höyrinsulkuna toimiva rakennekerros. Kuvassa 6.2.12 on esitetty esimerkki tällaisesta rakenneratkaisusta. Tiiviinä, vettä ja vesihöyryä pidättävänä rakenteena voidaan tiiliverhotussa rankaseinässä käyttää kuumasinkittyä ohutlevyä (Raunama 2012). Levyn etu- ja takaosaan muodostetaan tuulettuva ilmakerros, joka on päistään avoinna ulkoilmaan. Tiiliverhouksen takana oleva ”sadetakkipelti” irrotetaan sisemmästä seinärakenteesta esimerkiksi pystysuuntaisin teräsorsin (ks. kuva 6.2.12). Sadetakkina toimiva rakennekerros on limitettävä siten, että julkisivun pystysaumoista sateella valuva vesi ei tunkeudu sisempään tuuletusväliin. Kuvan 6.2.12 mukaisessa ratkaisussa viistosateella julkisivun läpi tuleva kosteus poistuu ulkopuolisen tuuletusvälin kautta ulkoilmaan, eikä aiheuta lisäkosteuskuormaa sisemmälle seinärakenteelle. Sadetakkina toimiva rakennekerros toimii ulkoseinässä myös rakennusaikaisena sadesuojana.

Korkean tiiliverhotun rankaseinän toimintaa voidaan edelleen parantaa käyttämällä runkona uumareitettua termorankaa. Rakenteellisesti suojatussa tiiliverhotussa rankaseinässä tuulensuojan lämmönvastuksen on oltava vähintään $0,2 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$, samalla tavoin kuin puu- ja levyverhotuissa rankaseinissä (ks. luku 6.2.2).

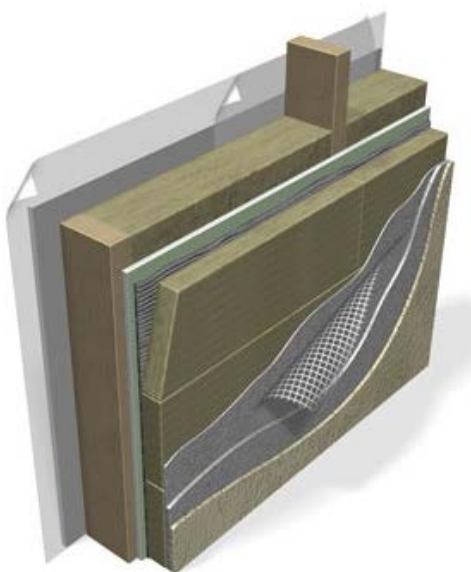


Kuva 6.2.12 Korkean tiiliverhotun puurankaseinän rakenteellinen suojaus.

6.2.4 Eriste- ja levyrapatut rankaseinät

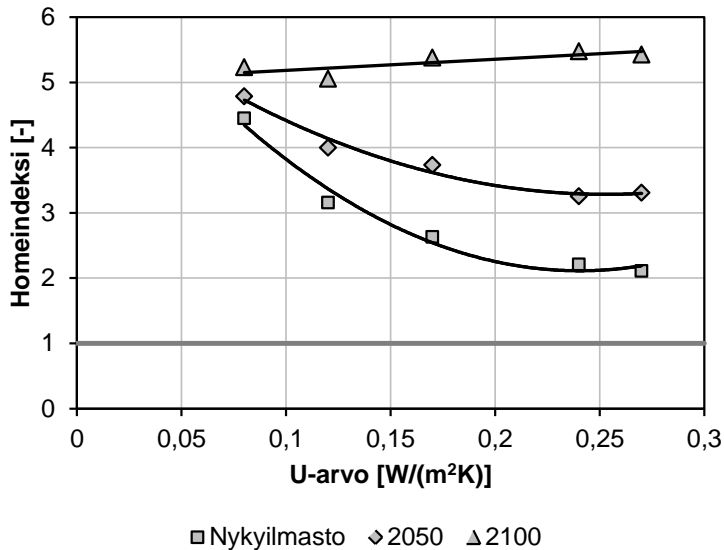
Eristerappaus

Eristerapatus rankaseinässä pystyrungon ulkopinnassa on tyypillisesti umpilaudoituus tai tuulensuojakipsilevy. Eristerappauksen alustana toimiva eristelevy kiinnitetään alustaan joko liimalaastilla ja/tai mekaanisesti eristeen läpi runkokoolaukseen (kuva 6.2.13). Eristerapatus seinässä ei ole rakenteen kuivumisen mahdollistavaa tuuletusväliä. Tässä tutkimuksessa pystyrungon ulkopinnassa käytettiin 9 mm paksua tuulensuojakipsilevyä (A1, ks. liite 1) ja sen ulkopuolella 50 mm paksua kivivillaa (D2, ks. liite 1) tai EPS 60 S-tyyppin solumuovieristettä (P3, ks. liite 1).



Kuva 6.2.13 Eristerappaus puurankaseinässä (Paroc Oy 2013).

Eristerapatun seinän pintaan tehdyllä rappausjärjestelmällä on merkittävä vaikutus ulkoseinän kosteustekniseen toimintaan. Perinteinen kalkkisementtirappaus on voimakkaasti vettä imevä ja sen kosteuskapasiteetti on suuri (Pentti & Hyypöläinen 1999). Rappauspintaan imeytynyt kosteus siirtyy auringonsäteilyn vaikutuksesta diffuusiolla rakenteen sisäosiin aiheuttaen eristerapatusta rankaseinässä homeen kasvua. Rakenteen U-arvon parantaminen kasvattaa entisestään rakenteen ulko-osan homeutumisriskiä. Runkotolpan ulkopinnassa esiintyy paksurappauksella päällystetyssä eristerapatusta rankaseinässä voimakasta homeen kasvua (kuva 6.2.14)



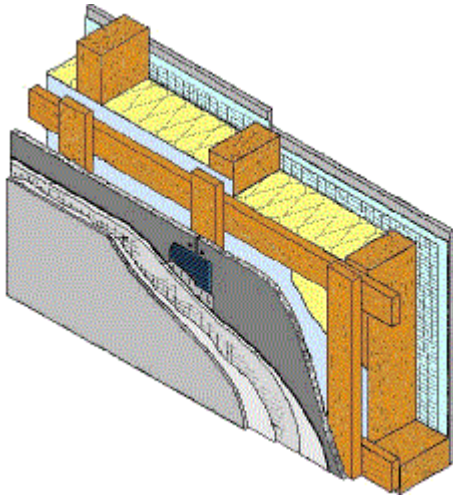
Kuva 6.2.14 Homeen kasvu runkotolpan ulkopinnassa (HHL1) korkeassa (> 10 m) eristerapatusta puurankaseinässä, kun rappauksena käytetään jalolaastilla päällystettyä paksurappausta. (Mäkitalo 2012)

Ehjä sementtisideaineisilla ohutrappauslaasteilla päällystetty pinta pidättää viistosadetta selvästi paremmin kuin kalkkisementtirappaus (Mäkitalo 2012). Eristerapatusta ohutrappauslaasteilla päällystetyssä seinässä kriittisempää on rakenteen kuivuminen mahdollisen kosteusvuodon sattuessa. Ruotsissa tehtyjen kenttätutkimuksien mukaisesti eristerapatusta rankaseinässä vahingot eivät yleensä näy ulospäin ja kosteus myös tunkeutuu herkästi rakenteen sisäosiin liitoksista tai epätiiviyistä ikkuna- ja oviliittymistä (Jansson et al. 2007). Lisäksi tiiviillä pinnoitteella tai sementtisideaineisilla laasteilla päällystettyyn rakenteeseen muodostuu viistosateen aikana vesikalvo, jolloin rakenteen sisään voi kulkeutua suuriakin määriä kosteutta epätiiviyden liitosten ja halkeamien kautta.

Solumuovieristeen käyttö rappausalustana pahentaa tilannetta entisestään, koska rakenteen ulkopinnan vesihöyrynvastus kasvaa ja siten ulkoseinän kuivuminen heikkenee. Kosteusvuodon ollessa riittävän suuri havaitaan eristerapatun rakenteen sisäosissa rappauspinnanteesta riippumatta voimakasta homeen kasvua. Rapattu pintarakenne tulisikin Suomen ilmasto-olosuhteissa erottaa sisemmästä seinän osasta kuivumisen mahdollistavalla tuuletusvälillä. (Mäkitalo 2012)

Levyrappaus

Levyrappaus on tuulettuva julkisivurakenne, jossa rappauspinnoitteen alustana toimiva levyalusta asennetaan runkorakenteeseen siten, että ilma kiertää rappauslevyn takana (kuva 6.2.15). Rappausalustana käytetään yleisesti kuitusementtipohjaista rappauslevyä, joka ohutrapataan sementtisideaineisilla rappaustuotteilla.



Kuva 6.2.15 Levyrappaus rankaseinässä (Knauf Aquapanel Outdoor 2013).

Sementtisideaineinen rappauspinnoite pidättää suurimman osan pintaan kohdistuvasta viistosateesta. Tuulettuva järjestelmä sallii pinnoitteessa myös pieniä halkeamia, koska julkisivurakenteen läpi pääsevä kosteus kuivuu tuuletustilassa eikä imeydy suoraan sisempään seinärakenteeseen. Homeindeksi pysyy levyrapatuissa rankaseinissä samalla tasolla kuin puuverhotuissa rankaseinissä. Tuulensuojan lämmönvastuksen vähimmäisarvo on $0,2 \text{ m}^2\text{K/W}$ samalla tavoin kuin puu- ja levyverhotuissa rankaseinissä (ks. luku 6.2.2).

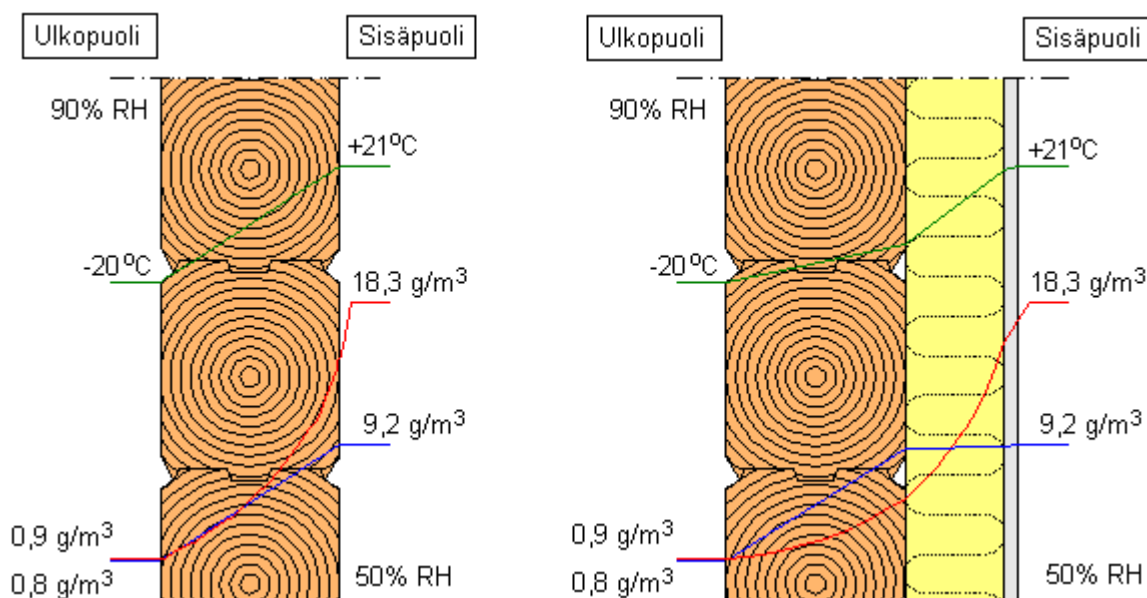
Levyrapattu, tuuletusvälillä varustettu seinärakenne toimii selvästi eristerapattua rankaseinää paremmin. Ylimääräinen rakenteessa oleva kosteus poistuu lyhyessä ajassa ja seinärakenteessa havaitaan kosteusvauriutilanteessa suurillakin kosteuspitoisuuksilla vain lievää, mikroskoopilla havaittavaa homeen kasvua. Kosteusvaurioriski on tällä rakenteella myös selvästi pienempi, koska erillinen ulkoverhous suojaa sisempää seinän osaa kastumiselta.

6.3 Sisäpuolelta lisäeristetyt massiivirakenteiset ulkoseinät

6.3.1 Yleistä

Massiivirakenteella tarkoitetaan rakennetta, joka koostuu vain yhdestä rakennekerroksesta. Näin ollen sama materiaali toimii siinä sekä kantavana että lämmöneristävänä rakenteena. Massiivirakenteita on tehty Suomessa hirrestä, kevytbetonista ja kevytsoraharkoista sekä aiempina vuosina tiilistä.

Massiivirakenteiden huonona puolena pidetään sen heikkoa lämmöneristyskykyä. Ratkaisuna onkin lämmöneristeen lisääminen massiivirakenteen sisä- tai ulkopintaan. Suositeltavin ja kosteusteknisesti varmin ratkaisu on lisäeristää massiivirakenne aina ulkopuolelta hyvin vesihöyryä läpäisevällä avohuokoisella lämmöneristeellä ja jättää ulkoverhouksen taakse tuuletusväli samalla tavoin kuin puurunkorakenteissa. Tällöin joudutaan kuitenkin peittämään alkuperäinen julkisivu. Tämän takia hirsirakennuksissa käytetäänkin hyvin usein sisäpuolista eristystä. Hyvin vesihöyryä läpäisevän lämmöneristekerroksen lisääminen massiivirakenteen sisäpintaan muuttaa rakenteen kosteuskäyttäytymistä selvästi, koska lämpötilan muutos tapahtuu suurimmaksi osaksi eristeessä ja vesihöyrypitoisuuden muutos massiivirakenteessa (ks. kuva 6.3.1). Tämä mahdollistaa kosteuden kondensoitumisen eristeen ulkopintaan ja homeen kasvun lämmöneristeen ja massiivirakenteen rajapinnassa, jos sisäpinnan vesihöyrynvastus ei ole riittävä.



Kuva 6.3.1 Periaate eristämättömän ja sisäpuolelta vesihöyryä läpäisevän lisäeristetyin massiivirakenteen toiminnasta talviolosuhteissa. Punainen käyrä kuvaa lämpötilasta riippuvaa kyllästyskosteuspitoisuutta ja sininen käyrä rakenteessa vallitsevaa vesihöyrypitoisuutta.

Massiivirakenteiden osalta FRAME-hankkeessa tarkasteltiin sisäpuolelta lisälämmöneristettyjä hirsi- ja kevytbetoniseiniä. Tarkastelupisteinä oli massiivirakenteen ja lämmöneristeen rajapinta, jossa esiintyi rakenteen toiminnan kannalta kriittisimmät olosuhteet. Rakenteen sisäpinnan höyrynsululle määritettiin vaaditut vesihöyrynvastukset, joilla rakenteen sisäosissa ei esiintynyt homeen kasvua tai kosteuden kondensoitumista. Laskelmissa käytettiin WUFI-1D ja -2D -ohjelmia. Laskentamallien toteutus tehtiin samalla periaatteella kuin on aiemmin esitetty puurunkoisten rankaseiniin yhteydessä luvussa 6.2.1. Ulkoilman olosuhteina käytettiin yleensä Jokioisen testivuotia, mutta saderasituksen vaikutusta tarkasteltiin myös vantaan testivuotia. Sisäilman kosteuskuormituksen oli laskennassa ulkoilman lämpötilasta riippuva kosteuslisän mitoitusarvo kosteusluokassa 2 (ks.

kuva 3.2.2). Sisäilman lämpötila oli vakio 21 °C koko laskentajakson aikana. Tarkempi erittely laskennassa käytetyistä lähtöarvoista ja tuloksista löytyy lähteestä Nurmi (2012).

6.3.2 Sisäpuolelta lisäeristetty hirsiseinä

Laskennassa tarkasteltiin kahta hirsipaksuutta, 92 ja 180 mm, joissa sisäpuolisena lämmöneristeenä käytettiin lasivillaa (D1, ks. liite 1) ja puukuitueristettä (D4, ks. liite 1). 92 mm hirsi otettiin mukaan tyypillisenä kesäasuntorakenteena. Solumuovieristeitä ei tutkittu, koska niiden käyttö saattaa aiheuttaa ongelmia heikon muodonmuutoskykynsä takia, kun hirsirakenne painuu. Kaikissa käyttötilanteen tarkasteluissa sisäpinnassa oli pinnoittamaton 13 mm paksu kipsikartonkilevy (C1, ks. liite 1).

Toiminta käyttötilanteessa

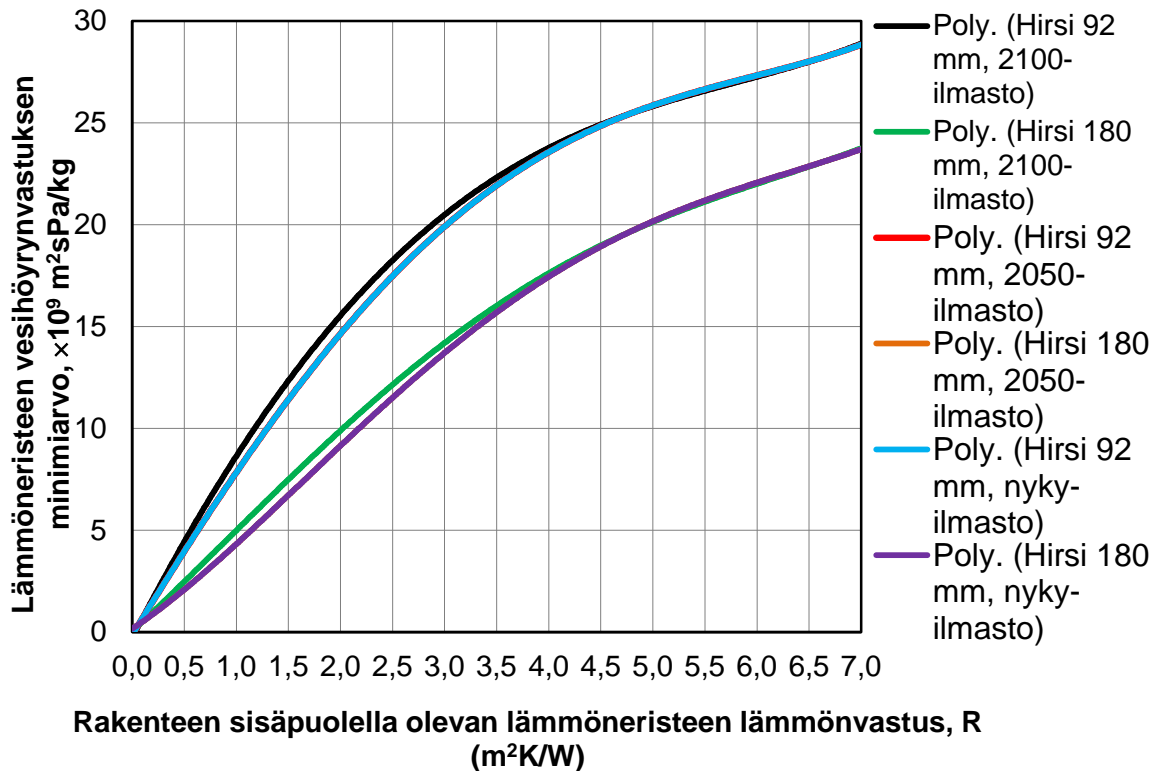
Laskentatuloksista oli havaittavissa, että vesihöyryä läpäisevän lämmöneristekerroksen paksuuden kasvattaminen lisää rakenteen kriittisyyttä, koska tällöin lämpötila eristeen ulkopinnassa laskee. Ilman vesihöyrypitoisuudessa ei tapahdu lämmöneristeen alueella merkittävää muutosta, joka johtaa korkeampaan suhteelliseen kosteuteen ja näin ollen myös voimakkaampaan homeen kasvuun eristeen ulko-osissa. Sisäpinnan vesihöyrynvastuksen kasvattaminen parantaa rakenteen toimintaa, koska se pienentää diffuusiolla sisäosiin siirtyvän vesihöyryn määrää.

Hirsipaksuuden ohentuessa menetetään osa rakenteen lämmönvastuksesta, minkä seurauksena hirren ja lämmöneristeen rajapinnan lämpötila laskee. Muutos on suurimmillaan, kun lämmöneristepaksuus on pieni eli tapauksessa, jossa hirsi muodostaa merkittävän osan koko rakenteen lämmönvastuksesta. Lämpötilan laskiessa suhteellinen kosteus nousee. Tästä syystä hirsipaksuuden pienentäminen vaatii suuremman vesihöyrynvastuksen sisäpuolella käytetyltä höyrynsulkukalvolta (kuva 6.3.2). Kuvasta 6.3.2 voidaan myös havaita, että ennustetulla ilmastonmuutoksella ei ole merkittävää vaikutusta sisäpinnalta vaadittavan vesihöyrynvastuksen minimiarvoon.

Käyttötilassa tarkasteltiin myös rakennetta, jossa hirren ja lämmöneristeen väliin oli lisätty pystysuuntaiset tuuletusurat. Urat mallinnettiin 1-ulotteiseen ohjelmaan vastaavalla tavalla kuin betonisandwich-rakenteen tapauksessa (ks. luku 6.1.2). Lämmöneristeen uritus pienensi homeindeksin maksimiarvoja kaikissa tapauksissa. Homeindeksin maksimiarvot laskivat tyypillisesti noin 20–40 % verrattuna vastaavaan tuuletusurattomaan rakenteeseen.

Tuuletusuritetulla lämmöneristeellä ja sisäpuolista hygrokalvoa (F1, ks. liite 1) käyttämällä voidaan nykyilmaston olosuhteissa käyttää maksimissaan 150 mm paksua mineraalivillaeristettä tai 125 mm:n puukuitueristettä, jotta hirren sisäpintaan ei synny homehtumisriskiä. Tulevaisuuden ilmastossa hygrokalvon käyttö rajoittuu vain 50 mm paksuun lisäeristykseen. (Nurmi 2012). Tuuletusurien koon kasvattaminen ja ilmanvaihtokertoimen suurentaminen lisäävät kuivumista, jolloin homeen kasvu vähenee. Tuuletusuritetussa rakenteessa on kuitenkin aina käytettävä sisäpinnassa riittävän

vesihöyrynvastuksen omaavaa höyrynsulkukalvoa, jotta hirren sisäpintaan ei synny homehtumisriskiä. Tuuletusuritetussa rakenteessa sisäpuolisen kalvon vesihöyrynvastus tulisi olla vähintään $19,6 \times 10^9 \text{ m}^2 \text{ sPa/kg}$ ($Z_v = 14,3 \times 10^4 \text{ s/m}$), jotta 180 mm hirsirakenne toimisi vielä noin 400 mm paksulla sisäpuolisella lisäeristeellä.



Kuva 6.3.2 Sisäpinnan vesihöyrynvastuksen minimiarvo lämmöneristepaksuuden funktiona, kun hirsirakenteen paksuus on 180 mm tai 92 mm.

Rakenteen kuivumistarkastelut

Vastavalmistuneessa hirsirakenteessa hirsien kosteuspitoisuus on usein huomattavasti rakenteen tasapainokosteutta suurempi. Kun hirren sisäpintaan asetetaan lämmöneriste ja höyrynsulkukalvo, kuivuminen sisäänpäin hidastuu tai jopa estyy kokonaan.

Kosteaa hirsirakenne

Kosteassa hirsirakenteessa kosteuslähteinä ovat hirrestä kuivuva kosteus ja sisäilmasta diffuusiolla siirtyvä kosteus. Rakennetta muutettiin käyttötilan tarkasteluihin verrattuna siten, että kipsilevy korvattiin 20 mm paksulla mäntypaneelilla, jonka alkukosteuspitoisuus oli 65 % RH. Tämä tehtiin siitä syystä, että mäntypaneeli on hirsirakenteissa enemmän käytetty sisäverhousmateriaali ja sen vesihöyrynvastus on kipsilevyä suurempi. Sisäpinnan suurempi vesihöyrynvastus estää tehokkaammin sisäilman kosteuden siirtymistä rakenteeseen ja sillä on vaikutusta lisäeristetyn hirsirakenteen toimintaan varsinkin vesihöyryä enemmän läpäiseviä kalvoja käytettäessä. Hirren ja lämmöneristeen alkukosteuspitoisuus vastasivat kosteassa rakenteessa 85 % RH:ta vastaavaa suhteellista kosteutta.

Kostean sisäpuolelta lisäeristetyin hirsirakenteen kuivuminen oli hidasta kaikilla tutkituilla höyrynsulkukalvoilla. Homeindeksi oli tarkastelupisteessä $> 1,0$ kahden ensimmäisen vuoden aikana jo pienillä eristepaksuuksilla (30–60 mm) riippumatta höyrynsulkukalvon vesihöyrynvastuksesta (Nurmi 2012).

Osittain kuivunut hirsirakenne

Osittain kuivunutta hirsirakennetta tutkittiin 180 mm paksulla hirsirakenteella siten, että hirren annettiin kuivua 85 % RH:ta vastaavasta alkukosteudesta 6 kuukautta ennen sisäpuolisen lämmöneristeen ja höyrynsulun asentamista. Tässä vaiheessa hirressä vallitsi seuraavia suhteellisia kosteuksia vastaavat kosteuspitoisuudet (ulkoa sisälle päin):

- 0–140 mm: 85 % RH
- 140–160 mm: 80 % RH
- 160–170 mm: 70 % RH
- 170–180 mm: 65 % RH

Osittain kuivuneen sisäpuolelta eristetyin hirsirakenteen laskenta suoritettiin ensimmäiseltä kymmeneltä vuodelta käyttäen laskennassa avohuokoista lämmöneristettä (D1 ja D4, ks. liite 1) ja erilaisia höyrynsulkukalvoja. Tuloksista havaittiin, että läpäisevät kalvot ($Z_p < 50 \times 10^9 \text{ m}^2 \text{ sPa/kg}$) eivät toimineet edes pienillä lämmöneristyspaksuuksilla. Höyrynsulkumuovilla hirren kuivuminen oli todella hidasta. Homeindeksin maksimiarvot pysyivät alle yhdessä, mutta olivat vielä kymmenen vuoden kuluttuakin loivassa nousussa. (Nurmi 2012) Tällaista rakennetta ei voi suositella kostean hirsirakenteen sisäpinnassa, koska kahden tiiviin pinnan välissä oleva lämmöneriste ei pääse kuivumaan ja rakenne on erittäin herkkä kosteusvaurioille.

Laskentatulosten perusteella hirsirakenteen on annettava kuivua riittävästi ennen lisälämmöneristeen ja höyrynsulkukerroksen asentamista. Hirsirakenteen kosteuden tulisi olla enintään 80 % RH sisäpuolisen lisäeristyksen ja höyrynsulun asennuksen aikana, jotta homeen kasvu rakenteessa ei olisi mahdollinen.

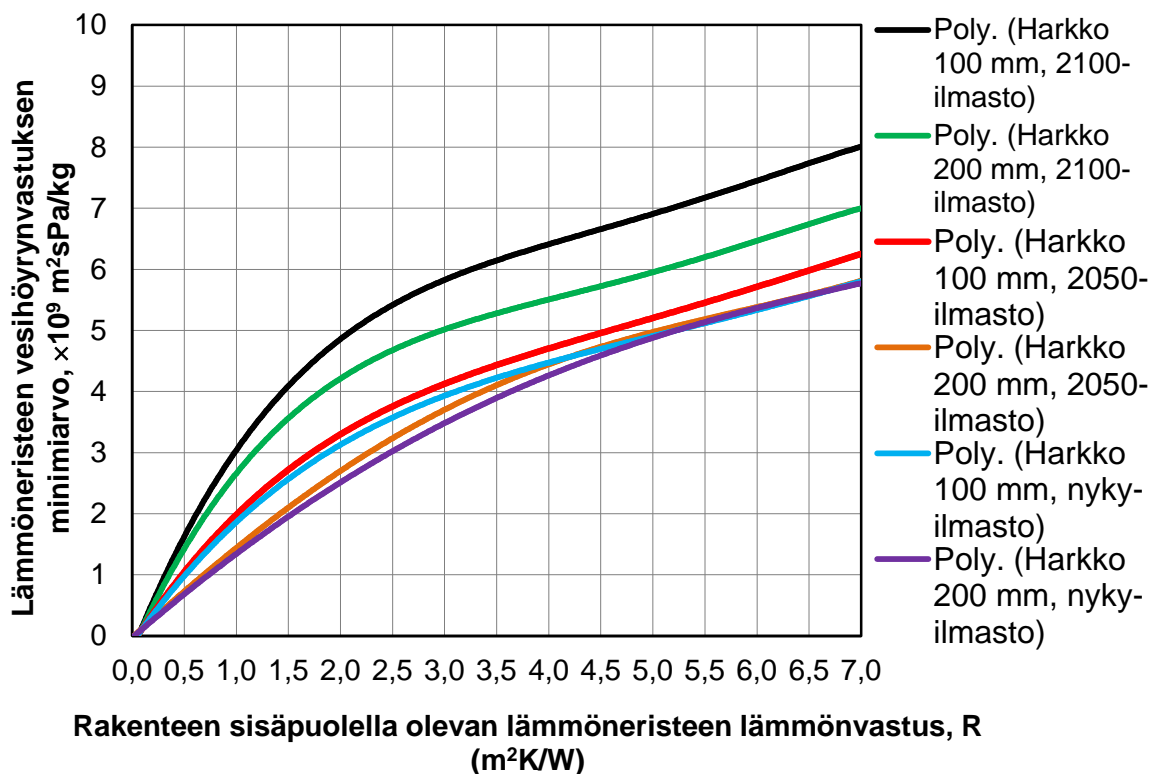
6.3.3 Sisäpuolelta lisäeristetty kevytbetoniseinä

Toiminta käyttötilanteessa

Tarkasteltavat kevytbetonirakenteet muodostuivat kolmesta eri kevytbetoniharkon paksuudesta: 100 mm, 200 mm ja 300 mm. Lämmöneristeenä käytettiin sisäpinnassa kalsiumsilikaattilevyä ja solumuovieristeitä (EPS- ja XPS-eristettä). Polyuretaani jätettiin tarkasteluista pois, koska alumiinipintaisena se muodostaa jo pienillä eristepaksuuksilla riittävän tiiviin höyrynsulkukerroksen. Lämmöneristeen mahdollista kiinnitystä liimalaastilla kevytbetoniin ei otettu laskennassa huomioon.

Laskentatarkasteluista havaittiin, että kevytbetonin ulkopinnan vesitiivis pinnoitus on edellytys rakenteen kosteustekniselle toiminnalle. Pinnoittamattomassa rakenteessa hallitsevana on viistosateella kapillaarisesti kevytbetonirakenteen läpi tunkeutuva kosteus, joka aiheuttaa homeen kasvua solumuovieristeen ja kevytbetonirakenteen välisessä rajapinnassa. Sementtirappauksella päällystetty ulkopinta toimii riittävän tiiviinä kerroksena, estäen kapillaarisen veden liikkeen harkkokerroksessa.

Käyttötilan tarkasteluissa (alkukosteuspitoisuus rakenteessa vastasi 65 % RH:ta) havaittiin, että molemmat tutkituista solumuovieristeistä ovat riittävän tiiviitä, eikä lämmöneristeen ja kivirakenteen väliin muodostu homeen kasvulle otollisia olosuhteita. EPS- ja XPS-eristeet käyttäytyivät rakenteessa lähes samalla tavalla. Kuvassa 6.3.3 on esitetty sisäpuoliselta lämmöneristeeltä vaadittava vesihöyrynvastus lämmöneristeen lämmönvastuksen funktiona 100 mm ja 200 mm paksuilla kevytbetoniharkkoilla. Sisäpuolelta eristetyssä kevytbetonirakenteessa sisäpuolinen solumuovieriste voidaan korvata myös avohuokoisella lämmöneristeellä ja erillisellä höyrynsulkukalvolla, jonka vesihöyrynvastus täyttää kuvassa 6.3.3 esitetyn vesihöyrynvastuksen minimiarvon. 300 mm:n harkko on jätetty kuvaajasta pois vähemmän kriittisenä rakenteena. Tämän rakenteen käyrä asettuisi 200 mm paksun harkon raja-arvokäyrän alapuolelle. Kuvasta 6.3.3 on havaittavissa, että lämmöneristepaksuuden lisääminen heikentää rakenteen toimintaa siten, että paksummilla eristeillä rakenteen sisäpinnalta vaaditaan suurempaa vesihöyrynvastusta. Kuvassa esitetyt vesihöyrynvastukset ovat kuitenkin niin pieniä, että ne saavutetaan jo ohuilla solumuovieristeillä.



Kuva 6.3.3

Lämmöneristeeltä vaadittava yhteenlaskettu vesihöyrynvastus lämmönvastuksen funktiona 100 mm ja 200 mm kevytbetoniharkkoilla eri ilmastoissa.

Kalsiumsilikaattilevyn käyttö kevytbetoniharkon sisäpinnassa muutti raja-pinnan RH-olosuhteita samalla tavoin kuin solumuovieristeetkin, vaikka sen vesihöyrynvastus oli selvästi niitä pienempi. Tämän todettiin johtuvan kalsiumsilikaatin kapillaarisista ominaisuuksista. Kalsiumsilikaatti siirtää kosteutta tehokkaasti pois tarkastelupisteestä kapillaarisesti, joka estää homeen esiintymisen eristeen ja kivirakenteen välisessä rajapinnassa. Näin ollen tämäkään eriste ei tarvitse sisäpintaan erillistä höyrynsulkukerrosta.

Rakenteen toiminta kosteusvauriotilanteessa

Sisäpuolelta lisäeristetyt kevytbetonirakenteen toimintaa tutkittiin tapauksessa, jossa rappauksessa on halkeamia ja epätiiviyiskohtia, joista vesi pääsee kosketuksiin kapillaarisesti kevytbetonirakenteen kanssa. Vuotavan veden määrä annettiin prosentteina viistosateesta ja se kohdistettiin kevytbetonin ulkoreunaan 10 mm:n paksuiseen kerrokseen. ASHRAE 160 (2009) -standardin mukaisesti voidaan olettaa, että halkeamat päästävät pinnoitteen läpi noin 1 % viistosateesta. Tarkasteluissa havaittiin, että kaikki tutkitut sisäpuolelta solumuovieristeellä tai kalsiumsilikaattilevyllä eristetyt rakenteet olivat toimivia, kun kosteuslähteen suuruus oli korkeintaan 2 % viistosateesta. Näin ollen pienet halkeamat vesitiiviissä rappauspinnassa eivät aiheuta vielä homeen kasvua rakenteen sisäosissa.

Rakenteen kuivumistarkastelut

Rakennusaikaisen kosteuden kuivumista tutkittiin asettamalla rakenteelle korkea alkukosteuspitoisuus ja tarkastelemalla kolmea ensimmäistä laskentavuotta. Alkukosteutena käytettiin 85 % RH:ta ja 97 % RH:ta vastaavia kosteuspitoisuuksia.

Käytettäessä 85 % RH:ta vastaavaa alkukosteuspitoisuutta solumuovilla ja kalsiumsilikaattilevyllä lisäeristetyt rakenteet olivat kosteusteknisesti toimivia. Rakenteissa ei esiintynyt kosteuden kondensoitumista ja homeindeksi pysyi alle 1,0 jo ensimmäisenä käyttövuotena. 97 % RH suhteellinen kosteus oli puolestaan kaikille tutkituille rakenteille erityisen kriittinen ja homeen kasvua esiintyi lämmöneristeen ja kivirakenteen rajapinnassa kahden ensimmäisen vuoden aikana. Laskentatulosten perusteella kevytbetonirakenteelle suositeltava pinnoituskosteus on 85 % RH:ta vastaava kosteuspitoisuus solumuovieristettä ja kalsiumsilikaattilevyä käytettäessä. Jos kevytbetonirakenne halutaan eristää sisäpuolelta avojuoksisella lämmöneristeellä ja erillisellä höyrynsulkukalvolla, on vastaava raja-arvo 80 % RH:ta vastaava kosteuspitoisuus. Kevytbetonirakennetta ei suositella lisäeristettäväksi korkeammassa kosteudessa, koska liian suuri rakennekosteus voi aiheuttaa tilanteen, jonka aikana home lähtee kasvamaan. Rakenteen kuivuttua homehtuminen taantuu ja satunnainen kertaluonteinen kastuminen voi aktivoida homeen kasvun uudelleen. Sieni- ja sädesieni-itiöt voivat säilyttää elinkykynsä tutkimusten mukaan useiden kuukausien ja jopa vuosien ajan, vaikka kasvualusta kuivuisikin täysin kosteusvaurion jälkeen (Rautiala et al. 1997).

6.4 Tuulettuvat yläpohjat

6.4.1 Yleistä

Rakenteen ja tuuletuksen kuvaus

Seuraavassa on tarkasteltu harjakattoista tuulettuvaa yläpohjaa, jossa lämmöneristeen ja katteen väliin jää kolmion muotoinen ilmatila. Tuulettuvassa yläpohjassa on tyypillisesti ilma-aukot räystäällä ja harjalla, joiden kautta ulkoilma pääsee kiertämään yläpohjan läpi. Ilma-aukkojen koosta ja sijoittelusta on olemassa lisäksi erilaisia järjestelyjä, kuten edellä mainitut ilma-aukot räystäällä ja harjalla, ilma-aukot pelkästään räystäällä tai venttiilit rakennuksen päätykolmioissa ja ilma-aukot harjalla.

Historiallisesta näkökulmasta yksi syy yläpohjan tuuletukselle on ollut katolle satavan lumen sulamisen estäminen ja myöhemmin myös yläpohjaan kulkeutuvan kosteuden pois tuulettaminen. Vanhemmissa rakennuksissa, joiden yläpohjissa ei ole paljoa lämmöneristettä, voi katon ilmatilan lämpötila mahdollistaa katolle sataneen lumen sulamisen. Sulanut ja uudelleen jäänyt lumi voi aiheuttaa jääpuikkoja, pieniä lammikoita, vesivuotoja ja vaurioita katteelle. Yläpohjan ilmanvaihdon lisääminen on viilentänyt yläpohjan ilmatilaa ja näin vähentänyt sulavan lumen määrää. Toisaalta taas tuuletuksen lisääminen (ilma-aukkojen määrän ja koon kasvattaminen) kasvattaa hieman yläpohjan kautta tapahtuvia lämpöhäviöitä. (Rose & TenWolde 2002)

Toinen syy yläpohjan tuuletukselle on sinne päässeen kosteuden pois tuulettaminen. Kosteutta voi kertyä sinne esimerkiksi rakennusaikaisena kosteutena, vesivuotoina sateesta, ilmavuotojen ja diffuusion mukana sisätiloista tai vastaavasti ilmanvaihdon ja diffuusion mukana ulkoilmasta. Rakennusaikainen kosteus on pyrittävä minimoimaan ja sen tulee voida kuivua rakenteesta pois vaurioita aiheuttamatta.

Yläpohjan kosteuslähteet

Suomen olosuhteissa rakennusten sisälämpötila on suuren osan vuotta ulkoilman lämpötilaa korkeampi, jolloin sisällä oleva ilma on ulkoilmaa kevyempää ja pyrkii nousemaan ylöspäin. Sisäilmassa voi ajoittain olla ulkoilmaan nähden kosteusvajetta, mutta tyypillisesti sisäilmassa on kosteutta ulkoilman sisältämän perustason verran, jonka lisäksi asuminen ja rakennuksen käyttö tuottaa kosteutta sisäilmaan. Tällöin ilmavuodot sisätiloista yläpohjaan lisäävät yläpohjan kosteuskuormitusta. Vesihöyryn pitoisuuserot pyrkivät tasoittumaan myös diffuusiolla alemman pitoisuuden suuntaan pysty- tai vaakasuunnasta riippumatta. Hyvin vesihöyryä läpäisevien rakenteiden läpi tapahtuva vesihöyryn diffuusio lisää kosteuskuormitusta rakenteissa.

Yläpohjan tuuletuksen toiminta

Yläpohjan ilmanvaihdon suotuisimpaan määrään vaikuttaa usea asia. Energiankulutuksen kannalta yläpohjan tuuletus kasvattaa lämpöhäviöitä talvella ja toisaalta voi hieman pienentää jäähdystystarvetta kesällä. Tuuletuksen vaikutus riippuu tällöin yläpohjan ilmatilan ja ulkoilman välisen lämpötilaeron ja ilmanvaihdon määrän lisäksi myös yläpohjan lämmöneristystasosta sekä sääoloista. Kosteuden kannalta suotuisa ilmanvaihdon määrä riippuu kosteuden lähteestä ja kulkeutumistavasta.

Jos rakennusaikaista kosteutta on rakennuksen normaaliin käyttöön verrattuna enemmän, nopeuttaa ilmanvaihdon kasvattaminen kosteuden poistumista. Jos suurin kosteuskuorma tulee rakenteeseen sisäilmasta diffuusiolla, niin myös tällöin ilmanvaihdon kasvattaminen edesauttaa yläpohjaan päässeen kosteuden kuivumista. Jos taas suurin kosteuslähde on sisäilmasta ilmapuotojen mukana, voi ilmanvaihdon kasvattaminen vain kasvattaa paine-eroa sisäilman ja yläpohjan välillä. Tällöin oikea lähestymistapa olisi etsiä ja tukkia ilmapuotokohdat. Jos suurin kosteuslähde on sadevuodot rakenteeseen, auttaa hyvä ilmanvaihto rakenteen kuivumista. Jos suurin kosteuslähde on ulkoilma itsessään, niin tällaisessa tilanteessa ulkoilman pääsyn rajoittaminen rakenteeseen olisi kosteuskuorman pienentämisen kannalta hyödyllistä.

Yläpohjan ilmanvaihdon määrittämistä hankaloittaa kuitenkin eri ilmiöiden tapahtuminen samanaikaisesti. Tyypillisesti rakenteissa on jonkin verran rakennusaikaista kosteutta, ilmapuotoja sisätiloista, vesivuotoja uloimman vaipan osan läpi ja lisäksi rakenteet ovat avoinna ulkoilmaan. Tällöin kosteusteknisesti hyvän rakenteen ominaisuuksia ovat hyvä rakennusaikaisen kosteuden kuivumiskyky, ilmatiiviys, sadeveden pitävyys sekä sieto ulkoilman kosteutta vastaan. Tuulettuvissa kattoristikkoylepohjissa kantavat rakenneosat ovat suojassa sateelta, mutta kosketuksissa ulkoilman kanssa. Tuulettuvan yläpohjan tyyppisen välitilan olosuhteet eivät kuitenkaan ole suoraan ulkoilmaa vastaavat, vaan niihin vaikuttaa sisätiloista tulevien lämpövuotojen lisäksi ulkoilman olosuhteet sekä säteilykomponentit.

Jos yläpohjaan kohdistuu muutoin vähän kosteuskuormia, niin riittävän kuiva ulkoilma ei itsessään aiheuta yläpohjassa kosteusteknisiä riskejä. Sen sijaan ulkoilman olosuhteiden muuttuessa homeen kasvulle suotuisammiksi ei ulkoilmalla tuulettaminen ole yhtä hyödyllistä kuin aikaisemmin. Jos yläpohjassa on kosteuslisää ulkoilmaan verrattuna, niin mitä kosteampaa ulkoilma on, sitä pienempi on tuuletuksen kuivattava vaikutus. Ideaalitalanteessa tuulettuvassa yläpohjassa ei ole lainkaan kosteuslisää ulkoilmaan nähden. Ilman vesihöyrypitoisuus on sama tuulettuvassa yläpohjassa kuin ulkoilmassa ja ilman suhteellinen kosteus määräytyy lämpötilan perusteella. Mitä lämpimämpi tuulettuva yläpohja on ulkoilmaan nähden, sitä alhaisempi on tuulettustilan suhteellinen kosteus ja sitä paremmin rakenne kosteusteknisesti toimii.

Painovoimainen ilmanvaihto tarkoittaa ilman vaihtumista ilman tiheyseroista johtuvien paineerojen ja/tai tuulen vaikutuksesta. Todellisen yläpohjan ilmanvaihtuvuuteen vaikuttavat useat

tekijät, kuten alueella vallitsevat tuuliolot, maaston paikalliset pinnanmuodot sekä ilmanvaihtoaukkojen suuruus ja suunta. Tuulettuvien yläpohjien ilmanvaihtuvuuden määrittämisestä on olemassa muutamia tutkimuksia, mutta yleisesti hyväksyttyä tapaa siihen ei ole.

Sanders & Haig (2004) viittaavat tutkimukseen (Sanders 1982), jonka perusteella yläpohjan ilmanvaihtuvuus on noin $n = (2 \times \text{<tuulen nopeus m/s>}) / h$, kun molemmilla räystäällä on 10 mm tuuletusraot. Blom (2001) on käyttänyt tuulettuvan yläpohjan laskennallisissa tarkasteluissa yläpohjan ilmanvaihtuvuutena arvoa 5,8 1/h. Johansson (2009 s. 35) on käyttänyt laskennassa yläpohjan ilmanvaihtuvuutena arvoa 10 1/h. Myös Arfvidsson & Harderup (2008) ovat tutkineet erilaisten tuulettuvien yläpohjien kosteusteknistä toimintaa. Osana tutkimushanketta tehdyissä laskennallisissa tarkasteluissa on tuulettuvan yläpohjan ilmanvaihtuvuus keskimäärin tavalliselle rakenteelle ollut noin 2 1/h ja pienennetyn ilmanvaihtuvuuden tapauksessa keskimäärin 0,2 1/h. Walker & Forest (1995) ovat tehneet kenttämittauksia kattoristikkoylepohjien ilmanvaihtuvuudesta. Vähän tuulettuvan (engl. tight) yläpohjan ilmanvaihtuvuus oli 0–7 1/h suurimman ilmanvaihtuvuuden vastatessa ympäröivän tuulen nopeutta 9 m/s. Paremmin tuulettuvan yläpohjan ilmanvaihtuvuus vaihteli välillä 0–50 1/h, mutta maksimiarvo rajoitettiin mittausteknisistä syistä arvoon 20 1/h. Mittaustulosten kuvaajien perusteella tuulen nopeuden ollessa 3,5 m/s vähän tuulettuvan yläpohjan ilmanvaihtuvuus vaihteli välillä 0–4 1/h ja paremmin tuulettuvan välillä 2–15 1/h. Mittaustuloksia on käytetty ilmanvaihtuvuutta kuvaavan mallin kehittämiseen (Walker et al. 2004).

Essah (2009) on tutkinut tuulettuvien kattoristikkoylepohjien lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa pääasiassa aluskatteen vesihöyrynläpäisevyyden ja yläpohjan ilmanvaihtuvuuden kannalta. Mitatuissa kohteissa yläpohjan ilmanvaihtuvuus vaihteli kohteiden välillä. Lähes suljetuilla yläpohjilla ilmanvaihtokertoimet olivat n. 0,5–1,5 1/h ja tuulettuvilla yläpohjilla n. 1–10 1/h.

Yläpohjien ilmanvaihtuvuutta on käsitelty laskelmissa vapaana muuttujana, jonka suhteen muiden muutosten vaikutusta on tarkasteltu.

Rakenteelliset toimenpiteet

Jos yläpohjaan ei kohdistu ulkoilman lisäksi ylimääräisiä kosteuskuormia, yläpohjan kosteustekninen toiminta palautuu suurelta osin lämpötilojen hallintaan. Yläpohjasta halutaan saada riittävän lämmin, jotta suhteellinen kosteus tippuu riittävän alas. Lämpötilaa nostavia rakenteellisia ratkaisuja ovat yläpohjan lämmöneristemäärän vähentäminen, lämmöneristeen lisääminen rakenteen ulkopintaan, katon kulma ja suuntaus saatavan aurinkoenergian maksimoimiseksi, pintojen emissiviteetin pienentäminen lähtevän pitkäaaltoisen säteilyn vähentämiseksi sekä ilmavirtojen hallinta. Ratkaisujen välillä on myös korrelaatioita, eli esimerkiksi kattopinnan/aluskatteen lämmönvastuksen kasvattaminen pienentää lämpöhäviöitä johtamalla, mutta samalla pienentää hyödynnettävän auringonsäteilyn määrää.

Yläpohjan tuuletuksen pienentäminen on suotuisaa illalla, jolloin rakenne on lämmin päivän jäljiltä, mutta ilmanvaihdon kasvattaminen aamulla lämmittää rakennetta nopeammin viileän yön jäljiltä.

Mitä vähemmän kosteuskuormaa kantaville rakenteille kohdistuu ja mitä lämpimämmässä rakenteet ovat, sitä turvallisemmin ne kosteusteknisesti toimivat. Tuulettuvan yläpohjan kosteusteknisen toiminnan parantamisen haaste on kuitenkin kantavien rakenteiden sijaitseminen tuuletustilan sekä lämpimällä että kylmällä puolella. Tästä syystä ei ole itsestään selvää, minkälainen vaikutus erilaisilla yläpohjan rakenteellisilla muutoksilla on. Mahdollisia rakenteellisia muutoksia tuulettuvan yläpohjan kosteusteknisen toiminnan parantamiseksi ovat yläpohjan lämmöneristeen määrä, katon sisäpinnan vesihöyrynvastus, yläpohjan ilmatiiviys, yläpohjan tuuletusaukkojen määrä sekä erilaiset aluskatevaihtoehdot.

Lähtökohtaisesti yläpohjan lämmöneristyksen kasvattaminen pienentää lämpöhäviöitä yläpohjaan, jolloin yläpohjan lämpötila on lähempänä ulkoilman lämpötilaa. Sisäpinnan vesihöyrynvastuksen kasvattaminen vähentää sisäilmasta diffuusiolla yläpohjaan siirtyvän kosteuden määrää ja näin pienentää kosteuskuormitusta rakenteisiin. Ilmatiivis yläpohja vähentää ilmavuotoja sisätiloista yläpohjaan, jolloin myös ilmavuotojen mukana siirtyvä kosteus vähenee.

Tällä hetkellä aluskatteita käytetään tuulettuvissa yläpohjissa varsinaisen vesikatteen läpi tulevan sadeveden poisjohtamiseen katon alueelta. Toinen aluskatteen käyttötarkoitus rakennuksen käytön aikana on estää vesikatteen alapintaan kondensoituvan kosteuden valuminen alapuolisiin rakenteisiin. Mekaanisen kestävyuden ja pitkäaikaiskestävyyden lisäksi yläpohjan kosteustekniseen toimintaan vaikuttavia ominaisuuksia ovat aluskatteen vesihöyry- ja lämmönvastus sekä emissiviteetti. Teoriassa aluskatteen alhainen vesihöyrynvastus sallisi rakenteeseen tulevan kosteuden poistuvan helpommin kuin korkeampi vesihöyrynvastus. Toisaalta taas myös ulkoilman kosteus pääsee tällöin vaikuttamaan helpommin alapuoliseen rakenteeseen. Aluskatteen lämmönvastuksen kasvattaminen pienentää lämpövirtaa alapuolisista rakenteista pois. Toisaalta taas yläpohjan tuuletus kuljettaa lämpöenergiaa mukanaan irrottaen yläpohjan varsinaisen lämmöneristeen ja aluskatteen lämpötekniisesti toisistaan. Edelleen lämpöä eristävä aluskate vähentää myös auringonsäteilyn lämmittävää vaikutusta. Aluskatteen pieni emissiviteetti pienentää teoriassa aluskatteen pinnasta lähtevää pitkäaaltoista lämpösäteilyä.

Seuraavassa on käsitelty laskentatuloksia lähteestä (Essah 2009). Laskentatulosten perusteella ilma-aukkojen koko räystäällä vaikutti kondenssin määrään aluskatteen alapinnassa. Teoreettinen ilmaraon koko 0 mm tuotti laskennassa tarkastelluista tapauksista pienimmän kondensoituneen kosteuden määrän, mutta kondensoituneen kosteuden määrän maksimi saavutettiin toiseksi pienimmällä räystään ilmarakojen koolla (tehollinen koko 3 mm). Ilmarakojen koon kasvattaminen tästä suuremmiksi pienensi kondensoituneen kosteuden määrää (5, 10 ja 20 mm). Hyvin vesihöyryä läpäisevällä aluskatteella ($s_d = 0,032$ tai $0,02$ m) kondensoituneen kosteuden määrä oli pienempi kuin bitumialuskatteella ($s_d = 40$ m), mutta

vaikutus oli kuitenkin pienempi kuin yläpohjan ilmanvaihtuvuuden lisäämisellä. Kun sisätiloista oli ilmapuotoja yläpohjaan, niin sekä läpäisevän että tiiviin aluskatteen alapinnassa esiintyi kondenssia 2,2–4,6 kg/m² tapauksesta riippuen. Yläpohjan lämmöneristepaksuuden kasvattaminen lisäsi yläpohjaan tiivistyvän kosteuden määrää ja pienensi lämpöhäviöitä yläpohjan läpi. Jollei ilmapuotoja sisätiloista yläpohjaan saada täysin nollattua, tulee yläpohjassa olla tuuletus. (Essah 2009 luvut 6.4.2.1, 6.4.2.2 ja 6.5.2)

Nik et al. (2012) ovat tutkineet tuulettuvien yläpohjien kosteusteknistä toimintaa tulevaisuuden ilmastossa. Tutkimuksessa selvitettiin eri ilmastomallien valinnan vaikutusta tuulettuvan yläpohjan olosuhteisiin sekä yläpohjan olosuhteiden parantamista käyttämällä lämpöä eristävää aluskatetta, käyttämällä lämpöä eristävää aluskatetta ja pienentämällä yläpohjan ilmanvaihtuvuutta tai käyttämällä koneellisesti ohjattua ilmanvaihtoa. Tuulettuvan yläpohjan homehtumisriskin todettiin olevan huomattavasti suurempi Etelä-Ruotsissa kuin Pohjois-Ruotsissa. Edelleen pohjoisen puoleinen katon lape oli homeen kasvun kannalta kriittisempi kuin etelän puoleinen katon lape. Eri SRES-päästöskenaarioiden valinnalla ei havaittu olevan vaikutusta yläpohjan kosteustekniseen toimintaan. Tuloksien mukaan yläpohjan homehtumisriski on korkea perusratkaisun mukaisessa yläpohjassa kaikilla SRES-päästöskenaarioilla. Lämpöä eristävällä aluskatteella pystyttiin parantamaan yläpohjan olosuhteita nykyilmastossa, mutta ei tulevaisuuden ilmastossa. Yläpohjan katon lämmöneristämisen yhteydessä havaittiin myös, että olosuhteiden $0 \leq T \leq 20$ °C ja $80 \% RH \leq \phi \leq 100 \% RH$ määrä kasvaa katon lappeen lämmöneristämisen jälkeen, jolloin lämmöneristys ei välttämättä pysty parantamaan yläpohjan olosuhteita riittävästi. Ilmanvaihtuvuuden pienentäminen lappeen lämmöneristämisen jälkeen heikensi yläpohjan toimintaa pelkkään lappeen lämmöneristämiseen verrattuna. Koneellinen ohjattu yläpohjan ilmanvaihto oli tutkituista tapauksista paras ratkaisu ja sillä pystyttiin parantamaan yläpohjan olosuhteet hyväksyttävälle tasolle tässä tutkimuksessa tarkastelluissa tapauksissa.

6.4.2 Laskentatarkastelujen toteutus

Yläpohjarakenteiden laskennalliset tarkastelut tehtiin rakenteiden kosteusteknisellä analysointimenetelmällä luvun 3 mukaisesti. Laskentaohjelmana käytettiin yhdistettyä lämpö- ja kosteusteknistä laskentaohjelmaa Delphin 5.7.3, jonka tuloksia verifioitiin tuulettuvien yläpohjien kenttämittaustuloksien avulla luvun 5.6 mukaisesti. Laskentaohjelmassa käytettiin mahdollisuuksien mukaan suomalaisista materiaaleista määritettyjä materiaaliominaisuuksia (Laukkarinen 2012a).

Tuulettuvassa yläpohjassa tutkittiin yläpohjalle tulevan auringonsäteilyn vaikutusta, yläpohjan lämmöneristykseen määrän ja tyyppin, rakenteen sisäpinnan vesihöyrynvastuksen, aluskatteen vesihöyrynvastuksen ja lämmönvastuksen, kalvomaisen aluskatteen emissiviteetin sekä yläpohjan ilmanvaihtuvuuden vaikutusta nykyilmastossa sekä vuosien 2050 ja 2100 ilmastoissa.

Kaikki laskelmat on tehty käyttäen Jokioisen testivuosisien ilmastodataa.

Pitkäaaltoinen lämpösäteily vesikatteen ja taivaan välillä otettiin laskentatarkasteluissa huomioon taivaan tehollisen lämpötilan avulla. Arvot määritettiin kolmen yksinkertaisen ehdon avulla:

1. Jos tietyllä ajanhetkellä sataa, taivaan tehollinen lämpötila on sama kuin ulkoilman lämpötila.
2. Jos vaakapinnalle tulee diffuusia säteilyä, mutta ei suoraa auringonsäteilyä, niin myös tässä tapauksessa taivaan tehollinen lämpötila on sama kuin ulkoilman lämpötila.
3. Muissa tapauksissa taivaan tehollinen lämpötila on 5 °C ulkoilman lämpötilaa alhaisempi.

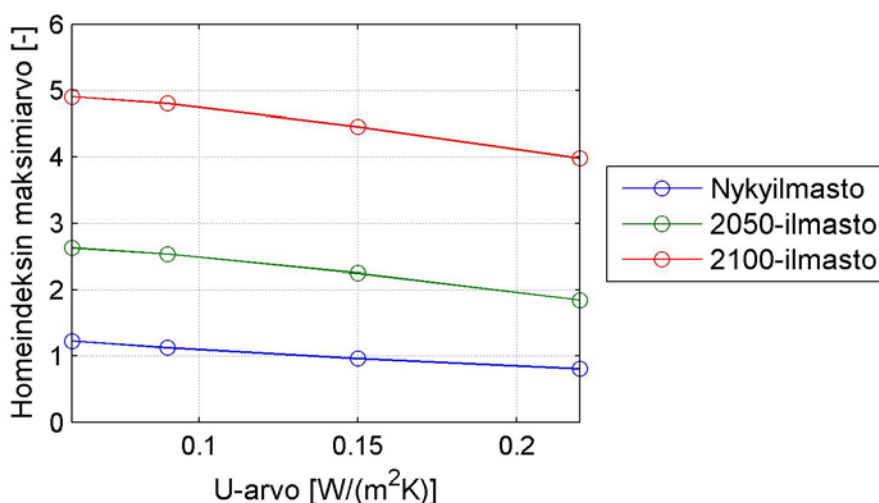
Näin määritettyä taivaan tehollista lämpötilaa voidaan pitää suuntaa-antavana karkeana arviona. 5 °C lämpötilaero valittiin lähteen Bring et al. (1999) perusteella. Taivaan teholliseen lämpötilaan liittyviä aiempia tutkimustuloksia on esitetty tarkemmin luvussa 6.6.2.

Vesikatteen näkyvyyskerroin taivaalle oli kaikissa laskentatarkasteluissa 1,0 eli tarkasteluissa oletettiin, että ympäröivät rakennukset ja puusto eivät vaikuttaneet katon ja taivaan väliseen pitkäaaltoisen lämpösäteilyn määrään. Tämä oletus oli voimassa myös varjossa olevan kattopinnan tarkasteluissa, jolloin katolle ei kohdistunut suoraa auringonsäteilyä.

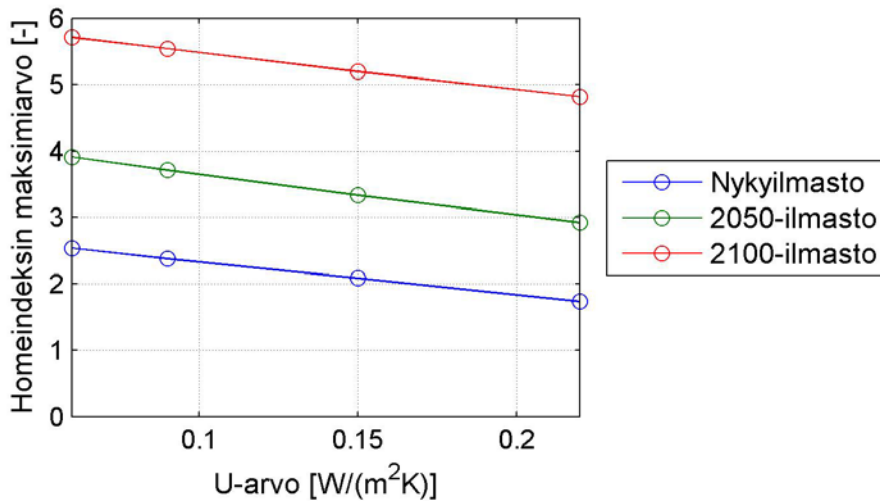
Yläpohjassa olevissa tiloissa pitkäaaltoisen säteilyn lämmönsiirto tapahtui pelkästään pystysuunnassa, näkyvyyskerroinella 1,0.

6.4.3 Tulokset

Kuvissa 6.4.1 ja 6.4.2 on esitetty homeindeksin maksimi-arvo tuulettuvan yläpohjan yläosassa kahdella eri lämmöneristetyypillä U-arvon funktiona.



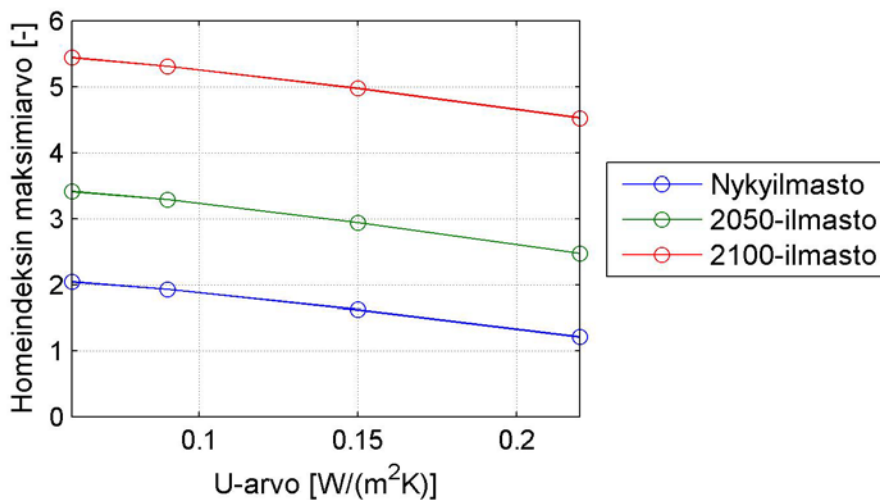
Kuva 6.4.1 Homeindeksin maksimi-arvo (HHL1) auringossa olevan tuulettuvan yläpohjan yläosassa, kun lämmöneristeenä on käytetty puukuitueristeettä (60 kg/m³) ja tuuletustilan ilmanvaihtuvuus on 5 1/h.



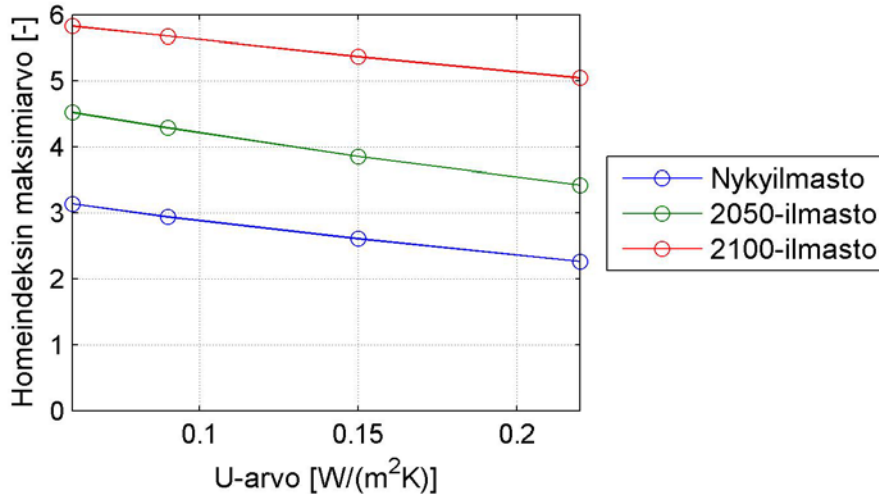
Kuva 6.4.2 Homeindeksin maksimi-arvo (HHL1) auringossa olevan tuulettuvan yläpohjan yläosassa, kun lämmöneristeenä on käytetty mineraalivillaa (22 kg/m^3) ja tuuletustilan ilmanvaihtuvuus on 5 l/h .

Kuvien 6.4.1 ja 6.4.2 perusteella sekä U-arvon kiristäminen että ilmastonmuutos kasvattavat rakenteen homeindeksiä. Olosuhteet mineraalivillaeristetyssä yläpohjassa ovat hieman kriittisemmät kuin puukuitueristetyssä yläpohjassa.

Seuraavissa kuvissa on esitetty yläpohjan U-arvon vaikutus ilmatilan yläosan homeindeksiin kahdella eri lämmöneristetyypillä ilman suoraa auringonsäteilyä (pohjoisen puoleinen tai muuten varjossa oleva katto).



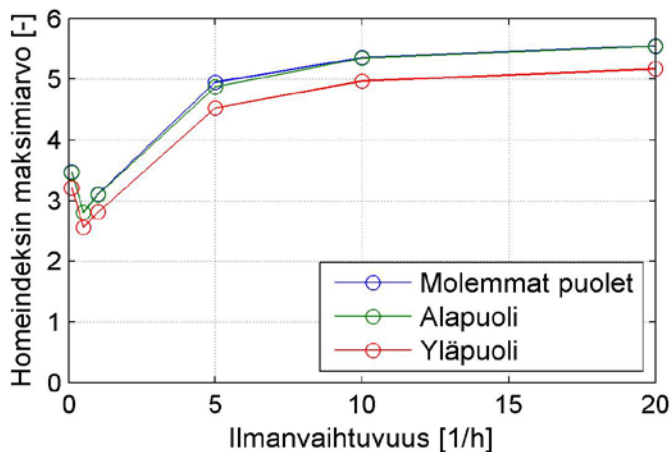
Kuva 6.4.3 Homeindeksin maksimi-arvo (HHL1) varjossa olevan tuulettuvan yläpohjan yläosassa, kun lämmöneristeenä on käytetty puukuitueristeettä (60 kg/m^3) ja tuuletustilan ilmanvaihtuvuus on 5 l/h .



Kuva 6.4.4 Homeindeksin maksimi-arvo (HHL1) varjossa olevan tuulettuvan yläpohjan yläosassa, kun lämmöneristeenä on käytetty mineraalivillaa (22 kg/m^3) ja tuuletustilan ilmanvaihtuvuus on 5 1/h .

Kuvista 6.4.1–6.4.4 huomataan, että suoran auringonsäteilyn puuttuminen muuttaa yläpohjan olosuhteita kriittisemmäksi avoimella paikalla olevaan rakennukseen verrattuna.

Seuraavassa kuvassa on tarkasteltu kalvomaisen aluskatteen matalaemissiviteettipinnan ($\varepsilon = 0,02$) vaikutusta yläpohjan olosuhteisiin. Tarkastelluissa vaihtoehdoissa pientä emissiviteettiä on käytetty joko aluskatteen molemmissa pinnoissa tai vaihtoehtoisesti vain ylä- tai alapinnassa.

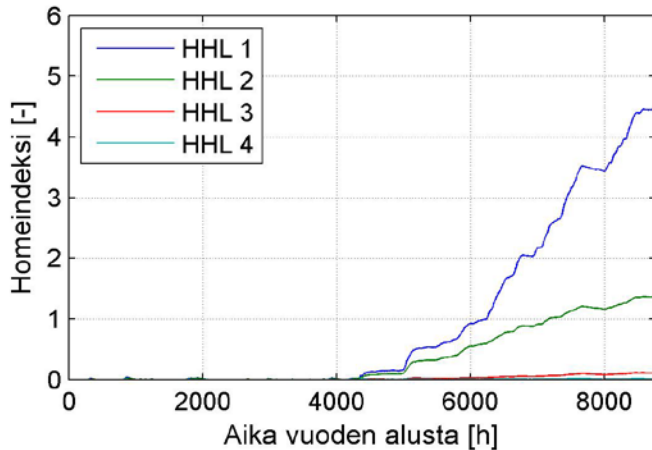


Kuva 6.4.5 Aluskatteen matalaemissiviteettipinnan vaikutus varjossa olevan tuulettuvan yläpohjan yläosan homeindeksin maksimi-arvoon (HHL1), kun lämmöneristeenä on käytetty mineraalivillaa (22 kg/m^3) ja rakenteen U-arvo on $0,06 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ (Jokioinen 2050). Vertailurakenne ($\varepsilon = 0,9$) tuotti samat arvot kuin yläpinnastaan matalaemissiivinen aluskate.

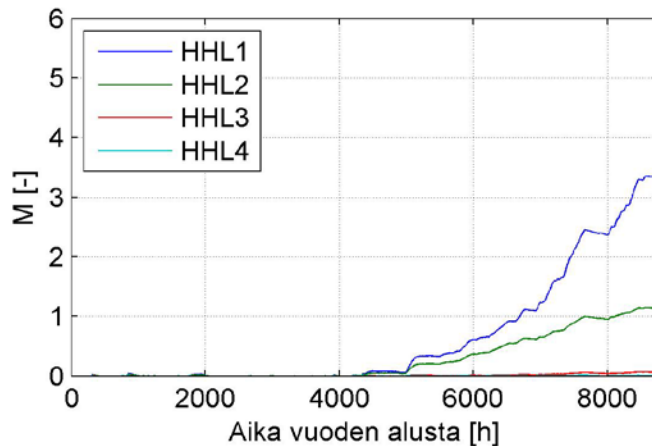
Kuvasta 6.4.5 havaitaan, että yläpohjan kosteusteknisen toiminnan kannalta aluskatteen mahdollinen matalaemissiviteettipinta kannattaa laittaa ylöspäin. Pelkästään alapinnasta tai

vaihtoehtoisesti molemmista pinnoistaan matalaemissiviteettipintainen aluskate toimivat kosteusteknisesti lähes samalla tavoin.

Kuvissa 6.4.6 ja 6.4.7 on esitetty varjossa olevien mineraalivilla- ja puukuitueristeisten tuulettuvien yläpohjien homeindeksit yhden vuoden ajalle käyttäen eri homeutumisherkkyyssluokkia.



Kuva 6.4.6 Homeindeksin kehittyminen varjossa olevan tuulettuvan yläpohjan yläosassa eri homeutumisherkkyyssluokissa, kun lämmöneristeenä on käytetty mineraalivillaa (22 kg/m^3), rakenteen U -arvo on $0,06 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ja tuuletustilan ilmanvaihtuvuus on 5 l/h (Jokioinen 2050).



Kuva 6.4.7 Homeindeksin kehittyminen varjossa olevan tuulettuvan yläpohjan yläosassa eri homeutumisherkkyyssluokissa, kun lämmöneristeenä on käytetty puukuitueristettä (60 kg/m^3), rakenteen U -arvo on $0,06 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ja tuuletustilan ilmanvaihtuvuus on 5 l/h (Jokioinen 2050).

Kuten kuvista 6.4.6 ja 6.4.7 havaitaan, homeutumisherkkyyssluokilla on suuri merkitys yläpohjan homeutumisriskiin. Hometta kestävämpiä materiaaleja käytettäessä (HHL3 ja HHL4) yläpohjan homeindeksi pysyy selvästi alhaisempana kuin herkemmin homeutuvilla materiaaleilla (HHL2 ja HHL1).

Taulukoissa 6.4.1 ja 6.4.2 on esitelty rakenteen toiminta parantavia ilmanvaihtuvuus- aluskatteen s_d -arvo -yhdistelmiä eri tapauksissa. Suotuisin yhdistelmä on esitetty kaikille U-arvotaso-ilmasto -yhdistelmille toteutuneesta homeindeksin arvosta riippumatta. Tulokset on esitetty sekä auringossa että varjossa olevalle katolle. Kaikissa tarkastelluissa tapauksissa rakenteen sisäpinnassa on höyrynsulkumuovi. Homeindeksin $M_{max} = 1$ alittavat tapaukset on merkitty taulukoihin erikseen (*)-merkillä.

Taulukko 6.4.1 Suositeltavat yhdistelmät aluskatteen vesihöyrynvastukselle ja tuulettuvan yläpohjan ilmanvaihtuvuudelle auringossa olevalle katolle Jokioisen ilmastossa. (*)-merkillä on merkitty $M_{max} < 1$ -ratkaisut.

Yläpohjan U-arvo	Mineraalivilla (levyvillä 30 kg/m ³)		Puukuitueriste (puhallusvilla 60 kg/m ³)	
	U=0,06 W/(m ² K)	U=0,22 W/(m ² K)	U=0,06 W/(m ² K)	U=0,22 W/(m ² K)
Nykyilmasto	$n \leq 2, s_d \geq 0,2$ m (*) tai $n > 2, s_d = 0,02$ m	$n \leq 2, s_d \geq 0,2$ m (*) tai $n > 2, s_d = 0,02$ m	$n \leq 3, s_d \geq 0,2$ m (*) tai $n > 3, s_d = 0,02$ m	$n \leq 3, s_d \geq 0,2$ m (*) tai $s_d = 0,02$ m (*)
2050 ilmasto	$n \leq 3, s_d \geq 0,2$ m tai $n > 3, s_d = 0,02$ m	$n \leq 3, s_d \geq 0,2$ m tai $n > 3, s_d = 0,02$ m	$n \leq 4, s_d \geq 0,2$ m tai $n > 4, s_d = 0,02$ m tai $n \leq 2, s_d \geq 0,2$ (*)	$n \leq 4, s_d \geq 0,2$ m tai $n > 4, s_d = 0,02$ m tai $n \leq 2, s_d \geq 0,2$ (*)
2100 ilmasto	$n = 0,5$ tai 1,0 ja $s_d \geq 0,2$ m	$n = 0,5$ tai 1,0 ja $s_d \geq 0,2$ m	$n \leq 5, s_d \geq 0,2$ m tai $n > 5, s_d = 0,02$ m tai $n \leq 0,5, s_d \geq 1,0$ (*)	$n = 0,5$ tai 1,0 ja $s_d \geq 0,2$ m

Taulukko 6.4.2 Suositeltavat yhdistelmät aluskatteen vesihöyrynvastukselle ja tuulettuvan yläpohjan ilmanvaihtuvuudelle varjossa olevalle katolle Jokioisen ilmastossa. (*)-merkillä on merkitty $M_{max} < 1$ -ratkaisut.

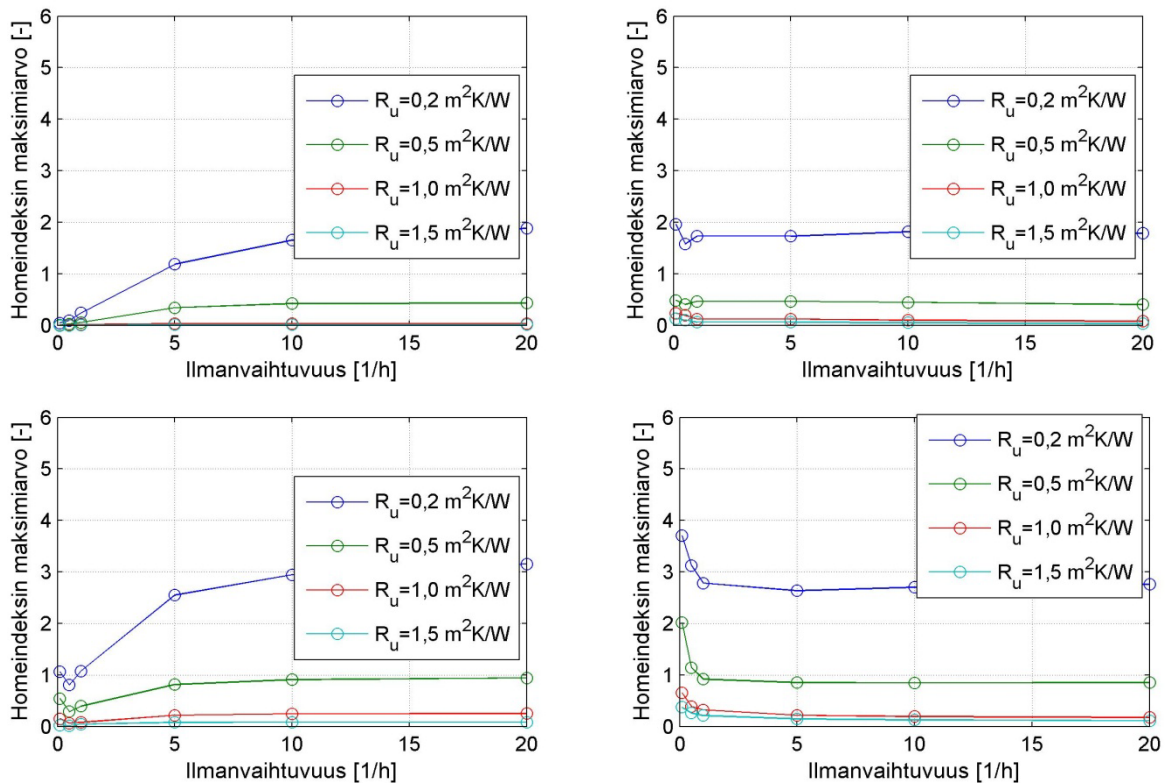
Yläpohjan U-arvo	Mineraalivilla (levyvillä 30 kg/m ³)		Puukuitueriste (puhallusvilla 60 kg/m ³)	
	U=0,06 W/(m ² K)	U=0,22 W/(m ² K)	U=0,06 W/(m ² K)	U=0,22 W/(m ² K)
Nykyilmasto	$n \leq 3, s_d \geq 1,0$ m tai $n > 3, s_d = 0,02$ m	$n \leq 3, s_d \geq 0,2$ m tai $n > 3, s_d = 0,02$ m tai $n \leq 1, s_d \geq 0,2$ m (*)	$n \leq 4, s_d \geq 0,2$ m tai $n > 4, s_d = 0,02$ m tai $n \leq 1, s_d \geq 0,2$ m (*)	$n \leq 4, s_d \geq 0,2$ m tai $n > 4, s_d = 0,02$ m tai $n \leq 1, s_d \geq 0,2$ m (*)
2050 ilmasto	$n \leq 3, s_d \geq 0,2$ m tai $n > 3, s_d = 0,02$ m	$n \leq 4, s_d \geq 1,0$ m tai $n > 4, s_d = 0,02$ m	$n \leq 5, s_d \geq 0,2$ m tai $n > 5, s_d = 0,02$ m tai $n \leq 1, s_d \geq 0,2$ m (*)	$n \leq 5, s_d \geq 0,2$ m tai $n > 5, s_d = 0,02$ m tai $n \leq 1, s_d \geq 1,0$ m (*)
2100 ilmasto	$n = 0,5$ tai 1,0 ja $s_d \geq 1,0$ m	$n = 0,5$ tai 1,0 ja $s_d \geq 1,0$ m	$n \leq 10, s_d \geq 1,0$ m tai $n > 10, s_d = 0,02$ m tai $n \leq 1, s_d \geq 1,0$ m (*)	$n = 0,5$ tai 1,0 ja $s_d \geq 1,0$ m

Jos taulukossa vesihöyryä hyvin läpäisevä aluskate ($s_d = 0,02$ m) on parempi vaihtoehto, tällöin myös sitä vesihöyryä avoimemmat kalvot käyvät. Laskentamallissa ei ole käytössä erikseen pinnan kosteudensiirtokertoimia, mutta ne on mahdollista ottaa huomioon myös jälkikäteen ($Z_{\text{mat}} = Z_{\text{tot}} - Z_{\text{si}} - Z_{\text{se}}$).

Edellä esitettyjen taulukoiden perusteella tarkasteltujen yläpohjan olosuhteiden kannalta on hyvä, jos rakenteessa on kohtalaisen pieni ilmanvaihtuvuus ja suuri aluskatteen vesihöyrynvastus tai joissakin tapauksessa suuri ilmanvaihtuvuus ja pieni aluskatteen vesihöyrynvastus. On kuitenkin tärkeää huomata, että tarkasteluissa ei ole mukana ilma- tai sadevuotoja. Näin ollen ilmanvaihdon pienentämistä ei voi täysimääräisesti sellaisenaan suositella. Toisaalta hyvin toimivassa rakenteessa ei välttämättä aina tarvita suurta tuuletusta.

Lämpöä eristäviä aluskatteita ei ole tällä hetkellä Suomessa yleisesti markkinoilla. Tästä syystä aluskatemateriaaleina laskennassa on käytetty tuulensuojamineraalivillaa ja solumuovia, jotka edustavat ominaisuuksiltaan erilaisia lämpöä eristäviä aluskatemateriaaleja.

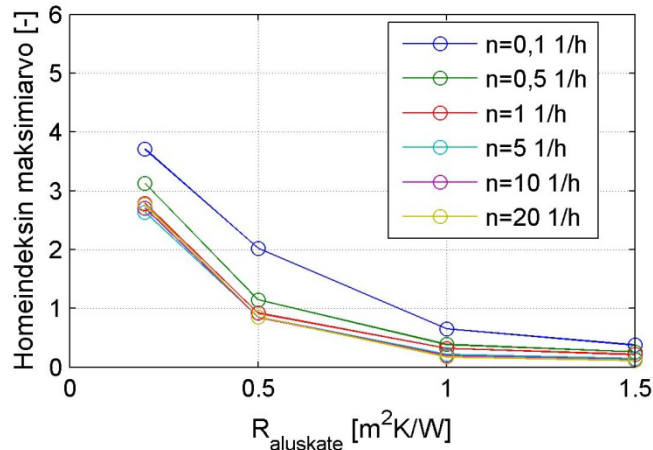
Seuraavassa kuvassa on esitetty yläpohjan homeindeksi erilaisilla lämmöneristemateriaali-, aluskatemateriaali-, ilmanvaihtuvuus- ja aluskatteen lämmönvastusyhdistelmillä. Laskelmat on tehty Jokioisen 2050 ilmastossa varjossa olevalle katolle.



Kuva 6.4.8 Homeindeksin maksimi-arvo (HHL1) varjossa olevan tuulettuvan yläpohjan yläosassa, kun lämmöneristeenä on käytetty puukuitueristeettä (60 kg/m^3) (ylärivi) ja mineraalivillaa (22 kg/m^3) (alarivi) ja rakenteen U -arvo on $0,06 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (Jokioinen 2050). Vasemmalla on esitetty tulokset EPS-aluskatteella ja oikealla mineraalivilla-aluskatteella.

Kuvan 6.4.8 perusteella puukuitueristeen käytöstä on saatavissa hieman etua mineraalivillaeristeen verrattuna yläpohjan kosteusteknisen toiminnan kannalta. Lisäksi EPS-aluskatetta käytettäessä ilmanvaihdon pienentäminen parantaa yläpohjan kosteusteknistä toimintaa.

Seuraavassa kuvassa on esitetty yläpohjan olosuhteiden muuttuminen aluskatteen lämmönvastuksen funktiona, kun yläpohjan päälämmöneristemateriaalina on mineraalivilla ja aluskatteena on mineraalivillalevy.



Kuva 6.4.9 Aluskatteen lämmönvastuksen varjossa olevan tuulettuvan yläpohjan yläosan homeindeksin maksimiarvoon (HHL1), kun lämmöneristeenä on käytetty mineraalivillaa (22 kg/m^3) ja rakenteen U -arvo on $0,06 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ (Jokioinen 2050). Aluskatteena on käytetty mineraalivillatuulensuojalevyä.

Aluskatteen lämmönvastuksen kasvattaminen pienentää yläpohjan homeindeksiä kaikilla ilmanvaihtuvuuksilla. Aluskatteen lämmönvastuksen kasvattaminen yli $1,0 \text{ m}^2\text{K/W}$ hyödyttää yläpohjan olosuhteita enää vain vähän.

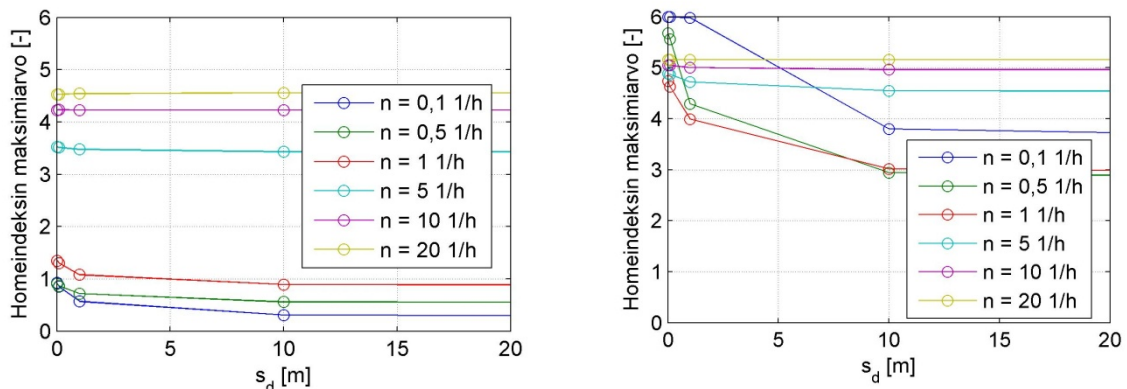
Taulukossa 6.4.3 on esitetty vaadittava aluskatteen lämmönvastus, jotta yläpohjan ilmatilan homeindeksin maksimiarvo olisi alle 1,0. Jos aluskatteen vaadittava lämmönvastus on ollut pienempi kuin $0,2 \text{ m}^2\text{K/W}$ (pienin laskennassa käytetty lämmönvastus), on tämä arvo haettu taulukkoon lineaarisella ekstrapoloinnilla (merkitty näkyviin suluissa). Lämmönvastukset on ilmoitettu taulukossa kahden desimaalin tarkkuudella, koska tällöin mittamuutokset tuotteissa pyöristyksestä johtuen ovat yhden millimetrin suuruusluokkaa (esim. $0,01 \text{ m}^2\text{K/W} \times 0,1 \text{ W/(mK)} = 1 \text{ mm}$). Annettu tarkkuus ei kuitenkaan välttämättä kuvaa laskennan todellista tarkkuutta.

Taulukon 6.4.3 perusteella saadaan puukuitueristetyyn yläpohjan aluskatteen vaadittavaksi lämmönvastukseksi $0,4 \text{ m}^2\text{K/W}$ riippumatta aluskatteen vesihöyrynvastuksesta. Mineraalivillaeristetyssä yläpohjassa vastaava arvo on $0,5 \text{ m}^2\text{K/W}$ EPS-aluskatetta käytettäessä ja $0,6 \text{ m}^2\text{K/W}$ mineraalivilla-aluskatetta käytettäessä. Arvot riippuvat myös yläpohjan ilmanvaihtuvuudesta.

Taulukko 6.4.3 Aluskatteelta vaadittava lämmönvastus, jotta varjossa olevan tuulettuvan yläpohjan yläosan homeindeksin maksimi-arvo (HHL1) alittaa arvon $M_{max} = 1$ Jokioisen ilmastossa. Yläpohjan U -arvo on $0,06 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Kattorakenteiden homeutumisherkkyysluokka	Päälämmön-eristemateriaali	Aluskate-materiaali	Vaadittava aluskatteen lämmönvastus [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]		
			Nykyilmasto	Jokioinen 2050	Jokioinen 2100
1	Puukuitueriste	EPS/MV	0,13 (ekstrap.)/ 0,28 (ekstrap.)	0,38 / 0,40	0,66 / 0,77 ($n \geq 0,5 \text{ 1/h}$) tai 0,89 ($n = 0,1 \text{ 1/h}$)
	Mineraalivilla	EPS/MV	0,42 / 0,41 ($n \geq 0,5 \text{ 1/h}$) tai 0,55 ($n = 0,1 \text{ 1/h}$)	0,49 / 0,60 ($n \geq 0,5 \text{ 1/h}$) tai 0,88 ($n = 0,1 \text{ 1/h}$)	0,94 / 0,98 ($n \geq 0,5 \text{ 1/h}$) tai 1,37 ($n = 0,1 \text{ 1/h}$)
2	Puukuitueriste	EPS/MV	0 (ekstrap.)/ 0 (ekstrap.)	0,08 (ekstrap.)/ 0,08 (ekstrap.)	0,34 / 0,44 ($n \geq 0,5 \text{ 1/h}$) tai 0,55 ($n = 0,1 \text{ 1/h}$)
	Mineraalivilla	EPS/MV	0,08 (ekstrap.)/ 0 (ekstrap., $n \geq 0,5 \text{ 1/h}$) tai 0,16 (ekstrap., $n = 0,1 \text{ 1/h}$)	0,26 / 0,26 ($n \geq 0,5 \text{ 1/h}$) tai 0,37 ($n = 0,1 \text{ 1/h}$)	0,56 / 0,62 ($n \geq 0,5 \text{ 1/h}$) tai 0,79 ($n = 0,1 \text{ 1/h}$)

Seuraavassa kuvassa on tarkasteltu rakenteen sisäpinnan vesihöyrynvastuksen vaikutusta yläpohjan ilmatilan yläosan olosuhteisiin. Varjossa olevan katon kalvomaisen aluskatteen vesihöyrynvastus on $s_d = 0,2 \text{ m}$ ($8 \times 10^3 \text{ m/s}$, $1 \times 10^9 \text{ m}^2\text{sPa/kg}$).



Kuva 6.4.10 Rakenteen sisäpinnan vesihöyrynvastuksen vaikutus varjossa olevan tuulettuvan yläpohjan yläosan homeindeksin maksimi-arvoon (HHL1), kun lämmöneristeenä on käytetty puukuitueristettä ($60 \text{ kg}/\text{m}^3$, vasen puoli) ja mineraalivillaa ($22 \text{ kg}/\text{m}^3$, oikea puoli) ja rakenteen U -arvo on $0,06 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (Jokioinen 2050). Aluskatteena on käytetty kalvomaista hyvin vesihöyryä läpäisevää ($s_d = 0,2 \text{ m}$) aluskatetta.

Ilmatilan yläosa oli sisäpinnan vesihöyrynvastuksen vaikutusta tarkasteltaessa kriittisin kohta ilmatilan ala-, keski- ja yläosasta. Tärkeää on huomata, että myös lämmöneristeellä on vesihöyrynvastusta, joka pienentää sisältä ulospäin diffuusiolla siirtyvän kosteusvirran

tiheyttä. Kuvasta 6.4.10 nähdään, että puukuitueristetyssä yläpohjassa kolme suurinta ilmanvaihtuvuuden arvoa (5, 10 ja 20 1/h) tuottavat selvästi suuremman yläpohjan homeindeksin kuin kolme pienintä ilmanvaihtuvuuden arvoa (0,1, 0,5 ja 1 1/h). Mineraalivillaeristetyssä yläpohjassa yläpohjan olosuhteet ovat herkkiä sisäpinnan vesihöyrynvastuksen pienentämiselle, kun yläpohjan ilmanvaihtuvuus on pieni.

Seuraavassa taulukossa on tarkasteltu varjossa olevan yläpohjan sisäpinnan vesihöyrynvastuksen vaikutusta yläpohjan olosuhteisiin. Laskennassa on käytetty lämpöä eristävää aluskatetta, jonka lämmönvastus on ollut $R_u = 1 \text{ m}^2\text{K/W}$ tai $R_u = 0,2 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Taulukko 6.4.4 Yläpohjan sisäpinnalta vaadittava vesihöyrynvastus muutamalla erilaisella lämmöneriste-aluskateyhdistelmällä, jotta varjossa olevan tuulettuvan yläpohjan yläosan homeindeksin maksimiarvo (HHL1) alittaa arvon $M_{\max} = 1$ Jokioisen ilmastossa. Yläpohjan U-arvo on $0,06 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ja aluskatteen vesihöyrynvastus $s_d = 1 \text{ m}$ ($40 \times 10^3 \text{ m/s}$, $5 \times 10^9 \text{ m}^2\text{sPa/kg}$).

Lämmöneriste	Aluskate	Nykyilmasto	2050	2100
Puukuitueriste	EPS $R_{\text{aluskate}}=1 \text{ m}^2\text{K/W}$ tai $R_{\text{aluskate}}=0,2 \text{ m}^2\text{K/W}$ (2050)	Aluskatteen lämmönvastus $1 \text{ m}^2\text{K/W}$ ja rakenteen sisäpinnan vesihöyrynvastus $s_d = 0,01 \text{ m}$ laskevat yläpohjan homeindeksin alle yhden, paitsi vuoden 2100 ilmastossa yläpohjan ilmanvaihtuvuudella 0,1 1/h. Tällöin sisäpinnan vesihöyrynvastuksena tulee olla $s_d = 0,5 \text{ m}$. Jokioisen 2050 ilmastossa lämmönvastus $0,2 \text{ m}^2\text{K/W}$ on riittävä ilmanvaihtuvuuksilla $n \leq 0,5 \text{ 1/h}$ ja sisäpinnan vesihöyrynvastuksilla $s_d \geq 0,01 \text{ m}$.		
	MV $R_{\text{aluskate}}=1 \text{ m}^2\text{K/W}$	Aluskatteen lämmönvastus $1 \text{ m}^2\text{K/W}$ ja rakenteen sisäpinnan vesihöyrynvastus $s_d = 0,01 \text{ m}$ laskevat yläpohjan homeindeksin alle yhden.		
Mineraalivilla	EPS $R_{\text{aluskate}}=1 \text{ m}^2\text{K/W}$	$n=0,1 \text{ 1/h}$ ja $s_d \geq 9 \text{ m}$	$n=0,1 \text{ 1/h}$ ja $s_d \geq 10 \text{ m}$ tai $n=0,5 \text{ 1/h}$ ja $s_d \geq 1 \text{ m}$	$n=0,1 \text{ 1/h}$ ja $s_d \geq 70 \text{ m}$ tai $n=0,5 \text{ 1/h}$ ja $s_d \geq 6 \text{ m}$
		$n=0,5 \text{ 1/h}$ ja $s_d \geq 0,7 \text{ m}$	$n \geq 1 \text{ 1/h}$ ja $s_d \geq 0,1 \text{ m}$	$n \geq 1 \text{ 1/h}$ ja $s_d \geq 1 \text{ m}$
	MV $R_{\text{aluskate}}=0,2 \text{ m}^2\text{K/W}$	Aluskatteen lämmönvastus $0,2 \text{ m}^2\text{K/W}$ ei ole riittävä homeindeksin $M_{\max} = 1$ alittamiseen. Sisäpinnan vesihöyrynvastuksen kasvattaminen pitää samana tai parantaa yläpohjan olosuhteita. Rakenteen sisäpinnan vesihöyrynvastus $s_d = 89 \text{ m}$ ei enää merkittävästi muuta homeindeksin arvoa verrattuna arvoon $s_d = 10 \text{ m}$.		

Kun yläpohjan lämmöneristeenä käytetään puukuitueristettä, aluskatteen lämmönvastus 0,2–1 m²K/W riittää käytännössä pitämään yläpohjan homeindeksin alhaisella tasolla sisäpinnan vesihöyrynvastuksesta riippumatta. Mineraalivillaeristetyssä yläpohjassa ilmanvaihtuvuuden kasvattaminen pienentää sisäpinnalta vaadittavaa vesihöyrynvastusta. Aluskatteen lämmönvastuksen tulee olla enemmän kuin 0,2 m²K/W. Sisäpinnan vesihöyrynvastuksen kasvattamisen hyöty pienenee vesihöyrynvastuksen kasvaessa.

Sisältä tuleva vesihöyryn diffuusiovirta muutti olosuhteita erityisesti lämmöneristekerroksen yläpinnassa ja ilmatilan alaosassa.

6.4.4 Tulosten tarkastelu

Homeen kasvun riski oli suurempi katon pohjoisella tai muutoin varjostetulla puolella etelän suuntaan avautuvaan kattoon verrattuna. Tuulettuvan yläpohjan yläosa oli pääsääntöisesti kriittisempi kuin lämmöneristeen yläpinta. U-arvon kiristäminen ja erityisesti ilmastonmuutos kasvattivat tuulettuvan yläpohjan homehtumisriskiä. Kummallekaan muuttujalle ei löytynyt yksiselitteistä raja-arvoa, jonka jälkeen olosuhteet alkaisivat heikentyä erityisen paljon. Ilmasto-olosuhteet muuttuivat kuitenkin rankemmiksi vuoden 2050 ilmastosta vuoden 2100 ilmastoon siirryttäessä kuin nykyilmastosta vuoden 2050 ilmastoon mentäessä. Homeindeksi kasvoi sekä nykyilmastossa että tulevaisuuden ilmastoissa samalla tavoin U-arvoa kiristettäessä. Tämä tarkoittaa, että myös olemassa olevien tuulettuvien yläpohjien homehtumisriski kasvaa ilmaston muuttuessa. Tehtyjen tarkastelujen perusteella homehtumisriski saadaan kuitenkin pieneksi rakenteellisilla ratkaisuilla.

Matalaemissiviteettipinnan ($\varepsilon = 0,02$) käyttäminen aluskatteen alapinnassa pienentää lämpöhäviöitä lämmöneristeen yläpinnasta yläpohjaan. Kosteustekniseltä kannalta tämä heikentää yläpohjan olosuhteita tavalliseen ($\varepsilon = 0,9$) aluskatteeseen verrattuna.

Hieman yllättävääkin oli, että yläpinnastaan matalaemissiivinen aluskate ei kuitenkaan parantanut yläpohjan olosuhteita tavalliseen aluskatteeseen verrattuna. Tämä saattaa johtua pienestä lämpötilaerosta aluskatteen yläpinnan ja vesikatteen alapinnan välillä. Aluskatteen ja vesikatteen välinen ilmanvaihtuvuus sekä pintojen välinen pieni lämmönvastus mahdollistavat pintojen lämpötilojen olevan lähellä toisiaan. Lämpötilaeron ollessa pieni lämpöä siirtyy säteilemällä vain vähän. Jos matalaemissiviteettipintaista aluskatetta haluttaisiin käyttää, olisi matalaemissiviteettipinta suositeltavaa asentaa ylöspäin. Tällöin pinnan emissiviteetti voi kuitenkin kasvaa epäpuhtauksien vaikutuksesta, joten rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta matalaemissiviteettipintaista aluskatteesta ei ole merkittävää hyötyä.

Yläpohjan lämmöneristeen kosteuskapasiteetin kasvattamisesta oli hyötyä yläpohjan homehtumisriskin kannalta ilmanvaihtuvuuden ollessa riittävän pieni ($n < 1\text{--}5$ 1/h). Tämä liittyy ilmeisesti yläpohjan olosuhteiden vuorokautiseen vaihteluun, jolloin suuremman kosteuskapasiteetin omaava lämmöneriste pystyy vielä vaikuttamaan yläpohjan olosuhteisiin. Aikasyklin pidentyminen, lämmöneristeen peittäminen tai ilmanvaihtuvuuden kasvattaminen

pienentävät lämmöneristeen hygroskooppisuudesta saatavaa hyötyä. Lämmöneristemateriaalin tiheys ei suoraan korreloi materiaalin kosteuskapasiteetin kanssa kaikissa tapauksissa.

Yläpohjan lämmöneristemateriaaleiksi valittiin mineraalivilla ja puukuitueriste, koska niistä on saatavilla kattavia materiaalitietoja laskentaa varten. Puukuitueristeen tilavuuspaino on laskelmissa ollut suurempi kuin mitä valmistajat tällä hetkellä ilmoittavat asennetun eristeen tilavuuspainoksi, mutta tällä pyrittiin tuomaan esille kosteuskapasiteetin kasvattamisesta mahdollisesti saatavaa hyötyä.

Kalvomaisen aluskatteen suotuisin vesihöyrynvastus riippuu yläpohjan ilmanvaihtuvuudesta. Yläpohjan ilmanvaihtuvuuden ollessa pieni aluskatteen suuri vesihöyrynvastus oli hyväksi. Vastaavasti ilmanvaihtuvuuden ollessa suuri hyvin vesihöyryä läpäisevä aluskate oli yläpohjan kosteusteknisen toiminnan kannalta hyvä. Kaikissa tarkasteluissa rakenteen sisäpinnassa oli höyrynsulkumuovi. Koska kosteuskuorma sisäilmasta oli minimoitu, on tällöin rakenteen suurin kosteuskuorma tullut ulkoilmasta tuuletusilman mukana.

Taulukossa 6.4.2 homeindeksin $M_{\max} = 1$ alittavissa tapauksissa yläpohjan ilmanvaihtuvuus on alle 1 1/h ja aluskatteen s_d -arvo $\geq 0,2$ m. Yläpohjan ilmanvaihdon pienentäminen ja ympäröivän rakenteen vesihöyrynvastuksen kasvattaminen ei ole kuitenkaan suositeltavaa, koska laskelmissa ei ole mukana todellisissa rakenteissa esiintyviä kosteuslähteitä, kuten rakennusaikaista kosteutta, ilmavuotoja sisältä tai sadevuotoja, jotka edellyttävät yläpohjassa tapahtuvaa riittävää ilmanvaihtoa.

Jos yläpohjan ilmanvaihtoa haluttaisiin rajoittaa, tulisi erikseen huolehtia rakennusaikaisen kosteuden kuivattamisesta, kuivumisen jälkeisestä ilmanvaihdon pienentämisestä, käytön aikaisesta seurannasta ja tarvittavista toimenpiteistä olosuhteiden muuttuessa. Olemassa olevien rakennusten kannalta tuulettuvien yläpohjien toimintaa on saattanut edesauttaa sijainti aurinkoisella paikalla, pienet kosteuskuormat yläpohjaan sekä pieni, mutta riittävä yläpohjan ilmanvaihtuvuus. Tehtyjen laskelmien perusteella tuulettuvan yläpohjan optimaalinen ilmanvaihtuvuus on noin 0,5–1 1/h.

Yläpohjan homeindeksin maksimiarvo joko pieneni tai pysyi samana rakenteen sisäpinnan vesihöyrynvastusta kasvatettaessa. Yläpohjan ilmanvaihtuvuuden kasvattaminen pystyi joissain tapauksissa kompensoimaan sisäpinnan pientä vesihöyrynvastusta. Tällöin yläpohjan suurempi ulkoilmavirta vie mukanaan osan sisätiloista tulevasta kosteudesta. Yläpohjan ilmanvaihtuvuuden kasvattaminen voi kuitenkin joissain tapauksissa heikentää yläpohjan olosuhteita. Selkein toimenpide yläpohjan olosuhteiden parantamiseksi on tässä tapauksessa kasvattaa sisäpinnan vesihöyrynvastusta.

Vaikka tässä raportissa puhutaan usein rakenteen sisäpinnan vesihöyrynvastuksesta, niin on hyvä pitää mielessä, että kaikilla rakennekerroksilla on omat vesihöyrynvastuksensa. Tuulettuvan yläpohjan olosuhteita tarkastellessa kaikkien kerrosten vesihöyrynvastukset

sisältä yläpohjan ilmatilaan asti vaikuttavat sisäilmasta diffuusiolla kulkeutuvaan kosteusvirtaan. Tällöin voi olla tarpeen tarkastella yläpohjarakenteen olosuhteita sekä lämmöneristekerroksessa että yläpohjan ilmatilassa. Jos rakenteen vesihöyrynvastus ilmatilan kannalta on jo sellaisenaan riittävä, voivat olosuhteet olla kuitenkin jossakin tapauksessa hankalat lämmöneristekerroksen sisällä. Näin on erityisesti sen vuoksi, että lämmöneristekerroksessa on myös kattoristikoiden puisia tukisauvoja, jotka ovat herkempiä homehtumaan.

Sisäpinnan riittävä vesihöyrynvastus on tarpeen yläpohjan kosteuskuorman pienentämiseksi. Ilman erillisiä selvityksiä puukuitueristetylle yläpohjalle voi suositella rakenteen sisäpinnassa käytettäväksi vesihöyrynvastusta $s_d \geq 1$ m ($Z_v \geq 40 \times 10^3$ m/s, $Z_p \geq 5 \times 10^9$ m²sPa/kg) ja mineraalivillaeristetylle yläpohjalle arvoa $s_d \geq 10$ m ($Z_v \geq 400 \times 10^3$ m/s, $Z_p \geq 50 \times 10^9$ m²sPa/kg). Tarkempi arvio edellyttää muun muassa yläpohjan lämmöneristemateriaalin ja aluskatteen ominaisuuksien yksityiskohtaisempaa huomioon ottamista.

Kuten aiemmin jo luvussa 6.2 todettiin, rakenteen sisäpinnalta vaadittavan vesihöyrynvastuksen arvossa on otettava huomioon myös se, että sisäilma ei pääse kuivumaan liikaa talviolosuhteissa, vaikka rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta sisäpinnan vesihöyrynvastus olisikin riittävä.

Lämpöä eristävällä aluskatteella pystyttiin kaikissa tarkastelluissa tapauksissa saamaan tuulettuvan yläpohjan olosuhteet asetetun raja-arvon mukaiselle tasolle ($M_{\max} < 1$). Aluskatteelta vaadittava lämmönvastus riippuu muun muassa yläpohjan lämmöneristemateriaaleista, aluskatteen vesihöyrynläpäisevyydestä, yläpohjan ilmanvaihtuvuudesta ja muista edellä mainituista asioista. Taulukon 6.4.3 perusteella aluskatteelle voidaan kuitenkin suositella lämmönvastusta 0,4–0,6 m²K/W käytetyistä ratkaisuista riippuen. Olemassa olevilla lämmöneristetuotteilla tämä tarkoittaa noin 20–30 mm paksuista lämmöneristelevyä. Lämmöneristykseen tulisi peittää yläpohja kauttaaltaan. Lämpö- ja kosteusteknisten ominaisuuksien lisäksi tulee ottaa huomioon myös aluskatteelle asetettavat vaatimukset puristuslujuudesta, pitkäaikaiskestävyydestä sekä käyttäytymisestä palossa.

6.5 Ryömintätilaiset alapohjat

6.5.1 Yleistä

Rakenteen kuvaus

Ryömintätilaisella alapohjalla tarkoitetaan rakennetta, jossa rakennuksen lattian ja maanpinnan välissä on tuuletustila. Tyypillisessä ratkaisussa tilan tuuletus tapahtuu painovoimaisesti perusmuurissa olevien tuuletusaukkojen kautta ulkoilmaan. Rakenteen etuina ovat muun muassa mahdollisuus rakentaa paaluperustuksen päälle sekä mahdollisuus ehkäistä tuuletuksella maaperän radonin tuloa sisätiloihin. Lisäksi lattiarakenne on mahdollista tehdä puurakenteisena tai elementeistä, jolloin rakennusaikaisen kosteuden määrä vähenee ja kuivumisajat lyhenevät.

Maan suuresta lämpökapasiteetista johtuen lattian alapuolisen maan lämpötila muuttuu viiveellä ulkolämpötilojen muuttuessa. Tällöin kesällä maa on viileää talven jäljiltä, kun taas talvella maa on lämpimämpää kesän jäljiltä vuosikeskiarvoihin verrattuna. Lisäksi lämpötilojen vaihtelu on pienempää maassa kuin ulkoilmassa. Mitä syvemmälle maahan mennään, sitä hitaammin ja vähemmän olosuhteet vaihtelevat. Olosuhteet vaihtelevat vähemmän myös rakennuksen keskellä kuin reunoilla. Riittävän syvälle mentäessä maan lämpötila tasoittuu ulkoilman vuosikeskilämpötilaa vastaavaksi.

Perusrakenteeltaan samanlaisesta ryömintätilaisesta alapohjasta on olemassa erilaisia variaatiota ilmanvaihdon ja lämmöneristyksen osalta. Kuten edellä mainittiin, tavallisin ratkaisu tällä hetkellä on laittaa kaikki alapohjan lämmöneristeet lattiaan ja tuulettaa alapohjan ilmatila perusmuurissa olevien tuuletusaukkojen kautta ulkoilmaan. Perusmuurissa saattaa olla eristehalkaisu tai sen sisäpintaan saattaa olla asennettuna eristelevy. Tällaisesta rakenteesta yksi variaatio on laittaa maan pinnalle muovikalvo tai lämmöneriste, mutta tehdä rakenne muutoin edellisen kaltaisena.

Toinen ryömintätilan perustyyppi on niin kutsuttu lämmin alapohja, jossa ryömintätilan ja sisätilan välisessä lattiassa ei ole lämmöneristettä ollenkaan tai sitä on vain vähän ja suurin osa alapohjan lämmöneristeestä sijaitsee maan pinnalla ja perusmuurissa. Ryömintätilan ilmanvaihto voidaan hoitaa tällaisessa rakenteessa koneellisella tulo-/poistoilmanvaihdolla, jossa on mukana lämmöntalteenotto.

Kolmas ryömintätilatyyppi on suljettu alapohja, joka on myös kosteuseristetty. Kyseinen rakenne on tällä hetkellä harvinainen ratkaisu ja sen käyttömahdollisuuksia on tutkittu lähinnä kuuman ja kostean ilmanalan olosuhteissa (Karagiozis 2005).

Ryömintätilan kosteuslähteet

Ryömintätilan kosteuslähteitä ovat ulkoilma, sisäilma, sade- ja sulamisvedet sekä pohjavesi ja maan huokosilma. Vesi voi kulkeutua vesihöyryinä diffuusiolla alhaisemman vesihöyrypitoisuuden suuntaan, konvektiolla ilmavirtauksien mukana, kapillaarisesti maassa ja rakennusmateriaaleissa tai vetenä painovoiman vaikutuksesta. Lähinnä kellarien mutta myös muiden pohjarakenteiden yhteydessä puhutaan usein vesihöyryyn liikkumisesta alhaisemman lämpötilan suuntaan. Tällä tarkoitetaan tilannetta, jossa maassa oleva kosteus riittää yleensä nostamaan huokosilman vesihöyrypitoisuuden lähelle kyllästyskosteuspitoisuutta (g/m^3). Kyllästyskosteuspitoisuus on alhaisempi matalammassa lämpötilassa kuin korkeammassa, jolloin maassa vesihöyryvirta on alhaisemman lämpötilan suuntaan. Koko rakenteen toimintaa tarkasteltaessa on otettava huomioon kaikki kosteuslähteet ja niiden siirtymismuodot.

Ryömintätilan kosteustekninen toiminta

Ryömintätilan kosteusteknistä toimintaa voidaan tarkastella eri kosteuslähteiden kannalta. Pohjavesi voi nousta maalajista riippuen kapillaarisesti ylöspäin useita metrejä. Lisäksi lähistöllä olevat vesistöt saattavat olla rakennusten perustusten yläpuolella, jolloin vettä voi liikkua maassa myös painovoimaisesti pyrkien tasoittamaan vesipintojen korkeuseroja. Kapillaarisesti sekä painovoiman vaikutuksesta voi liikkua huomattavia määriä vettä, jonka pääsy rakennuksen perustuksiin on estettävä salaojituksella, kapillaarikatkokerroksella sekä tarvittaessa vedenpaine-eristyksellä.

Sadevedet rakennuksen pinnoilta ja ympäristöstä sekä lumien sulamisvedet on ohjattava pois rakennuksen kohdalta. Rikkinäiset, tukkeutuneet tai puutteellisesti suunnitellut sadevesijärjestelmät tai salaojat saattavat ohjata vettä kosteuskuormaksi rakenteille. Tällainen kosteuskuormitus pitää saada minimoitua, sillä sade- ja sulamisvedet voivat tuottaa rakenteeseen enemmän kosteutta kuin mitä se kestää.

Käyttötilanteessa, jos ryömintätilassa ei ole suuria kosteuslähteitä maasta, sateesta tai kosteista perustuksista, ryömintätilan ilman vesihöyrypitoisuus (g/m^3) on lähellä ulkoilman vesihöyrypitoisuutta. Tällöin tyypilliset sisäilman kosteuslisät ulkoilmaan nähden ovat samaa suuruusluokkaa myös ryömintätilaan nähden. Vesihöyryyn pitoisuuserot pyrkivät tasoittumaan diffuusiolla kaikkiin suuntiin, jolloin kosteusvirran suunta diffuusiolla on sisätiloista ryömintätilaa kohden. Tilanne voi muuttua rakennuksen käyttötarkoituksesta ja ryömintätilan kosteuskuormista riippuen.

Rakennusperinteessä tunnetaan niin kutsuttujen ”kissanluukkujen” sulkeminen syksyllä järvien jäätyessä ja niiden avaaminen keväällä järvien sulaessa. Ryömintätilan tuuletusluukkujen sulkeminen talven tullen on pienentänyt ilmanvaihtoa ja näin nostanut jonkin verran ryömintätilan lämpötilaa, jolloin alapohjan lämpöhäviöt ovat pienentyneet ja lattia tuntunut hieman lämpimämmälle. Ryömintätilan luukut on avattu kesällä, jotta lämmin

ulkoilma nostaisi ryömintätilan lämpötilaa. Jos ulkoilma on ryömintätilan ainut kosteuslähde, niin lämpötilan nosto talvella parantaa ryömintätilan olosuhteita. Sen sijaan kesällä ryömintätilan lämpötila säilyy ulkoilman lämpötilan ja ryömintätilan vuosikeskiarvon välissä ilmanvaihdon säätämisestä huolimatta. Tästä syystä tuuletusluukkujen avaaminen ja sulkeminen ei voi täysin korjata perinteisen ryömintätilan tyypillistä kosteuskäyttäytymistä.

Kesällä, jos paljas ryömintätilan maanpinta on niin viileä, että kosteusvirran suunta on ilmasta maahan, on tällöin myös koko ryömintätila ulkoilmaa viileämpi ja altis home- ja kosteusvaurioille. Tällöin pieni ilmanvaihto ei riitä lämmittämään alapohjaa, mutta riittää kuitenkin pitämään suhteellisen kosteuden korkealla. Suuri ilmanvaihto tuo lisää kosteutta ryömintätilaan, mutta toisaalta mahdollista ryömintätilan lämpötilan nostamisen pidemmällä aikavälillä. Olennainen kysymys tällöin on, millä ilmanvaihtuvuudella ilmanvaihto pystyy nostamaan ryömintätilan lämpötilan riittävän korkeaksi.

Jos taas paljas maan pinta on riittävän lämmin, toimii maa kosteuslähteenä ryömintätilaan kasvattaen kosteuskuormaa rakenteeseen. Jos maa toimii kosteuslähteenä ryömintätilaan, ei pieni ilmanvaihto välttämättä riitä poistamaan maasta nousevaa kosteutta. Suuri ilmanvaihto taas mahdollistaa maan pintakerroksen kuivumisen, jolloin kosteustuotto maasta pienenee ja samalla ilmanvaihto kykenee poistamaan jäljelle jäävän osuuden. Ryömintätilan kosteusteknisen toiminnan kannalta maanpinnan lämpötila ja ryömintätilan ilmanvaihto ovat sidoksissa toisiinsa.

Jos maan jäähdyttävää vaikutusta pyritään kompensoimaan lämmittämällä ryömintätilaa, on syytä samalla seurata ryömintätilan lämpö- ja kosteusolosuhteita. Jos ryömintätilaan on vain vähän kosteustuottoa, laskee lämpötilan nostaminen ryömintätilan suhteellista kosteutta parantaen olosuhteita. Toisaalta taas jos ryömintätilassa on jatkuvasti kosteita pintoja, nostaa lämmittäminen kyllästyskosteuspitoisuutta näillä pinnoilla lisäten kosteustuottoa ympäröivään ilmaan. Tällöin vaarana on homeen kasvulle otollisten olosuhteiden lisääntyminen, eli ryömintätilassa on sekä lämmintä että kosteaa. Toisin sanoen jos ryömintätilaan tulee kosteutta vain ulkoilmasta, parantaa ryömintätilan lämmittäminen olosuhteita. Jos taas esimerkiksi ryömintätilan maa toimii jatkuvana kosteuslähteenä, on lämmityksen edellytyksenä haihtumisen estäminen maan pinnasta. Ilmanvaihto samanaikaisesti lämmityksen kanssa kasvattaa lämmityksen energiankulutusta.

Maasta nousevaa kosteuskuormaa on mahdollista pyrkiä pienentämään levittämällä vesihöyryä läpäisemätön muovi maan pinnalle. Muovin tulee peittää koko maanpinta (Nilsson & Harderup 2002), sillä muutoin muovin kosteuskuormaa pienentävä vaikutus pienenee nopeasti. Jos korkea kosteuskuorma maasta johtuu esimerkiksi puutteellisista salaojista, niin tällöin muovin käytöllä ei hoideta tilanteen varsinaista syytä vaan ainoastaan seurauksia. Koska muovilla ei ole lämmönvastusta, ei kyseinen ratkaisu helpota ulkoilman olosuhteista aiheutuvaa kosteuskuormaa kesällä. Näin ollen vaikka muovin käytöllä voidaan pienentää rakenteen kosteusrasitusta joissain olosuhteissa, on sen käytöllä saavutettavissa vain rajallista hyötyä. Lisäksi on huomattava, että suhteellinen kosteus muovin alla on jatkuvasti korkea

eikä maanpinnan kuivuminen ole mahdollista. Tämä mahdollistaa mikrobien kasvulle erittäin otolliset olosuhteet muovikalvon alla. Tällöin voi olla vaarana, että mikrobien ja homeiden aineenvaihduntatuotteita pääsee ryömintätilan ilmaan ja siitä edelleen rakennuksen sisätilaan, jos alapohja ei ole ilmatiivis. Tästä syystä muovikalvon käyttö ryömintätilaisessa alapohjassa maan pinnalla ei ole suositeltava ratkaisu.

Oikein mitoitettu ja toimiva ilmankuivain pystyy laskemaan ryömintätilan ilman suhteellisen kosteuden niin alas, ettei homeen kasvu ole mahdollista (Kurnitski et al. 1999). Vaikka toimivan koneen hankinta ja ylläpito olisikin perusteltavissa koneen tuottamalla kuivilla olosuhteilla, ei ratkaisu kuitenkaan poista alkuperäistä ongelmaa, eli kosteusteknisesti puutteellista alapohjarakennetta. Jättämällä varsinainen rakenne alkuperäiseen muotoonsa siirretään osa riskistä rakennuksen loppukäyttäjälle. Teknisten ratkaisujen yhteydessä on aina riski siihen, että laitteen toiminta heikkenee tai lakkaa huollon tai riittävän seurannan puuttuessa. Toisaalta esimerkiksi vaativissa olosuhteissa tai korjausrakentamisessa voi kuivauskoneen käyttö olla perusteltu ratkaisu.

Rakennuksen painesuhteet riippuvat muun muassa paikallisista tuulioloista, rakenteiden ilmanpitävyydestä sekä ilmanvaihtojärjestelmästä. Jotta ilmavuodot eivät kuljettaisi kosteutta rakenteisiin, halutaan rakennuksesta usein saada hieman alipaineinen. Tällöin toisaalta kasvaa riski rakenteissa mahdollisesti olevien epäpuhtauksien kulkeutumisesta vuotoilman mukana sisätiloihin. Jos asuintiloissa on alipaine ryömintätilaan nähden ja ryömintätilasta havaitaan tulevan vuotoilmaa asuintiloihin, tulisi lähtökohtaisesti pyrkiä etsimään epätiiviyyskohdat ja tiivistämään ne. Edellä kuvatussa tilanteessa esimerkiksi ryömintätilan tuuletusaukkojen lisääminen pienentää virtausvastusta, eli kasvattaa ilman virtausta ryömintätilasta asuintiloihin. Osa ryömintätilaan tulevasta ilmasta voi tulla myös maan läpi varsinkin karkearakeisilla maalajeilla. Tällöin ryömintätilasta tulevassa korvausilmassa voi olla ryömintätilan ilman lisäksi myös maassa olevia epäpuhtauksia.

Kantavat rakenteet tulee pyrkiä saamaan aina riittävän lämpimiin olosuhteisiin, jotta niihin ei syntyisi kosteusvaurioita. Tämä tarkoittaa esimerkiksi sitä, että kantavien puukannattajien alapuolelle laitetaan lämpöä eristävä tuulensuoja, joka nostaa puurakenteiden ulko-osien lämpötilaa. Myös matalaemissiviteettipinnoitteiden tai -kalvojen käyttäminen ryömintätilan lattian alapuolella on tutkittu (Kokko et al. 1997). Matalaemissiviteettikalvon ($\epsilon < 0,15$) sijoittaminen ryömintätilan lattian alapuolelle paransi tutkimuksessa merkittävästi alapohjan lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa. Pölyn ja kosteuden todettiin kuitenkin nostavan herkästi kalvon emissiviteettiä, jolloin saatava hyöty pienenee olennaisesti.

Koska ryömintätilan perusongelma on viileän maan vaikutus rakenteeseen kesällä, edellyttää tämän ongelman merkittävä vähentäminen/ poistaminen rakenteen muuttamista. Tyypillisen ryömintätilan vaihtoehtoina ovat tällöin hyvin ulkoilmaan tuulettuva alapohja (pilariperustus) sekä lämmin ryömintätilainen alapohja. Hyvin ulkoilmaan tuulettuvan alapohjan toiminta on lähellä täysin varjossa olevan ulkoseinän lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa. Lämpimän ryömintätilaisen alapohjan lämpö- ja kosteustekninen toiminta taas on lähellä lämmitetyn

kellarin käyttäytymistä. Tässä tutkimuksessa on kuitenkin keskitytty tyypillisen perusmuureilla ympäröidyn ryömintätilaisen alapohjan toimintaan vaikuttaviin tekijöihin ja rakenteen kosteusteknisen toiminnan parantamiseen.

Verrattaessa tuuletetun yläpohjan ja ryömintätilaisen alapohjan kosteusteknistä toimintaa toisiinsa ne eroavat monessa suhteessa toisistaan. Yläpohjassa on tyypillisesti alipainetta sisätiloihin nähden, joka ehkäisee mahdollisten epäpuhtauksien kulkeutumista yläpohjasta asuintiloihin. Alapohjassa paine-ero on päinvastainen, jolloin haitalliset aineet pyrkivät ilmavirtausten mukana sisäilmaan. Toisaalta tuulettuvassa kattoristikkoylepohjassa yläpohjan varsinaisen lämmöneristeen ulkopuolella on kantavia rakenneosia, joiden suojaaminen homeen kasvulta on rakenteellisesti haasteellisempaa kuin ryömintätilaisessa alapohjassa, jossa kantavat rakenteet voidaan sijoittaa kokonaan tai osittain lämmöneristekerroksen sisäpuolelle. Lisäksi yläpohjassa sen kosteustekniseen toimintaan vaikuttaa auringonsäteily/pitkäaaltoinen lämpösäteily taivaalle ja alapohjassa taas lisätekijänä on kostean maan vaikutus rakenteen toimintaan.

Radon

Radon aiheuttaa Suomessa lähes 300 keuhkosityöpätapausta vuosittain (Arvela et al. 2010 s. 19) ja on tupakoimisen jälkeen suurin keuhkosityövän aiheuttaja (WHO 2009). Tupakoitsijoilla radonista aiheutuva keuhkosityövän riski on suurempi kuin tupakoimattomilla (Asumisterveysohje 2003 luku 4). Radon on hajuton, mauton ja näkymätön radioaktiivinen jalokaasu ja sen pitoisuus sisäilmassa selviää vain mittaamalla (Arvela et al. 2012 s. 13). Sisäilman radonpitoisuuden ei tulisi ylittää arvoa 400 Bq/m^3 ja uusissa rakennuksissa radonpitoisuuden tulee olla alle 200 Bq/m^3 (Asumisterveysohje 2003 luku 4.1).

Suurin sisäilman radonin lähde on maaperän radonpitoinen huokosilma, jonne korkea radonpitoisuus syntyy maaperän mineraalien sisältämän uraanin hajotessa. Radonpitoisuus maaperän huokosilmassa on tavallisesti $20\,000\text{--}100\,000 \text{ Bq/m}^3$. Kokonaan betonielementeistä tehdyissä asunnoissa rakennusmateriaaleista erittyvä radon aiheuttaa tyypillisesti sisäilman radonpitoisuuden $20\text{--}70 \text{ Bq/m}^3$. Pientalossa, jossa vain lattialaatta on betonista, on lattialaatan vaikutus sisäilman radonpitoisuuteen alle 20 Bq/m^3 . Rakennusmateriaalit eivät tietävästi ole yksin aiheuttaneet enimmäisarvon 400 Bq/m^3 ylittäviä sisäilman radonpitoisuuksia. Asunnossa mahdollisesti käytettävä porakaivovesi voi myös nostaa huoneilman radonpitoisuutta. Porakaivoasunnoissa sisäilman ja talousveden radonpitoisuus suositellaan mitattavaksi.

Lämpötilaerot, tuuli ja rakennuksen koneellinen ilmanvaihto synnyttävät paine-eroja, joita ilmavirtaukset pyrkivät tasoittamaan. Ylipaine rakennuksessa estäisi radonpitoinen maan huokosilman pääsyn huonetilaan, mutta voi toisaalta aiheuttaa rakenteisiin kosteusongelmia sisäilmassa olevan ylimääräisen kosteuden siirtyessä ilmavirtausten mukana rakenteisiin. Suuri alipaine rakennuksessa kasvattaa puolestaan vuotoilmavirtaa alapohjan läpi, jolloin sisäilman radonpitoisuus nousee. Ilma virtaa helpommin karkearakeisempien maalajien (esim.

sora tai murske) läpi kuin tiiviimpien maalajien läpi (esim. hiesu tai savi). Toisaalta alapohjarakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta vaadittava kapillaarisen nousun katkaiseva kerros helpottaa vuotoilman virtausta. Tällöin alapohjan ilmatiiviys nousee ratkaisevaan asemaan sisäilman radonpitoisuuden hallinnassa. (Arvela et al. 2010)

Rakennuksen painesuhteet ja alapohjan ilmatiiviys vaikuttavat alapohjan läpi sisätiloihin tulevaan vuotoilmavirtaan. Rakennuksen alapohjan alapuolelle asennettava tuuletusjärjestelmä (radonputkisto) tai ryömintätilainen alapohja pienentävät rakennukseen tulevan vuotoilman radonpitoisuutta. Huonetilojen hyvä ilmanvaihto auttaa laskemaan sisätilojen radonpitoisuutta, kunhan tuloilma ei tule ilmavuotoina alapohjarakenteiden läpi, vaan asianmukaisia tuloilmareittejä pitkin. Maanvastaisessa laatussa epätiiviyskohdat mahdollistavat radonille suoran reitin maasta huoneilmaan. (RT 81-11099 2012) Ryömintätilaisissa rakennuksissa radonpitoisuudet ovat keskimäärin kaikkein alhaisimpia. Ryömintätilaisista rakennuksista enimmäisarvojen 200 Bq/m^3 ja 400 Bq/m^3 ylityksiä esiintyy erityisesti rakennuksissa, joissa sekä ryömintätilan ilmanvaihto että alapohjan ilmatiiviys ovat puutteellisia. Radontorjunnan kannalta suositellaan radonturvallisten perustustapojen käyttöönottoa, kuten ryömintätilaista alapohjaa tai reunavahvistettua laattaa. (Arvela et al. 2012)

Radonin sisäilmaan pääsyn estämisessä alapohjan ilmatiiviydestä on huolehdittava kaikkia rakenneratkaisuja käytettäessä. Ryömintätilaista alapohjaa suositellaan, koska siinä tuloilman radonpitoisuus laimenee ulkoilmaan tuulettumisen seurauksena. Ryömintätilaisen alapohjan tuuletusaukkojen koon tulee noudattaa niistä annettuja määräyksiä. Toisaalta ryömintätilainen alapohja on kosteusteknisesti haastava rakenne. Koneellinen poistoilmanvaihto voi synnyttää rakennukseen suuremman alipaineen koneelliseen tulo-poisto-ilmanvaihtoon verrattuna, jolloin maasta imettävän radonpitoisen vuotoilman määrä kasvaa.

6.5.2 Laskentatarkastelujen toteutus

Alapohjarakenteiden laskennalliset tarkastelut tehtiin rakenteiden kosteusteknisellä analysointimenetelmällä luvun 3 mukaisesti. Laskentaohjelmalla käytettiin yhdistettyä lämpö- ja kosteusteknistä laskentaohjelmaa Delphin 5.7.3, jonka tuloksia verifioitiin ryömintätilaisten alapohjien kenttämittausten avulla luvun 5.6 mukaisesti. Laskentaohjelmassa käytettiin mahdollisuuksien mukaan suomalaisista materiaaleista määritettyjä materiaaliominaisuuksia. (Laukkarinen 2012a).

Ryömintätilaisessa alapohjassa tutkittiin alapohjan lämmöneristyksen määrän, ryömintätilaan rajoittuvan materiaalin homehtumisherkkyuden, tuulensuojan lämmönvastuksen, tuulensuojan alapinnan emissiviteetin, rakenteen sisäpinnan vesihöyrynvastuksen, maan pinnalle laitettavan lämmöneristyksen tai muovikalvon, kapillaarikatkerroksen sekä alapohjan ilmanvaihtuvuuden vaikutusta nykyilmastossa sekä vuosien 2050 ja 2100 ilmastoissa.

Kaikki laskelmat on tehty käyttäen Jokioisen testivuosien ilmastodataa.

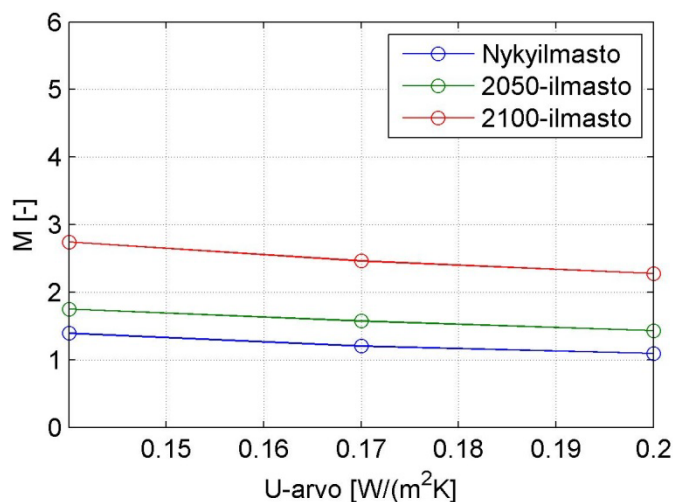
Pitkäaaltoinen lämpösäteily rakennuksen ja taivaan välillä on otettu huomioon alapohjarakenteiden laskentatarkasteluissa samalla tavoin kuin tuulettuvien yläpohjien laskentatarkasteluissa (ks. luku 6.4.2). Alapohjarakenteiden laskentatarkasteluissa ulkoseinän ja perusmuurin näkyvyyskerroin taivaalle oli 0,5 ja maahan 0,5. Rakennuksen ulkopuolella maanpinnan reunaehtoina laskennassa olivat ulkoilman olosuhteet. Lumen lämpöä eristävää vaikutusta ei otettu laskennassa huomioon, eikä myöskään lumen vaikutusta auringonsäteilyn heijastumiseen. Maanpinnan emissiviteettinä käytettiin arvoa 0,9 ja lyhytaaltoisen säteilyn absorptiokertoimena arvoa 0,6.

Ryömintätilassa pitkäaaltoisen säteilyn lämmönsiirto tapahtui pelkästään pystysuunnassa, näkyvyyskerroimella 1,0.

6.5.3 Tulokset

Ryömintätilan lattian ja maanpinnan väliin jää ulkoilmaan tuulettuva välitila. Ryömintätilan olosuhteita on mahdollista tarkastella joko tämän välitilan, ryömintätilan lattian tai molempien kannalta. Ryömintätilan kosteusteknistä toimintaa tarkasteltaessa on perusteltua erottaa toisistaan ryömintätilan ja lattiarakenteen kosteusteknisen toiminnan parantaminen.

Seuraavassa kuvassa on esitetty kevytrakenteisen ryömintätilan lattian alapinnan homeindeksi lattian eri U-arvoilla ja eri ilmastoissa. Lattiarakenteessa on mineraalivillaeriste ja tuulensuojana huokoinen puukuitulevy. Ryömintätilan ilmanvaihtuvuus on 1 1/h.



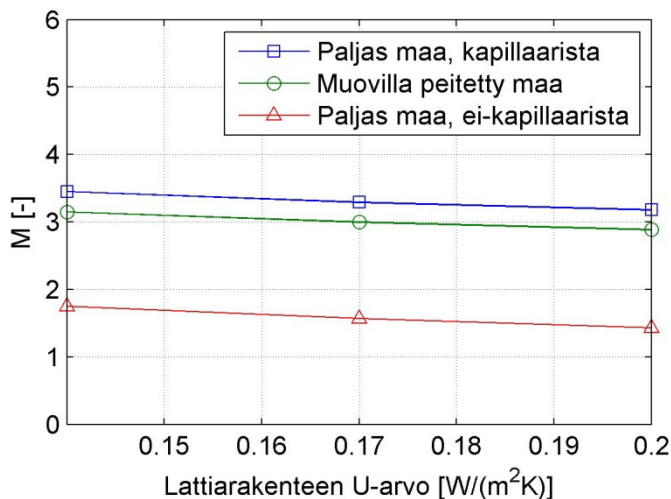
Kuva 6.5.1 Homeindeksin maksimiarvo (HHL2) ryömintätilaisessa alapohjassa tuulensuojan alapinnassa, kun lämmöneristeinä on käytetty mineraalivillaa (22 kg/m^3) ja ryömintätilan ilmanvaihtuvuus on 1 1/h.

Kuvassa 6.5.1 homeindeksin maksimiarvot on laskettu ryömintätilan reunan olosuhteiden perusteella. Laskentamallin tulokset ryömintätilan keskellä olivat rankemmat (homeindeksin maksimiarvot olivat n. 1–1,5 pykälää suurempia), mutta olosuhteet eivät olleet enää vertailukelpoisia kenttämittauksiin (ks. luku 5.6).

Alapuolelta solumuovilla eristetyin ontelolaatta-alapohjan tapauksessa lämmöneristeen alapinnan homeindeksin maksimiarvo (HHL3) on hieman alle yksi Jokioisen 2100 ilmastossa, kun lattian U-arvo on $0,14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ja ryömintätilan ilmanvaihtuvuus on $n = 1 \text{ 1/h}$. Rankoista olosuhteista huolimatta solumuovieristeen hyvä homehtumiskestävyys estää homeindeksiä nousemasta kuitenkin kovin korkealle.

Matalaemissiviteettipinta ($\varepsilon = 0,04$) kevytrakenteisen lattian alapinnassa nosti lattian alapinnan lämpötilaa verrokkirakenteeseen ($\varepsilon = 0,9$) verrattuna. Lämpötilan nousu oli $0,8\text{--}1,4 \text{ }^\circ\text{C}$ vuodenajasta riippuen Jokioisen 2050 ilmastossa. Tämä on laskenut suhteellista kosteutta lattian alapinnassa ja tällä tavoin laskenut myös homeindeksin maksimiarvoa ilmanvaihtuvuudesta riippuen $\Delta M_{\text{max}} \approx 0,1\text{--}1$.

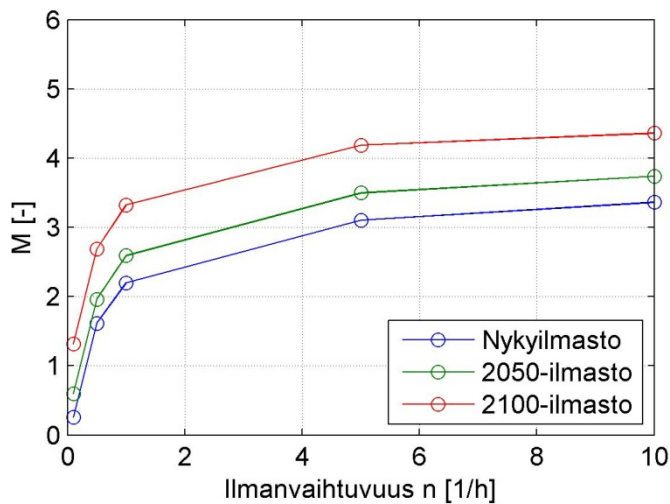
Seuraavassa kuvassa on esitetty tuulensuojalevyn alapinnan homeindeksi (HHL2), kun ryömintätilan maa on joko paljas tai se on peitetty kauttaaltaan muovilla. Paljaan maan tapauksessa maa-aines on joko kapillaarista tai ei-kapillaarista. Lattiarakenteessa on mineraalivillaa ja tuulensuojana huokoinen puukuitulevy. Ryömintätilan ilmanvaihtuvuus $n = 1 \text{ 1/h}$. Laskentavuotena on Jokioinen 2050.



Kuva 6.5.2 Homeindeksin maksimiarvo (HHL2) ryömintätilaisessa alapohjassa tuulensuojan alapinnassa, kun maan pinta on joko paljas tai se on peitetty muovilla ja maan pintakerroksena on käytetty joko kapillaarista tai ei-kapillaarista maa-ainesta. Lattiarakenteen lämmöneristeenä on käytetty mineraalivillaa ($22 \text{ kg}/\text{m}^3$) ja ryömintätilan ilmanvaihtuvuus on 1 1/h (Jokioinen 2050).

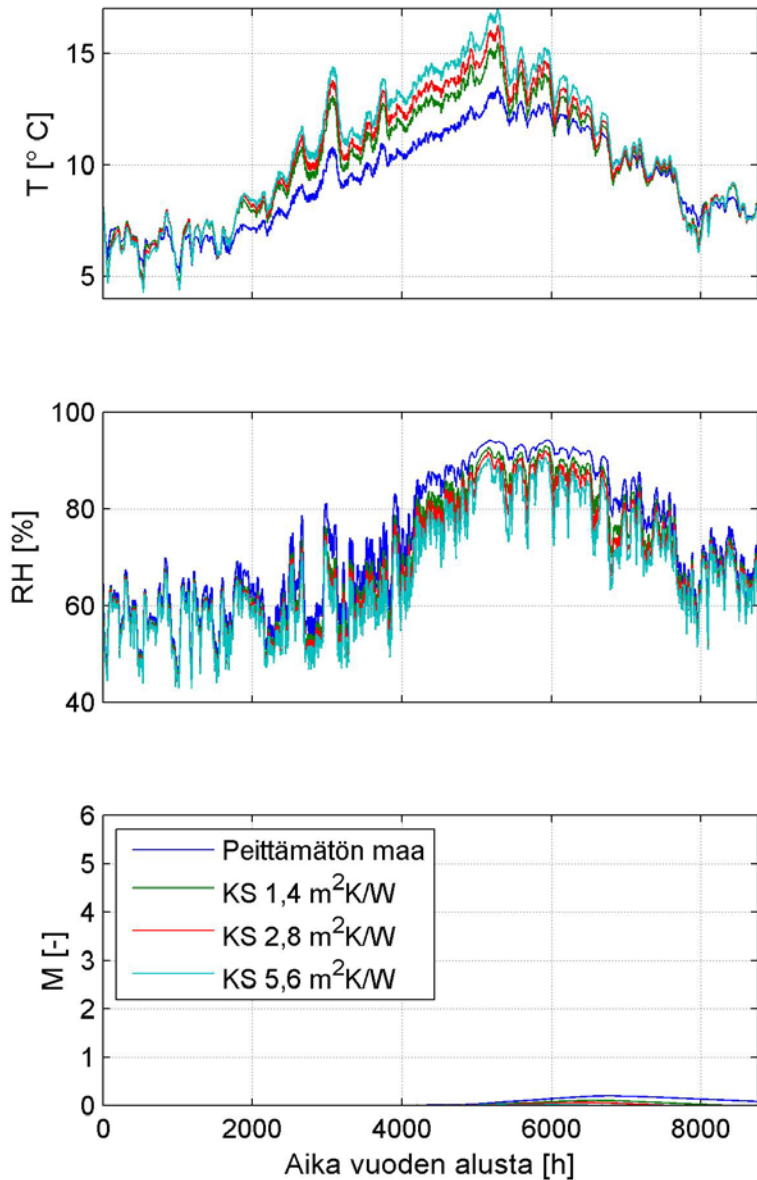
Kun peittämättömän maan pintakerros ei siirrä vettä kapillaarisesti, pystyy se kuivumaan hieman. Käytettäessä maan pinnassa kapillaarisesti vettä siirtämätöntä hiekkaa ($\mu = 15$) maan pinnan suhteellinen kosteus vaihteli talvikauden arvosta n. 80 % RH kesäkauden arvoon n. 90 % RH. Käytännössä hiekka on yleensä kapillaarista, mutta esimerkiksi sepelikerros voi toimia maan pinnalla ei-kapillaarisena kerroksena. Myös kuvan 6.5.2 Muovin alla suhteellinen kosteus oli lähes 100 % RH koko laskentajakson ajan. Maalajien kosteusteknisiä ominaisuuksia tulisi määrittää lisää käytettäväksi laskentatarkasteluissa.

Kuvassa 6.5.3 on tarkasteltu ryömintätilan ilmanvaihtuvuuden vaikutusta ryömintätilan olosuhteisiin, kun maan pinta on peitetty muovilla. Kuvassa tarkastellussa lattiarakenteessa on mineraalivillaeriste ja tuulensuojana huokoinen puukuitulevy. Kuvasta nähdään, että tässä tapauksessa ilmanvaihtuvuuden pienentäminen paransi tuulensuojan alapinnan olosuhteita. Erityisesti muutos ilmanvaihtuvuuden arvosta 0,5 1/h arvoon 0,1 1/h pienensi homeindeksin maksimiarvoa oleellisesti.



Kuva6.5.3 Ilmanvaihtuvuuden vaikutus tuulensuojan alapinnan homeindeksin maksimiarvoon (HHL2) ryömintätilaisessa alapohjassa, kun maan pinta on peitetty muovilla. Lattiarakenteen lämmöneristeenä on käytetty mineraalivillaa (22 kg/m^3) ja rakenteen U-arvo on $0,14 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

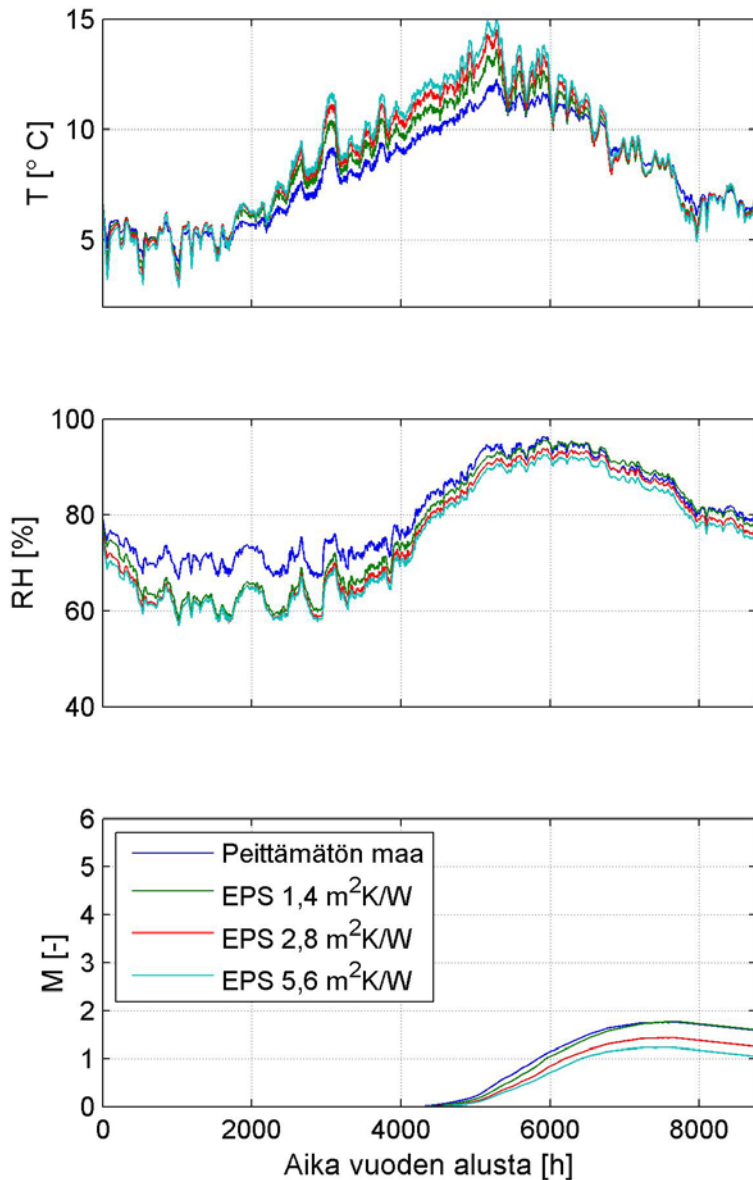
Kuvassa 6.5.4 on esitetty maan pinnan lämmöneristämisen vaikutus ryömintätilan olosuhteisiin kivirakenteisessa alapohjassa. Alapuolelta EPS-eristeellä lämmöneristetyin lattiarakenteen U-arvo on $0,14 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Maan pinnalla olevan kevytsoran lämmönvastus on joko $0 \text{ m}^2\text{K/W}$, $1,4 \text{ m}^2\text{K/W}$, $2,8 \text{ m}^2\text{K/W}$ tai $5,6 \text{ m}^2\text{K/W}$. Laskentavuotena on Jokioinen 2050.



Kuva 6.5.4 Maan pinnan lämmöneristämisen vaikutus ryömintätilaisen alapohjan lattian alapinnan olosuhteisiin. Alapuolelta EPS-eristetyin ontelolaatan U -arvo on $0,14 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ja ryömintätilan ilmanvaihtuvuus on 1 1/h . EPS-eristeen homeutumisherkkyyssluokka on HHL3 (Jokioinen 2050).

Kuvasta 6.5.4 havaitaan, että maan pinnan lämmöneristys nostaa ryömintätilan lämpötilaa ja laskee suhteellista kosteutta. Lämmöneristysten lisäämisen hyöty pienenee lämmöneristyspaksuuden kasvaessa. Vuoden 2050-ilmastossa alapohjarakenteen EPS-eristeen alapinnassa ei esiintynyt homeen kasvua riippumatta maanpinnan lämmöneristysten määrästä.

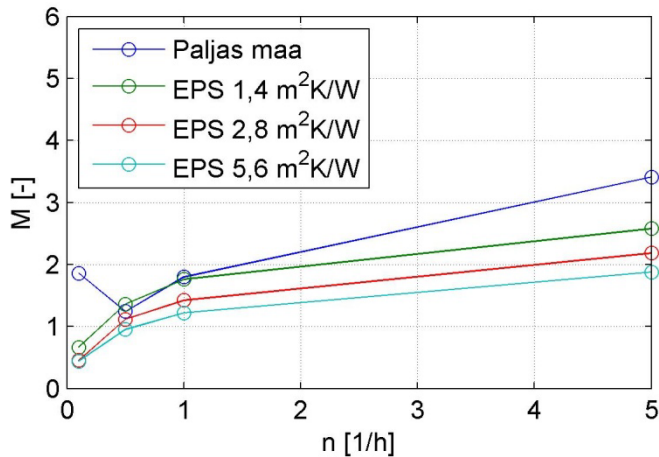
Kuvassa 6.5.5 on esitetty maan pinnan lämmöneristämisen vaikutus ryömintätilan olosuhteisiin kevytrakenteisessa alapohjassa. Mineraalivillalla lämmöneristetyin lattiarakenteen U -arvo on $0,14 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Lattian alapinnassa on 25 mm paksu huokoinen puukuitulevy. Maan pinnalla olevan EPS-eristeen lämmönvastus on joko $0 \text{ m}^2\text{K/W}$, $1,4 \text{ m}^2\text{K/W}$, $2,8 \text{ m}^2\text{K/W}$ tai $5,6 \text{ m}^2\text{K/W}$. Laskentavuotena on Jokioinen 2050.



Kuva 6.5.5 Maan pinnan lämmöneristämisen vaikutus ryömintätilaisen alapohjan lattian alapinnan olosuhteisiin lämmöneristeen kohdalla. Mineraalivillalla eristetyin lattiarakenteen alapinnassa on huokoinen puukuitulevy. Lattian U -arvo on $0,14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ja ryömintätilan ilmanvaihtuvuus on 1 1/h . Tuulensuojalevyn homeutumisherkkyyssluokka on HHL2 (Jokioinen 2050).

Kuvasta 6.5.5 voidaan todeta, että maanpinnan lämmöneristys nostaa myös kevytrakenteisen ryömintätilaisen alapohjan lämpötilaa ja laskee suhteellista kosteutta. Tässä tapauksessa homeindeksin maksimi-arvot nousevat kuitenkin yli 1 tuulensuojalevyn alapinnassa, koska huokoinen kuitulevy on herkempi homehtumaan kuin edellisessä kuvassa tarkasteltu EPS-eriste. Lämmöneristeen lisäämisellä maanpintaan voidaan tuulensuojalevyn alapinnan homeutumiseriskiä pienentää merkittävästi. Tässäkin tapauksessa lämmöneristystyksen lisäämisen hyöty pienenee kuitenkin lämmöneristyspaksuuden kasvaessa.

Seuraavassa kuvassa on esitetty maanpinnan lämmöneristämisen ja ryömintätilan ilmanvaihtuvuuden vaikutus tuulensuojalevyn alapinnan homehtumisriskiin kevytrakenteisessa mineraalivillaeristetyssä alapohjassa Jokioisen vuoden 2050 ilmastossa. Rakenteen tuulensuojana on käytetty huokoista puukuitulevyä.

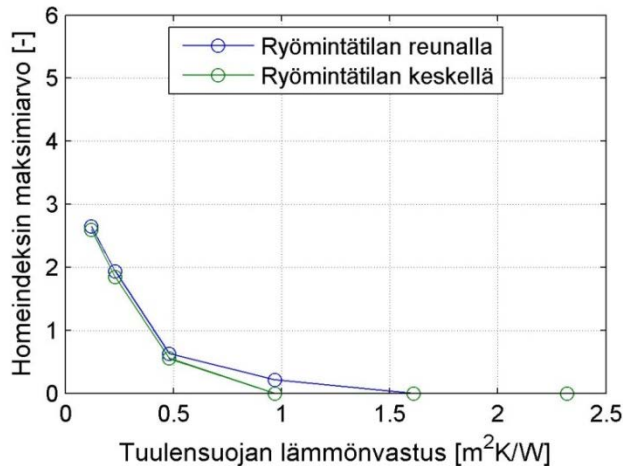


Kuva 6.5.6 *Maanpinnan lämmöneristuksen ja ilmanvaihtuvuuden vaikutus tuulensuojan alapinnan homeindeksin maksimiin (HHL2) ryömintätilaisessa alapohjassa, Lattiarakenteen lämmöneristeenä on käytetty mineraalivillaa (22 kg/m³) ja rakenteen U-arvo on 0,14 W/(m²K) (Jokioinen 2050).*

Maanpinnan lämmöneristys parantaa ryömintätilan olosuhteita. Myös ilmanvaihdon pienentäminen parantaa ryömintätilan olosuhteita, kun ryömintätilan kosteuskuorma maasta on minimoitu. Käytännössä maasta nousevaa kosteuskuormaa ei saada täydellisesti poistettua, joten ryömintätilaan tulee aina järjestää ilmanvaihto. Ilmanvaihdon tarve kasvaa, jos ryömintätila on tehty virheellisesti ja sinne pääsee ylimääräistä kosteutta sadeveden mukana tai kapillaarisesti maasta. Lisäksi on otettava huomioon radonin poiston tarvitsema ilmanvaihdon tarve.

Seuraavaksi tarkastellaan lattiarakenteen sisäosan olosuhteita eri tilanteissa. Lattiarakenteen tarkemmat tarkastelut on laskenta-ajan lyhentämiseksi tehty kevyemmällä kaksiulotteisella laskentamallilla, jossa on mallinnettuna lattiarakenne, ilmatila ja maanpinnan lämmöneristys. Perusmaan pintalämpötila otettiin suuremmasta laskentamallista reunaehdoksi kevyempään laskentamalliin. Maan suhteellinen kosteus asetettiin arvoon 100 % RH.

Seuraavassa kuvassa on esitetty lattiapalkin alapinnan homeindeksin maksimiarvo puurakenteisessa ryömintätilaisessa alapohjassa eri tuulensuojan lämmönvastuksen arvoilla. Ryömintätilan ilmanvaihtuvuus on 1 1/h ja maanpinnalla on EPS-lämmöneristettä 50 millimetriä. Kolme pienintä lämmönvastuksen arvoa 0,12 m²·K/W, 0,23 m²·K/W ja 0,48 m²·K/W on laskettu käyttäen tuulensuojana huokoista puukuitulevyä. Kolme suurempaa lämmönvastuksen arvoa 0,97 m²·K/W, 1,61 m²·K/W ja 2,42 m²·K/W on laskettu käyttämällä laskennassa mineraalivillatuulensuojaa.



Kuva 6.5.7 Tuulensuojan lämmönvastuksen vaikutus lattiapalkin ulkopinnan homeindeksin maksimiarvoon (HHL1) ryömintätilaisessa alapohjassa, Lattiarakenteen lämmöneristeenä on käytetty mineraalivillaa (22 kg/m^3) ja rakenteen U -arvo on $0,14 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ Ryömintätilan ilmanvaihtuvuus on 1 l/h ja maanpinnalle on laitettu 50 mm paksu EPS-lämmöneriste ($R = 1,4 \text{ m}^2\text{K/W}$) (Jokioinen 2050).

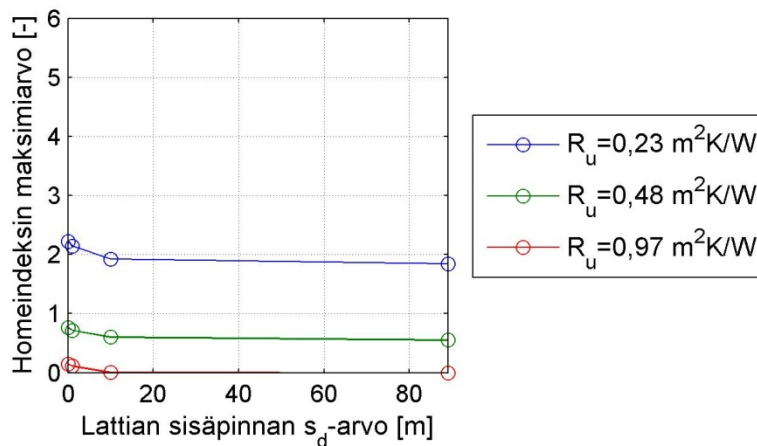
Kuten kuvasta 6.5.7 huomataan, tuulensuojan lämmöneristykseen lisääminen lattiapalkin alapuolella parantaa puurakenteen kosteusteknistä toimintaa merkittävästi jo varsin pienillä lämmönvastuksen arvoilla.

Laskennan yhteydessä verrattiin myös palkin ja mineraalivillan alapintojen homeindeksien arvoja toisiinsa. Jos rakenteen alapinnassa käytetään mineraalivillan kanssa saman homehtumisherkkyyden luokan tuulensuojalevyä (HHL3), jää homeindeksin maksimiarvo lattiapalkkien välissä, mineraalivillan alapinnassa arvoon $M_{\max} = 0,5$. Tässä tarkastelussa tuulensuojan lämmönvastus oli $0,23 \text{ m}^2\text{K/W}$ ja sisäpinnan vesihöyrynvastus $s_d = 0,1 \text{ m}$. Kuvasta 6.5.7 voidaan todeta, että tällöin kriittisempi kohta rakenteessa on lattiapalkin alapinta, jossa homeindeksin maksimiarvo ylittää lähelle arvoa $M_{\max} = 2,0$.

Toisessa laskentavaihtoehdossa tuulensuojana käytettiin homehtumisherkkyyden luokan HHL2 mukaista 25 mm paksua huokoista puukuitulevyä, jonka lämmönvastus oli $0,48 \text{ m}^2\text{K/W}$. Tällöin lattiapalkkien välissä, mineraalivillan alapinnassa homeindeksin maksimiarvo oli korkeampi ($M_{\max} = 1,7$), kuin puisen lattiapalkin alapinnan homeindeksi ($M_{\max} = 0,6$, ks. kuva 6.5.7). Tämä laskentatulokset johtuu siitä, että lattiapalkki ulottui yhtenäisenä alapohjarakenteen eristekerroksen läpi, jolloin sisältä tuleva lämpö johtui palkkia pitkin paremmin rakenteen alapintaan ja alensi homeindeksiä. Yleensä puurakenteisessa ryömintätilaisessa alapohjassa käytetään kuitenkin ristiinkoolattua puurunkoa, jolloin lattiapalkin alapinta viilenee ja homehtumisriski siinä kasvaa. Tällöin palkin alapinnan homeindeksi homehtumisherkkyyden luokalla HHL1 tarkasteltuna on todennäköisesti suurempi kuin mineraalivillan alapinnan homeindeksi.

Seuraavassa kuvassa on esitetty lattian sisäpinnan höyrynsulun vesihöyrynvastuksen vaikutus lattiapalkin alapinnan homeindeksiin eri tuulensuojalevyjä käytettäessä. Ryömintätilan

ilmanvaihtuvuus on 1 1/h. Sisäpinnan höyrynsulun s_d -arvoina on käytetty tarkastelussa 0,1 m, 1 m, 10 m ja 89 m.



Kuva 6.5.8 Lattian sisäpinnan höyrynsulun vesihöyrynvastuksen ja tuulensuojan lämmönvastuksen vaikutus lattiapalkin ulkopinnan homeindeksin maksimiarvoon (HHL1) ryömintätilaisessa alapohjassa, Lattiarakenteen lämmöneristeenä on käytetty mineraalivillaa (22 kg/m^3) ja rakenteen U -arvo on $0,14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ Ryömintätilan ilmanvaihtuvuus on 1 1/h ja maanpinnalle on laitettu 50 mm paksu EPS-lämmöneriste ($R = 1,4 \text{ m}^2\text{K/W}$) (Jokioinen 2050).

Kuvasta 6.5.8 huomataan, että sisäpinnan höyrynsulun vesihöyrynvastuksen arvolla ei ole kovin suurta vaikutusta lattiapalkin homehtumisriskiin tarkastelluilla tuulensuojan lämmönvastuksen arvoilla. Sisäpinnan vesihöyrynvastuksen merkitys kasvaa tosin sitä enemmän, mitä pienempi tuulensuojan lämmönvastus on. Toisaalta palkin alapinnassa on tällöin homehtumisriski myös suuren vesihöyrynvastuksen omaavalla höyrynsululla, joten käytännössä rakenteen kosteusteknisen toiminnan parantamiseksi on oleellista lisätä nimenomaan tuulensuojan lämmönvastusta.

6.5.4 Tulosten tarkastelu

Ryömintätilan olosuhteet olivat kriittisimmät kesällä, jolloin ryömintätilan lämpötila oli ulkoilmaa alhaisempi. Ryömintätilan keskialue on hieman reunoja viileämpi kesällä. Laskentamallin tuottamat tulokset ryömintätilan reunalta vastasivat kuitenkin parhaiten olosuhteita mitatuissa kohteissa, joten laskentatulokset on esitetty ryömintätilan reunan olosuhteiden perusteella. Laskennassa ryömintätilan vesihöyrypitoisuudet olivat samaa luokkaa ryömintätilan keskellä ja reunalla, mutta lämpötila oli kesällä alhaisempi ryömintätilan keskellä ja täten suhteellinen kosteus oli korkeampi.

U -arvojen kiristäminen ja ilmastonmuutos lisäävät homehtumisriskiä ryömintätilaisissa alapohjissa. Olosuhteiden hallinta on haastavaa maan suuren lämpökapasiteetin vuoksi.

Ryömintätilan maanpinnalla tulee käyttää veden kapillaarisen nousun katkaisevaa kerrosta, esimerkiksi sepeliä. Tällaisen kerroksen käyttö alentaa ryömintätilan homehtumisriskiä merkittävästi. Maanpinnalle asetettavasta muovista on hyötyä silloin, kun kosteustuotto

maasta on suuri. Kun maan pintakerros oli veden kapillaarisen nousun katkaisevaa, heikensi muovin käyttö ryömintätilaisen alapohjan olosuhteita. Olosuhteet muovin alapuolella ovat erittäin otolliset homeen kasvulle ja siksi sen käyttö ei ole suositeltavaa maanpinnalla ryömintätilaisessa alapohjassa.

Ilmanvaihtuvuuden pienentäminen paransi ryömintätilaisen alapohjan olosuhteita, kun maanpinta oli peitetty vesihöyryn kulkua vastustavalla kerroksella. Jos maanpinta oli paljas, alkoivat olosuhteet muuttua taas kriittisemmiksi aivan pienillä ryömintätilan ilmanvaihtuvuuksilla.

Maanpinnan lämmöneristys pienentää kylmän maan vaikutusta kesäaikana nostaen ryömintätilan lämpötilaa ja parantaen sen kosteusteknistä toimintaa. Kuvan 6.5.6 perusteella lattian alapinnan olosuhteet paranevat tarkastelluista tapauksista parhaiten, mitä enemmän maanpintaa lämmöneristetään (lämmönvastuksen arvo $5,6 \text{ m}^2\text{K/W}$ oli suurin tarkasteltu tapaus) ja mitä pienempi ryömintätilan ilmanvaihtuvuus on. Laskentatulokset alkavat tällöin lähestyä lämpimän ryömintätilaisen alapohjarakenteen toimintaa, jossa lämmöneriste on siirretty lattiasta ryömintätilan ympärille. Ilmanvaihdon pienentäminen voi toimia vain, jos ryömintätilaan ei kohdistu muita merkittäviä kosteuslähteitä ulkoilman lisäksi. Lämpimään ryömintätilaankin tulee aina järjestää ilmanvaihto.

Vaikka ohuin tarkasteltu maanpinnan lämmöneristekerros ei riitä kaikissa tapauksissa parantamaan ryömintätilan olosuhteita riittävästi homeindeksin kannalta tarkasteltuna, se kuitenkin parantaa ryömintätilan olosuhteita korkean suhteellisen kosteuden esiintymistä tarkasteltaessa. Tästä syystä olisi suositeltavaa lämmöneristää ryömintätilan maanpinta esimerkiksi $1,5\text{--}3,0 \text{ m}^2\text{K/W}$ lämmöneristekerroksella. Kevytsoralämmöneristeen etuna on sen kosteuskapasiteetti ja toisaalta solumuovieristeen etuna sen kyky vähentää vesihöyryn diffuusiota maasta ryömintätilaan. Lattiarakenteessa käytettävä hygroskoopainen tuulensuoja auttoi säätelemään suhteellisen kosteuden heilahteluja jonkin verran tuulensuojan alapinnassa. Toisaalta solumuovieristeen hyvä homeensietokyky tiputti lasketut homeindeksin arvot lähelle nollaa.

Tarkastelluissa tapauksissa lattian lämmöneristekerroksen sisäpinta ei ollut homeen kasvun kannalta kriittinen piste.

Käytetty kolmen vuoden laskenta-aika ei ole kaikissa tapauksissa ehtinyt tasoittamaan laskentamallin vuosittaista vaihtelua, vaan esimerkiksi lämpötilat ovat vielä olleet muutoksessa. Lämpötilojen tasaantumista ja laskenta-ajan kasvattamista pyrittiin hallitsemaan testitarkastelujen avulla, joilla etsittiin maan lämpötilaa, joka olisi valmiiksi lähellä laskennan lopputulosta. Vaihtelujen ollessa pieniä tämä ei kuitenkaan riittänyt, vaan joko alkuolosuhteiden määrittäminen olisi pitänyt tehdä tarkemmin tai laskennan kesto pidentää. Kaiken kaikkiaan laskenta-ajan vaikutus ei todennäköisesti ole vaikuttanut laskentatulosten yleisiin linjoihin, mutta se tuo hieman epävarmuutta niiden tarkkaan tasoon. Kaikissa tapauksissa laskenta-aika on ollut sama, mikä parantaa eri laskentatapausten vertailtavuutta.

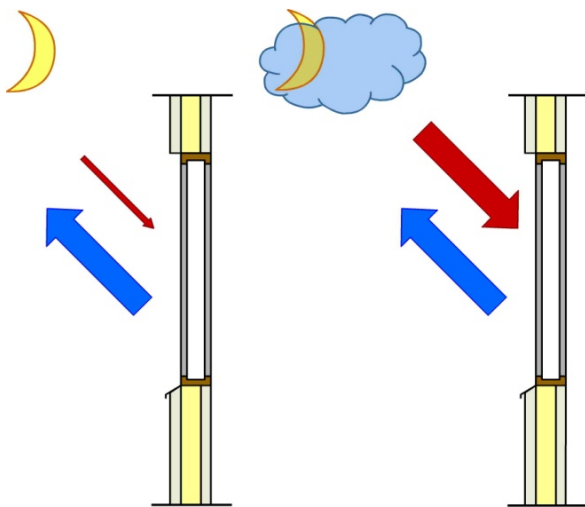
Pelkille lattiarakenteille tehtyjen tarkastelujen perusteella kantavat puupalkit tulisi suojata alapuolelta tuulensuojalla, jonka lämmönvastus on vähintään $0,4 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$, kun maanpinnalla on solumuovieriste, jonka lämmönvastus on $1,4 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ (50 mm paksu EPS-lämmöneriste). Rakenteen sisäpinnan vesihöyrynvastuksen pienentäminen lisäsi homeindeksiä tarkastelluissa tapauksissa vain vähän. Kuitenkin tässäkin rakenteessa sisäpinnan vesihöyrynvastuksen on syytä olla vähintään viisinkertainen tuulensuojan vesihöyrynvastukseen verrattuna (1:5-sääntö).

6.6 Ikkunat

6.6.1 Yleistä

Parannettaessa vaipparakenteiden lämmöneristävyttä on samalla pienennetty myös ikkunoiden johtumislämpöhäviöitä. Ikkunan lämmöneristävyden parantaminen vähentää sisätiloista ulos kulkeutuvan lämpövirran määrää ja alentaa tätä kautta ikkunan ulkopinnan lämpötilaa. Ikkunan ulkopinnan lämpötilaa alentaa myös ikkunan pinnasta lähtevä pitkäaaltoinen lämpösäteily. Kirkkaalla pilvettömällä säällä ikkunan ulkopinnasta lähtee pitkäaaltoista lämpösäteilyä taivaalle enemmän kuin sitä tulee taivaalta ikkunan pintaan. Yöaikaan, jolloin ikkunaan ei kohdistu lyhytaaltoisen auringonsäteilyn lämmittävää vaikutusta, tämä ilmiö voi laskea ikkunan ulkopinnan lämpötilan jopa ulkoilman lämpötilaa alemmaksi (kuva 6.6.1). Pilvisellä säällä ikkunaan tulevan ja siitä lähtevän pitkäaaltoisen lämpösäteilyn määrät ovat suurin piirtein yhtä suuret, jolloin pitkäaaltoisella säteilyllä ei ole merkittävää vaikutusta ikkunan ulkopinnan lämpötilaan.

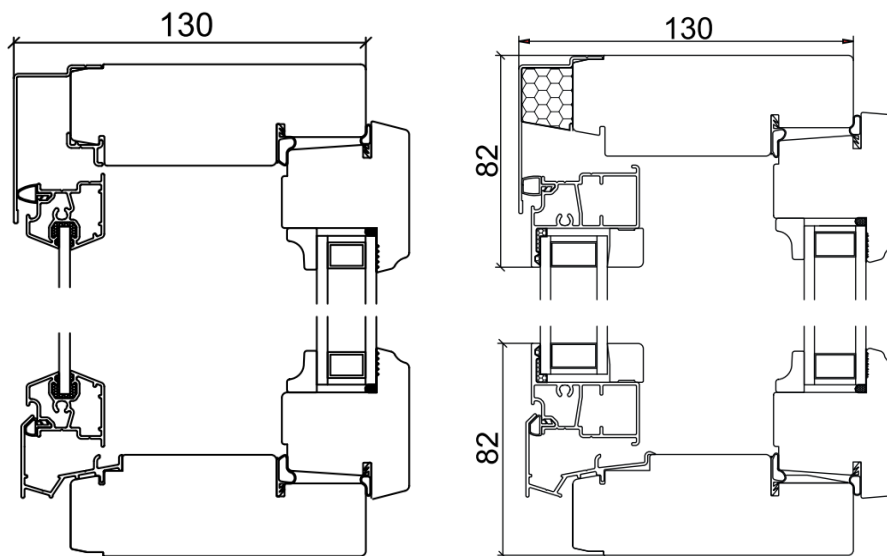
Ulkopinnan lämpötilan laskiessa alle ulkoilman kastepistelämpötilan ikkunan ulkopintaan kondensoituu tai jäätyy vesihöyryä. Ilmiö esiintyy pääasiassa uusissa, hyvin lämpöä eristävissä ikkunoissa. Ilmiö ei vahingoita ikkunarakennetta, mutta se haittaa näkyvyyttä ulos.



Kuva 6.6.1 Ikkunan pinnan ja taivaan välisen pitkäaaltoisen lämpösäteilyn määrän vaihtelu kirkkaana ja pilvisenä yönä.

Ikkunan ulkopinnan kondensoitumiseen vaikuttaa vallitsevien sääolosuhteiden lisäksi ikkunan edessä olevat varjostukset, jotka rajaavat näkymää taivaalle. Kondensoituminen on voimakkainta, jos ikkunan edusta on täysin avoin. Mikäli ikkunan edessä on runsaasti puustoa, lähistöllä on muita rakennuksia tai ikkunan edessä on muita varjostavia rakenteita, lähtevän lämpösäteilyn määrä on alhaisempi ja kondensoituminen vähäisempää.

Uudet, hyvin lämpöä eristävät ikkunat poikkeavat perinteisistä kaksi- ja kolmilasisista ikkunoista siten, että ne ovat kolme- tai nelilasisia ja niissä on eristyslaselementti sekä selektiivipinnoite. Kuvassa 6.6.2 esitetään nykyisin käytössä olevien ikkunoiden poikkileikkauksia.

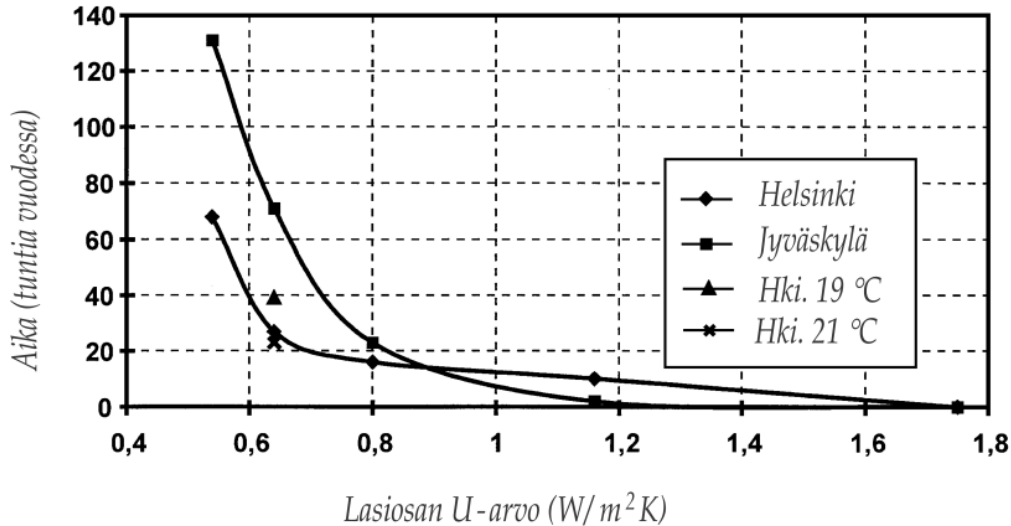


Kuva 6.6.2 MSE-tyyppinen kolmilasinen ikkuna ja MS2E-tyyppinen nelilasinen ikkuna. (RT 38099, 2011)

Kahden tai kolmen lasin elementti on tyypillisesti sisäpuiteessa, ja ulkopuiteessa on yksi tai kaksi lasia. Karmirakenne on yleisimmin kokopuinen.

Aikaisemmat tutkimukset

VTT on tutkinut ikkunan ulkopinnan kondensoitumista yksinkertaisella laskentatarkastelulla. Laskennassa ei kuitenkaan ollut mukana mittautietoja pilvisyydestä. Kuvassa 6.6.3 esitetään vuotuiset kondenssitunnit VTT:n tutkimuksessa (Hemmilä & Heimonen 1997).



Kuva 6.6.3 Vuotuiset kondenssitunnit VTT:n tutkimuksessa. (Hemmilä & Heimonen 1997)

VTT:n tutkimuksessa vuosittaiset kondenssitunnit ovat melko vähäisiä alhaisillakin lasiosan U-arvoilla. Lasiosan U-arvon ollessa alle $0,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ kondenssitunteja on Jyväskylässä alle 140 h ja Helsingissä alle 80 h. Laskennassa on käytetty vuoden 1979 säätietoja Helsingistä ja Jyväskylästä (Hemmilä & Heimonen 1997). Vuosittaiset vaihtelut kondenssimäärissä voivat olla kuitenkin erittäin suuria, joten kondenssiriskiä on melko vaikeaa arvioida yksittäisen vuoden säätietojen perusteella.

Ruotsalaisessa tutkimuksessa (Jonsson 1999) määritettiin ikkunan ulkopinnan kondensoitumista laskennallisten tarkastelujen avulla. Tutkimuksessa käytettiin säätietoina Tukholman tunnittaisia mittausrvoja vuosilta 1988–1992. Säasuureina oli ulkoilman lämpötila ja kosteus, pitkäaaltoinen säteily sekä tuulen nopeus. Laskentamalli ei ottanut huomioon ilmansuunnan vaikutusta. Tarkasteluissa ikkunan U-arvona käytettiin arvoa $U = 1,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ja näkyvyyskertoimenä taivaalle $F = 0,5$. Taulukossa 6.6.1 esitetään laskentatarkastelussa saadut tulokset.

Taulukko 6.6.1 Laskennallisesti määritetyt kondenssitunnit (Jonsson 1999).

Vuosi	Kondenssitunnit [h]	
	Yhteensä	Päiväaikaan
1988	403	41
1989	450	101
1990	435	63
1991	400	39
1992	242	26

Tampereen teknillisessä yliopistossa tehdyssä tutkimuksessa vertailtiin kerrostalossa kahden erityyppisen ikkunan kondenssiriskiä (Vinha & Lähdesmäki 2008). Ikkunat sijaitsivat rakennuksen pohjoisjulkisivulla. Keittion MSE-ikkunan lasiosan U-arvo oli $1,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ja makuuhuoneen MS2E-ikkunan vastaavasti $0,65 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (ks. kuva 6.6.2). Tutkimuksessa

mitattiin ikkunoiden ulkopinnan lämpötilaa sekä ulkoilman lämpötila- ja RH-olosuhteita vajaan vuoden ajan (1.5.2007–3.4.2008).

Ikkunat olivat ns. tuloilmaikkunoita, jolloin ilmanvaihdon korvausilma voitiin johtaa sisälle tarvittaessa ikkunoiden välitilan kautta osittain esilämmitettynä. Edellä mainitulla mittausjaksolla korvausilma otettiin ikkunoiden välistä ajanjaksoilla 1.5.–28.11.2007 ja 13.3.–3.4.2008. Talvijaksolla 28.11.2007–13.3.2008 ilmanvaihdon korvausilma otettiin ikkunoiden yläkarmissa olleen korvausilmaventtiilin kautta. Mittaustulosten perusteella laskettiin ulkopinnan kondenssituntien määrät niistä ajanjaksoista, jolloin ulkopinnan lämpötila oli alle ulkoilman kastepistelämpötilan. Taulukossa 6.6.2 esitetään tutkimuksessa saadut mittaustulokset.

Taulukko 6.6.2 Ikkunoiden kondenssiaika tunteina mittausjaksolla 31.5.2007–3.4.2008 laskettuna ajanjaksoista jolloin ikkunoiden ulkopinnan lämpötila oli alle ulkoilman kastepistelämpötilan. Keittiön MSE-ikkunan lasiosan U -arvo oli $1,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ja makuuhuoneen MS2E-ikkunan $0,65 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. (Vinha & Lähdesmäki 2008)

Laskentatapa	Kondenssiaika [h]			
	Keittiön ikkuna, keskellä (B)	Keittiön ikkuna, alareuna (D)	Makuuhuoneen ikkuna, keskellä (B)	Makuuhuoneen ikkuna, alareuna (D)
Jään yli kaavalla laskettuna	0,75	97	172	251
Veden yli kaavalla laskettuna	0,25	37	85	146
Keskiarvo (jään ja veden yli arvoista)	0,5	67	128	198

Mittaustulosten perusteella kondenssituntien määrä oli jonkin verran tässä tutkimuksessa saatuja arvoja pienempi. Tähän vaikuttaa eri tarkasteluvuosien lisäksi mm. ikkunoiden näkyvyyttä taivaalle peittävät puut ja rakennukset.

Tutkimuksessa havaittiin myös, että ikkunan toimiminen tuloilmaikkunana lisää merkittävästi ulkolasin ulkopinnan kondensoitumisjaksojen lukumäärää (Vinha & Lähdesmäki 2008). Tämä on luonnollista, koska korvausilman otto ikkunalasien välistä jäädyttää ikkunan ulkopintaa entisestään.

6.6.2 Taivaan tehollisen lämpötilan määrittäminen

Lasin ulkopintaan kondensoituu kosteutta, kun ulkoilman vesihöyrypitoisuus on suurempi kuin ikkunan ulkopinnan kyllästyskosteuspitoisuus. Ikkunoiden ulkopintojen kyllästyskosteudet määritettiin IDA-ICE 4.2 simulointiohjelmalla lasketuista ulkopintojen lämpötiloista. Ulkoilman vesihöyrypitoisuudet laskettiin ulkoilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden avulla. Laskennassa käytettiin kaavaa, joka laskee ilman vesihöyrypitoisuuden ns. veden yli olevassa tilanteessa eli silloin, kun maan ja veden pinta ovat sulia.

Vesihöyryn kyllästyspaine voidaan laskea kaavalla (Hyland & Wexler 1983):

$$\begin{aligned} \ln(p_{v,\text{sat}}) = & -0,58002206 \cdot 10^4 T^{-1} + 0,13914993 \cdot 10^1 \\ & -0,48640239 \cdot 10^{-1} T + 0,41764768 \cdot 10^{-4} T^2 \\ & -0,14452093 \cdot 10^{-7} T^3 + 0,65459673 \cdot 10^1 \ln(T) \end{aligned} \quad (6.6.1)$$

Koska kondenssin muodostumiseen ikkunan ulkopintaan vaikuttaa oleellisesti ikkunan ja taivaan välinen pitkäaaltoinen lämpösäteily, on tässä tarkastelussa ollut tarpeen ottaa huomioon myös tämän tekijän vaikutus muiden säähavaintojen lisäksi. Ikkunatarkasteluissa käytetyssä IDA-ICE -ohjelmassa ikkunan pinnan ja taivaan välinen pitkäaaltoinen nettosäteily otetaan huomioon taivaan tehollisen lämpötilan avulla. Jos taivaan tehollinen lämpötila on alempi kuin ikkunan ulkopinnan lämpötila, ikkunasta lähtee taivaalle enemmän pitkäaaltoista lämpösäteilyä kuin sieltä tulee takaisin ja tällöin ikkunan ulkopinnan lämpötila laskee. Ilmiön vaikutus on suurin pilvettöminä öinä, kuten edellä jo todettiin.

Taivaan tehollisen lämpötilan määrittämiseen käytettiin tässä tutkimuksessa kahta eri menetelmää, koska käytettyihin mittaustietoihin ja laskentaratkaisuihin liittyi useita epävarmuustekijöitä. Menetelmässä a taivaan tehollinen lämpötila laskettiin kokonaissäteilytaseen avulla ja menetelmässä b alaspäin suuntautuvan pitkäaaltoisen säteilyn avulla. Menetelmällä a oli mahdollista verrata myös eri vuosien kriittisyyttä toisiinsa, koska kokonaissäteilytaseen arvoja on mitattu useina vuosina.

Ilmatieteen laitos on mitannut taivaan ja maan välistä kokonaissäteilytasetta kahdella havaintoasemalla: Jokioisissa ja Sodankylässä. Kokonaissäteilytaseessa on mukana sekä lyhyt- että pitkäaaltoinen säteily. Kokonaissäteilytaseen mittausravoihin on tarpeen tehdä manuaalisesti korjauksia, jotka ilmatieteen laitos on tehnyt vuoteen 2000 asti. Tämän jälkeen näitä korjauksia ei ole tehty systemaattisesti, minkä johdosta tarkastelussa käytettiin mittausdataa vuosilta 1980–1999 määritettäessä ikkunoiden kondensoitumisen kannalta kriittisiä vuosia. Tarkastelussa haluttiin selvittää myös sitä, kuinka kriittinen rakennusfysikaalinen testivuosi Jokioinen 2004 on taivaalle lähtevän pitkäaaltoisen nettosäteilyn osalta, ja sen vuoksi Ilmatieteen laitos määrittä tälle vuodelle erikseen korjatut kokonaissäteilytaseen arvot.

Menetelmässä a taivaan tehollisen lämpötilan määrittäminen perustuu maan ja taivaan välisen pitkäaaltoisen lämpösäteilyn taseen tarkasteluun. Jos tarkastellaan pientä aluetta maanpinnalla, voidaan maanpinnan ja taivaan välistä pitkäaaltoista lämpösäteilyä kuvata mallilla, jossa pieni pinta on suuremman sisällä. Tällöin maanpinnan ja taivaan välinen pitkäaaltoisen säteilyn tase voidaan laskea kaavalla (Incropera & DeWitt 2002):

$$R_{\text{bal,LW}} = \sigma \varepsilon_{\text{surf}} (T_{\text{sky}}^4 - T_{\text{surf}}^4) \quad (6.6.2)$$

missä

$R_{\text{bal,LW}}$ on pitkäaaltoisen säteilyn tase [W/m^2]

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

ϵ_{surf}	on maanpinnan emissiviteetti [-]
T_{sky}	on taivaan tehollinen lämpötila [K]
T_{surf}	on maanpinnan lämpötila [K]

Yhtälössä 6.6.2 oletetaan tarkasteltavaan pintaan tuleva säteily (tässä tapauksessa maanpinta) positiiviseksi. Sama oletus tehdään IDA-ICE -ohjelman laskennassa myös lyhytaaltoisen auringonsäteilyn osalta. Edellä esitetystä yhtälöstä voidaan ratkaista taivaan tehollinen lämpötila kaavalla:

$$T_{\text{sky}} = \sqrt[4]{\frac{R_{\text{bal,LW}}}{\sigma \epsilon_{\text{surf}}} + T_{\text{surf}}^4} \quad (6.6.3)$$

Jotta laskentakaavaan saadaan pitkäaaltoisen säteilyn tase, on mitatuista kokonaissäteilyn arvoista poistettava lyhytaaltoisen auringonsäteilyn osuus. Tämä on tarpeellista myös sen vuoksi, että IDA-ICE -ohjelmassa lyhytaaltainen auringonsäteily otetaan huomioon jo muiden suureiden avulla: suorana säteilynä sädettä vastaan kohtisuoralle pinnalle ja diffuusina säteilynä vaakasuoralle pinnalle. Näin ollen taivaan tehollisessa lämpötilassa mukana oleva lyhytaaltainen säteily otettaisiin laskennassa huomioon kahteen kertaan.

Menetelmässä a lyhytaaltoisen säteilyn osuus pyrittiin poistamaan kokonaissäteilyn arvoista muuttamalla taivaan tehollista lämpötilaa niin, ettei se nouse ulkoilman lämpötilaa korkeammaksi. Oletus, että taivaan tehollinen lämpötila on enintään ilman lämpötilassa pitää pääosin paikkansa hetkellisiä inversiotilanteita lukuun ottamatta. Maanpinnan lämpötilaa ei myöskään tiedetty tarkasti, vaan sen tilalla käytettiin kahden metrin korkeudesta mitattua ilman lämpötilaa. Maanpinnan lämpötila voi poiketa hetkellisesti paljonkin ilman lämpötilasta, mutta maanpinnan lämpötilaa ei ollut tekohetkellä saatavilla kaikille kokonaissäteilytaseen avulla tarkastelluille vuosille. Näin ollen taivaan tehollisen lämpötilan laskenta perustui menetelmässä a kaavaan:

$$T_{\text{sky}} = \sqrt[4]{\frac{R_{\text{bal}}}{\sigma \epsilon_{\text{surf}}} + T_{\text{e,2m}}^4} \leq T_{\text{e}} \quad (6.6.4)$$

missä

T_{sky}	on taivaan tehollinen lämpötila [K]
R_{bal}	on kokonaissäteilytase (pitkä- ja lyhytaaltoisen säteilyn tase) [W/m^2]
σ	on Stefan-Boltzmannin vakio ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$)
ϵ_{surf}	on maanpinnan emissiviteetti [-] (laskennassa käytettiin arvoa 0,95)
$T_{\text{e,2m}}$	on ulkoilman lämpötila kahden metrin korkeudessa [K]
T_{e}	on ulkoilman lämpötila [K]

Menetelmää b varten Ilmatieteen laitos määrittä ilmakehästä maanpinnalle tulevan pitkäaaltoisen lämpösäteilyn arvoja Jokioisissa 2004 ja Vantaalla 2007 ns. Tiesäämallin avulla (Kangas et al. 2006). Nämä arvot on määritetty laskennallisesti manuaalisten

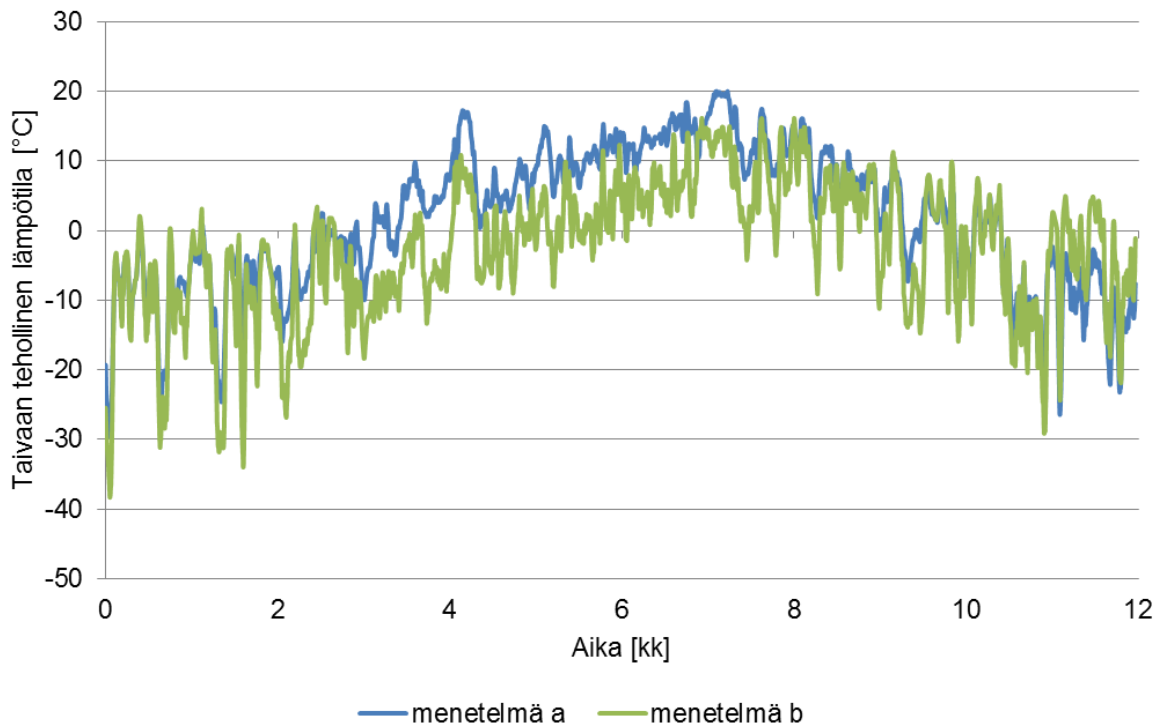
pilvisyyshavaintojen avulla käyttäen Brutsaertin (1982) menetelmää (ks. Venäläinen et al. 1998). Menetelmässä b taivaan tehollinen lämpötila voidaan laskea pitkäaaltoisen säteilyn arvoista kaavalla:

$$T_{\text{sky}} = \sqrt[4]{\frac{R_{\text{LDown}}}{\sigma \varepsilon_{\text{sky}}}} \quad (6.6.5)$$

missä

- T_{sky} on taivaan tehollinen lämpötila [K]
 R_{LDown} on ilmakehästä maanpinnalle tuleva pitkäaaltoinen säteily [W/m^2]
 σ on Stefan-Boltzmannin vakio ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$)
 ε_{sky} on taivaan emissiviteetti [-] (laskennassa käytettiin arvoa 1,0)

Kuvassa 6.6.4 esitetään taivaan tehollisen lämpötilan arvot vuorokauden liukuvalla keskiarvolla edellä esitettyjä laskentamenetelmiä käytettäessä.



Kuva 6.6.4 Taivaan tehollinen lämpötila kahdella eri laskentamenetelmällä: Menetelmässä a on taivaan tehollisen lämpötilan määrittämiseen käytetty maanpinnan ja taivaan välistä kokonaissäteilytasetta ja menetelmässä b ilmakehästä maanpinnalle tulevaa pitkäaaltoista lämpösäteilyä.

Kuvasta 6.6.4 nähdään, että menetelmällä a laskettu taivaan tehollinen lämpötila saa huomattavasti korkeampia arvoja menetelmään b verrattuna, kun taivaalta tulevan säteilyn määrät ovat suuria. Yhtenä syynä tähän on se, että vaikka kokonaissäteilytaseen arvoista pyrittiin poistamaan lyhytaaltoisen säteilyn vaikutus, osa siitä jäi mukaan säteilytaseen arvoihin. Lyhytaaltoista säteilyä on mukana aamu- ja iltatuntien arvoissa, kun

auringonsäteilyä on jonkin verran saatavilla, mutta sen vaikutus ei nosta taivaan tehollista lämpötilaa vielä ulkoilman lämpötilaa suuremmaksi. Näiden tuntien osalta lyhytaaltoisen säteilyn osuus tulee otettua huomioon myös ikkunoiden kondensoitumislaskelmissa kahteen kertaan. Menetelmä a oli kuitenkin ainoa tapa, jolla voitiin verrata eri vuosien kriittisyyttä pitkäaaltoisen lämpösäteilyn osalta keskenään.

Taivaan tehollisen lämpötilan vuosikeskiarvoiksi saadaan kokonaissäteilytaseen avulla (menetelmä a) $1,6\text{ °C}$ ja maanpinnalle tulevan pitkäaaltoisen lämpösäteilyn avulla (menetelmä b) $-2,6\text{ °C}$. Edellä esitetyt arvot vastaavat menetelmän a osalta $-3,3\text{ °C}$ ja menetelmän b osalta $-7,5\text{ °C}$ lämpötilaeroa verrattuna ulkoilman lämpötilaan.

Kirjallisuudessa esitettävät arvot taivaan tehollisen lämpötilan ja ulkoilman lämpötilan erotuksesta vaihtelevat jonkin verran. Garde (1997) on esittänyt kuuden asteen lämpötilaeroa, mutta Adelard et al. (1998) ovat myöhemmin maininneet sen olevan liian pieni kirkkaiden taivaiden kannalta. Tarkastelu on tosin koskenut Intian valtameren aluetta. Venäläinen et al. (1998) ovat saaneet pitkäaaltoisen lämpösäteilyn taseeksi Suomessa $-34\dots-45\text{ W/m}^2$. Samassa artikkelissa todetaan, että muissa tutkimuksissa pitkäaaltoisen lämpösäteilyn taseeksi on saatu $-35\dots-71\text{ W/m}^2$. Kaavan 6.6.3 avulla laskettuna taivaan tehollinen lämpötila olisi näillä arvoilla n. $-11\dots-20\text{ °C}$ ulkoilmaa kylmempi.

6.6.3 Laskentatarkastelujen toteutus

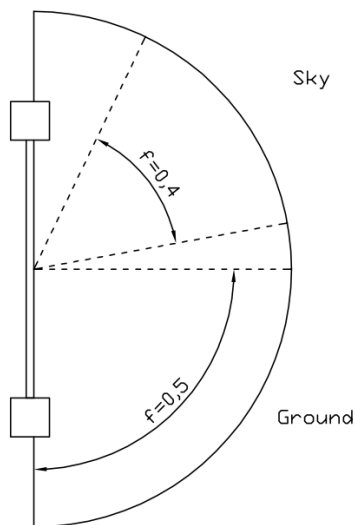
Ikkunarakenteen U-arvoa muutettiin laskentatarkasteluissa portaittain arvosta $2,0\text{ W/(m}^2\text{K)}$ arvoon $0,4\text{ W/(m}^2\text{K)}$. Ulkopuolisten varjostuksien vaikutusta tarkasteltiin muuttamalla ikkunan näkyvyyskerrointa taivaalle. Näkyvyyskerrointa käytetään laskettaessa lämpösäteilyä kahden tai useamman pinnan välillä. Näkyvyyskerroin kuvaa pintojen asentoa toisiinsa nähden. Perustapauksessa, jossa ikkuna on asennettu pystysuoraan ja ikkunan edusta on täysin avoin, ikkunan näkyvyyskerroin on maastoon 0,5 ja taivaalle 0,5. Toisaalta täysin vaakasuorassa olevan kattoikkunan näkyvyyskerroin taivaalle on 1,0. Mikäli ikkunan edessä on varjostuksia kuten puita, muita rakennuksia tai rakennuksessa on pitkät räystäät, näkyvyyskerroin taivaalle on alle 0,5.

Laskennassa varjostuksien vaikutusta tarkasteltiin muuttamalla ikkunan näkyvyyskerrointa taivaalle portaittain arvosta 0,5 arvoon 0,3. Näkyvyyskerroimien muuttamista ei ollut mahdollista tehdä IDA-ICE -ohjelmassa, joten sen vaikutus otettiin huomioon laskennassa käytettävässä taivaan tehollisessa lämpötilassa. Koska ikkunan ympäristön pintalämpötilojen voidaan olettaa olevan taivasta lukuun ottamatta melko lähellä ulkoilman lämpötilaa, näkyvyyskerroimen pienentäminen voidaan suorittaa muuttamalla taivaan tehollisen lämpötilan arvoa samassa suhteessa verrattuna ilman lämpötilaan. Esimerkiksi tilanteessa, jossa ikkunan näkyvyyskerroin taivaalle on 0,4 (eli näkyvyyskerroin taivaalle on 20 % perustapausta pienempi), täytyy taivaan tehollista lämpötilaa redusoida laskemalla $T_{\text{sky,red}} = 0,2 \cdot T_e + 0,8 \cdot T_{\text{sky}}$. Tarkkaan ottaen tulisi painottaa lämpötilojen neljänsiä potensseja, mutta tästä syntyvä virhe on melko pieni, maksimissaan $0,6\text{ °C}$. IDA ICE -ohjelmassa ikkunan

näkyvyyskertoimet säilyivät ennallaan eli ne olivat taivaalle 0,5 ja maahan 0,5. Kuvassa 6.6.5 havainnollistetaan ikkunan näkyvyyskertoimen muodostumista.

Ulkopinnan selektiivikalvojen vaikutusta selvitettiin muuttamalla uloimman lasin ulkopinnan emissiviteettiä. Tavallisen ikkunalasin emissiviteetti on 0,837. Matalaemissiivisillä selektiivipinnoitteilla voidaan alentaa ulkopinnan emissiviteettiä jopa arvoon 0,04 saakka.

Laskennassa tarkasteltava ikkuna oli suunnattuna pohjoiseen, jotta sille tuleva auringon suora säteily olisi mahdollisimman vähäistä. Ikkunan suuntauksen vaikutusta ulkopinnan kondensoitumisherkkyteen ei tarkasteltu tässä yhteydessä.

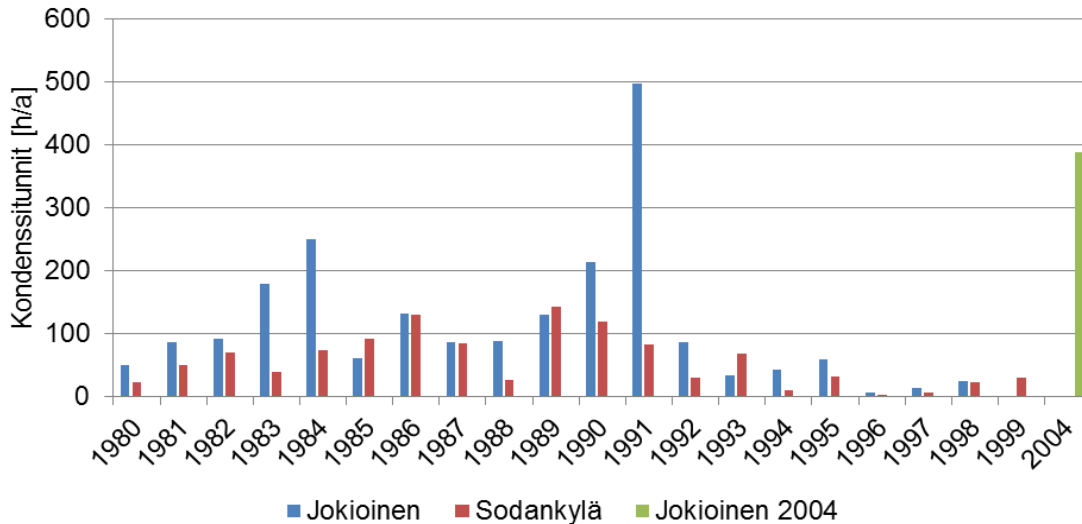


Kuva 6.6.5 Ikkunan näkyvyyskertoimet taivaalle ja maahan.

6.6.4 Tulokset

Ikkunan ulkopinnan lämpötilaa simuloitiin IDA-ICE 4.2 -ohjelmalla. Ohjelman oletuksena taivaan tehollinen lämpötila on aina viisi astetta ulkoilman lämpötilaa alhaisempi. Tämä on melko hyvä arvo kuvaamaan keskimääräistä tilannetta, mutta todellisuudessa yksittäiset arvot voivat kirkaalla säällä olla huomattavasti alhaisempia. Toisaalta pilvisellä säällä taivaan tehollinen lämpötila on melko lähellä ulkoilman lämpötilaa.

Taivaan tehollisen lämpötilan arvot määritettiin koko tarkastelujaksolle vuosille 1980–1999 (Jokioinen ja Sodankylä) sekä testivuodelle 2004 (Jokioinen) maanpinnan ja taivaan välisen kokonaissäteilytaseen avulla (ks. luku 6.6.2). Kondenssintien vuosittaista vaihtelua tutkittiin testi-ikkunarakenteella, jonka lasiosan U-arvo oli $0,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ja näkyvyyskerroin taivaalle 0,5. Kuvassa 6.6.6 esitetään vuosittaisten kondenssintien vaihtelu tarkasteluvuosina.

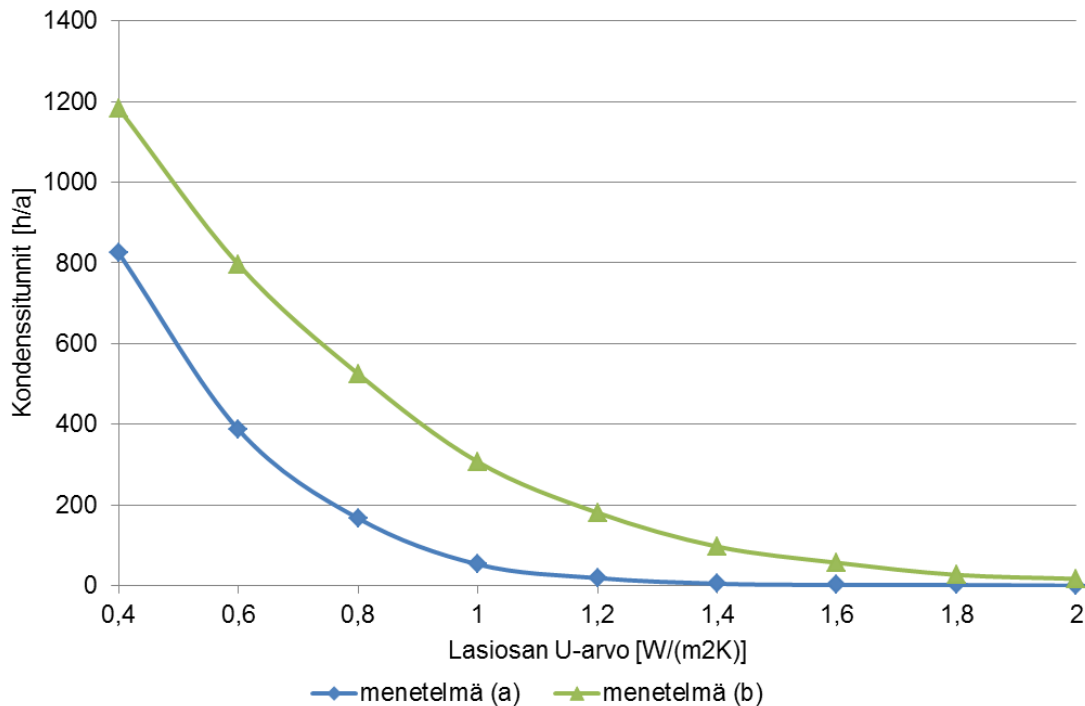


Kuva 6.6.6 Vuotuiset kondenssitunnit Jokioisissa ja Sodankylässä 1980–1999 sekä Jokioisissa 2004.

Tuloksista voidaan havaita vuosittaisen vaihtelun olevan erittäin suurta. Lisäksi havaitaan Jokioisen olevan lähes poikkeuksetta Sodankylää kriittisempi ikkunan ulkopinnan kondensoitumisen kannalta. Muille rakenteille määritetty rakennusfysikaalinen testivuosi Jokioinen 2004 on ikkunan ulkopinnan kondenssin kannalta toiseksi kriittisin vuosi ja ylittää 90 % kriittisyystason tarkastelussa mukana olleista vuosista. Näin ollen testivuotta Jokioinen 2004 voidaan käyttää testivuotena myös ikkunan kondenssitarkastelussa.

Ikkunan U-arvon vaikutusta ulkopinnan kondensoitumiseen tutkittiin muuttamalla ikkunan lasiosan U-arvoa. U-arvoa pienennettiin portaittain arvosta $2,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ arvoon $0,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Lisäksi tutkittiin eri menetelmillä määritettyjen taivaan tehollisen lämpötilan arvojen vaikutusta kondenssiriskiä. Kuvassa 6.6.7 esitetään vuosittaiset kondenssitunnit eri U-arvoilla ja laskentamenetelmillä testivuonna Jokioinen 2004.

Kuvasta 6.6.7 voidaan todeta, että maanpinnalle tulevan pitkäaaltoisen säteilyn avulla laskettaessa (menetelmä b) kondenssituntien määrät vuodessa ovat epäilyttävän suuria havaintoihin ja kirjallisuuslähteisiin verrattuna (ks. luku 6.6.1, Hemmilä & Heimonen 1997; Jonsson 1999; Vinha & Lähdesmäki 2008). Kokonaissäteilytaseen perusteella saadut kondenssituntimäärät (menetelmä a) ovat selvästi lähempänä havaintoja ja kirjallisuuslähteitä. Toisaalta kuvan 6.6.6 perusteella voidaan todeta, että Jokioisen 2004 olosuhteet ovat olleet todennäköisesti poikkeuksellisen kriittiset kosteuden kondensoitumisen kannalta, joten siinä mielessä myös kondenssituntien määrän voidaan olettaa olevan poikkeuksellisen suuria. Kondensoitumisen määrä alkaa kasvaa melko voimakkaasti ikkunan lasiosan U-arvon pienentyessä alle $1,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Tätä suuremmilla U-arvoilla kondenssin esiintyminen on melko vähäistä. Tämä vastaa myös aiempien tutkimusten tuloksia (Hemmilä & Heimonen 1997; Vinha & Lähdesmäki 2008).



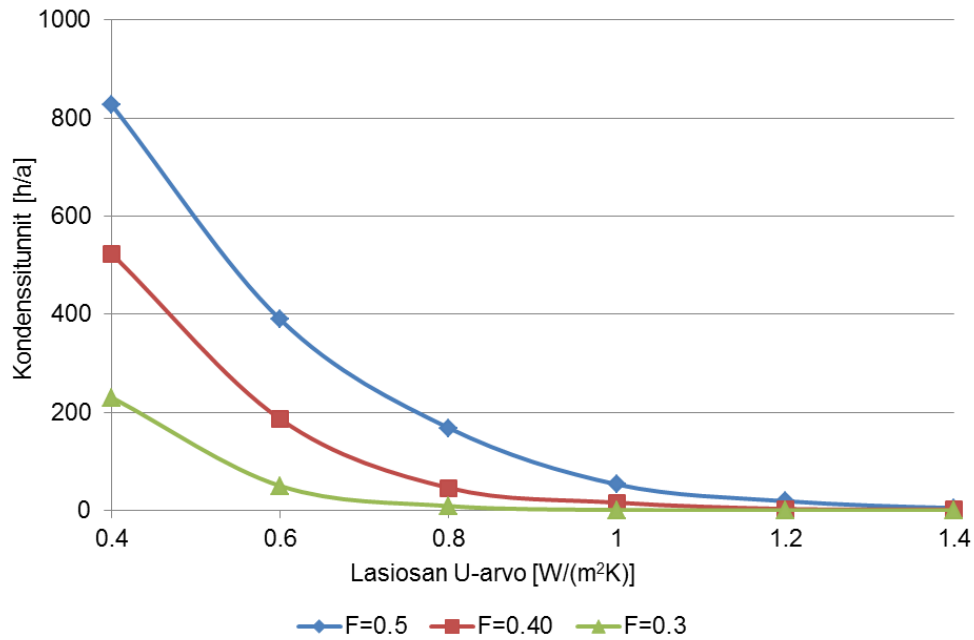
Kuva 6.6.7 Vuosittaiset kondenssitunnit eri laskentamenetelmillä (Jokioinen 2004).

Tässä yhteydessä on huomattava, että menetelmässä a laskennassa käytetyt taivaan tehollisen lämpötilan arvot olivat jonkin verran korkeammat kuin todellisuudessa, koska ne sisälsivät myös lyhytaaltoisen säteilyn vaikutusta (ks. luku 6.6.2). Tällöin kondenssituntien määrät ovat todellisuudessa jonkin verran suurempia kuin menetelmällä a saadut arvot. Toisaalta menetelmässä a taivaan teholliseen lämpötilaan vaikuttaa lisäksi maanpinnan lämpötila ja emissiviteetti, joiden tarkkaa arvoa ei myöskään tiedetty laskennassa.

Lisäksi on huomattava, että kummassakaan menetelmässä ei ole otettu huomioon kosteuden kondensoitumisen ja jäätyneen vaikutusta kondenssituntien määrässä. Tämä tarkoittaa sitä, että ikkunan ulkopintaan vedeksi tai jääksi tiivistynyt kosteus pysyy siinä jonkin aikaa myös sen jälkeen, kun lasin ulkopinnan lämpötila on noussut kastepistelämpötilan yläpuolelle. Tämä lisääaika riippuu mm. pintaan tiivistyneen/jäätyneen kosteuden määrästä sekä ulkoilman lämpötila- ja RH-olosuhteista ja se voi pidentää merkittävästi laskennallista kondenssiaikaa varsinkin silloin, jos suora auringonsäteily ei pääse kuivattamaan ikkunapintoja.

Koska menetelmällä a määritetyt kondenssituntimäärät olivat luotettavamman tuntuisia aikaisemmin saatuihin mittaustuloksiin verrattuna (ks. luku 6.6.1), tehtiin muut laskentavertailut tällä menetelmällä määritettyjen taivaan tehollisten lämpötilojen avulla, vaikka tähänkin laskentamenetelmään sisältyi epävarmuustekijöitä.

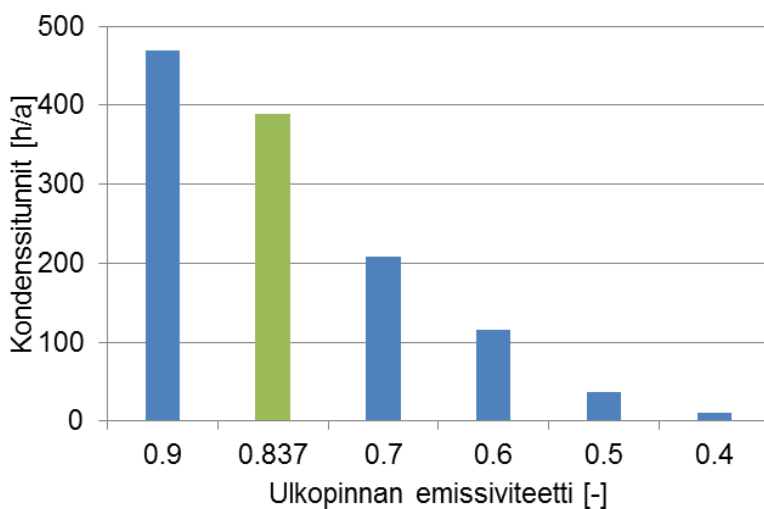
Ikkunan ulkopuolisten varjostuksien vaikutusta kondensoitumisriskiin tutkittiin eri näkyvyyskertoimilla. Kuvassa 6.6.7 esitetään kondenssitunnit erilaisilla näkyvyyskertoimilla.



Kuva 6.6.7 Näkyvyyskertoimen vaikutus ikkunan ulkopinnan kondensoitumiseen (Jokioinen 2004).

Tulosten perusteella voidaan todeta varjostuksen vähentävän merkittävästi ikkunan ulkopinnan kondensoitumista.

Selektiivikalvojen vaikutusta tutkittiin muuttamalla ikkunan ulkopinnan emissiviteettiä. Tavallisella ikkunalla ulkopinnan emissiviteetti on 0,837. Selektiivipinnoitteella ulkopinnan emissiviteettiä voidaan alentaa jopa arvoon 0,04 saakka. Kuvassa 6.6.8 on esitetty ulkopinnan emissiviteetin pienentämisen vaikutus ulkopinnan kondenssiin.

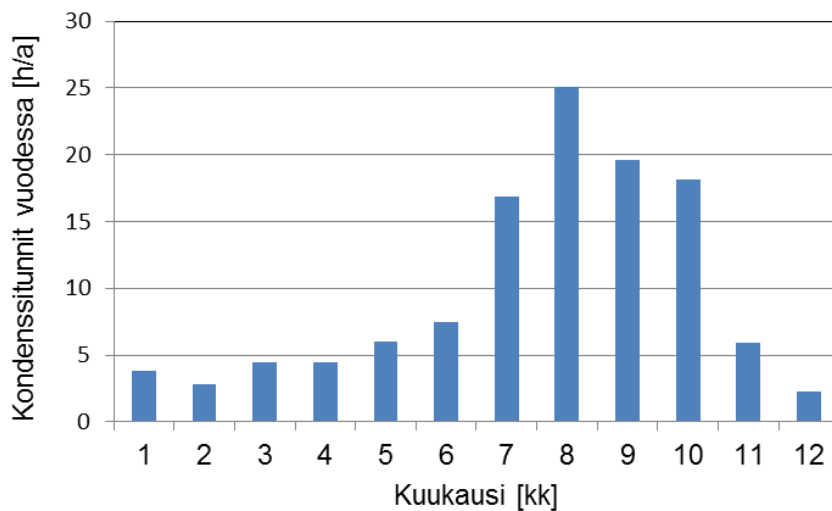


Kuva 6.6.8 Ikkunan ulkopinnan emissiviteetin vaikutus ulkopinnan kondenssituntien määrään (Jokioinen 2004).

Kuvasta 6.6.8 havaitaan kondenssimäärän pienenevän merkittävästi jo melko vähäisellä emissiviteetin muutoksella. Emissiviteetin ollessa alle 0,4 ei ulkopintaan muodostu juuri

lainkaan kondenssia. Tässä yhteydessä on huomattava, että lasin ulkopintaan kertyvä lika voi nostaa ikkunan ulkopinnan emissiviteettiä ja lisätä näin ollen ulkopinnan kondensoitumisriskiä.

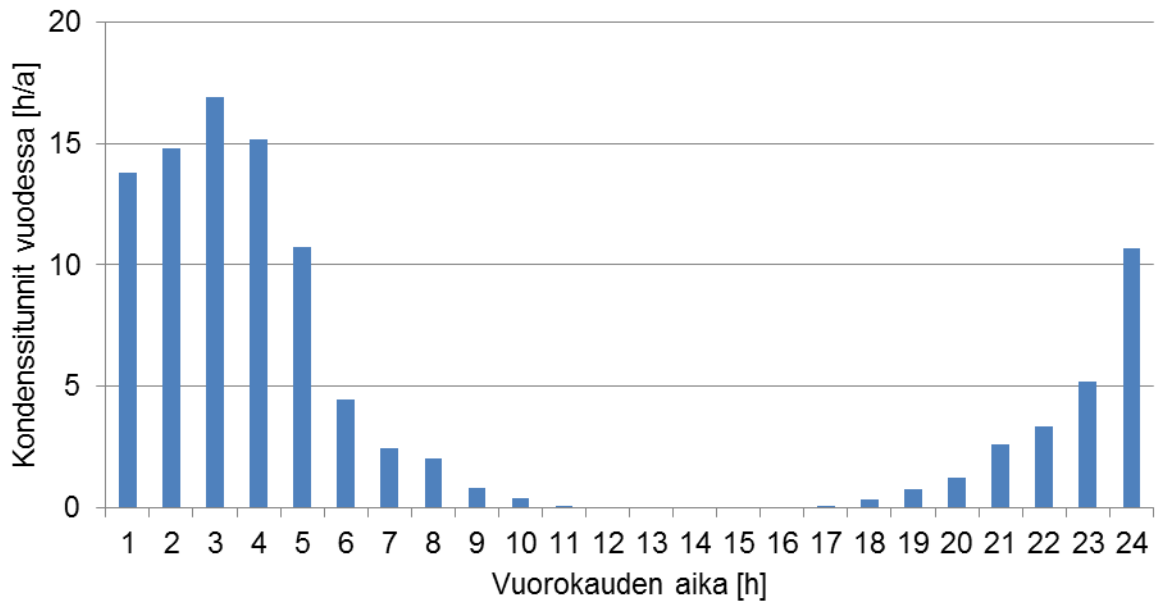
Ikkunoiden ulkopinnan kondensoitumista on käytännössä havaittu tapahtuvan pääasiassa syksyisin yön ja aamuyön tunteina. Simulointitarkastelussa selvitettiin laskennallisesti, minä vuodenaikana ja mihin vuorokauden aikaan kondensoitumista tapahtuu. Koska vuosittaiset vaihtelut muun muassa pilvisyydessä ja ilman kosteudessa ovat suuria, tarkasteltiin kondenssituntien esiintymistä koko havaintojakson 1980–1999 ajalta. Tarkastelupaikkakunnaksi valittiin Jokioinen, koska sen havaittiin olevan vuosien kriittisyyttä tarkasteltaessa selvästi Sodankylää kriittisempi. Kuvassa 6.6.9 esitetään keskimääräiset kondenssitunnit kuukausittain.



Kuva 6.6.9 Keskimääräiset kondenssitunnit kuukausittain Jokioisissa havaintojaksolla 1980–1999.

Kuvasta 6.6.9 nähdään, että kondenssia esiintyy pääsääntöisesti loppukesästä ja syksyllä heinä–lokakuun välisenä aikana. Vähäisiä määriä kondenssia voi kuitenkin esiintyä muinakin vuodenaikoina.

Kuvassa 6.6.10 esitetään keskimääräinen kondenssituntien määrä tunneittain eri vuorokauden aikoina Jokioisissa 2004.



Kuva 6.6.10 Vuotuinen kondenssituntien määrä eri vuorokaudenaikoina Jokioisissa 2004.

Kuvasta 6.6.10 voidaan todeta, että kondensoituminen painottuu aamuyön tunteihin. Kello kuuden jälkeen kondenssituntien määrä vähenee merkittävästi. Kello yhdentoista jälkeen ei laskennallisesti enää esiinny kondenssia.

6.6.5 Yhteenveto ja johtopäätökset

Ikkunan kondensoitumista tarkasteltiin kahden eri laskentamenetelmän avulla, joista toinen perustui Ilmatieteen laitoksen mittaamiin kokonaissäteilytaseen arvoihin ja toinen Ilmatieteen laitoksen määrittämiin maanpinnalle tulevan pitkäaaltoisen lämpösäteilyn arvoihin.

Tarkastelun luotettavuutta heikentää käytettyjen säteilytietojen sekä laskentamenetelmien epävarmuus. Tuloksia on hankala verrata aiempiin tarkasteluihin, sillä vastaavia dynaamisia ikkunan ulkopinnan kondensoitumistarkasteluita, joissa olisi otettu huomioon pilvisyyshavaintoja, ei ole juuri aiemmin tehty.

Tuloksia tarkasteltaessa yksittäisten kondenssimäärien sijaan huomio kannattaa kiinnittää kondenssimäärän muutoksiin ikkunan lasiosan U-arvon, näkyvyyskertoimen tai ulkopinnan emissiviteetin muuttuessa. Edellä mainittujen tekijöiden havaittiin vaikuttavan melko voimakkaasti ikkunan ulkopinnan kondenssiriskiä. Laskentatarkastelujen tulokset voidaankin tiivistää alla olevaan listaan:

- vuosittaiset vaihtelut kondenssituntien määrissä ovat suuria
- ikkunan lasiosan U-arvon pieneneminen lisää kosteuden kondensoitumista ulkopintaan
- kondensoitumista esiintyi eniten loppukesästä ja syksyllä, heinä–lokakuun aikana
- kondensoitumista esiintyy eniten aamuyön tunteina
- ikkunan näkyvyyskertoimella taivaalle on suuri vaikutus kondensoitumisriskiin
- ulkopinnan emissiviteetin ollessa alle 0,4 ei kondenssia muodostu.

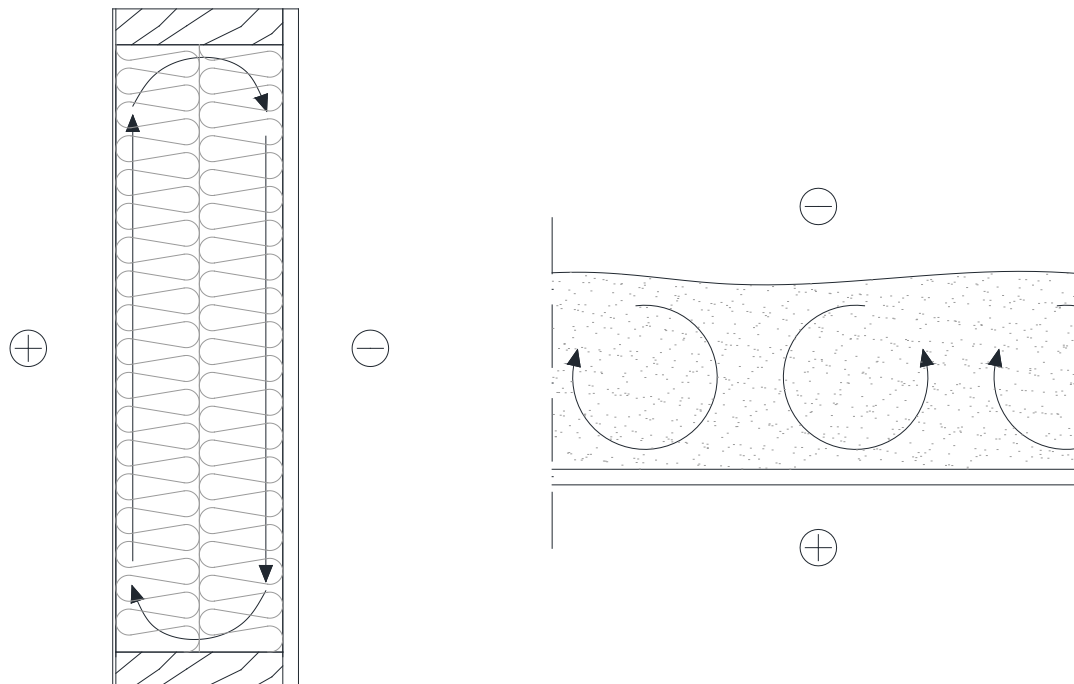
Ikkunoissa käytettävien pinnoitteiden on havaittu vaimentavan radiosignaalien läpäisyä. Varsinkin uloimman lasin ulkopinnassa oleva selektiivipinnoite heikentää merkittävästi radiosignaalien voimakkuutta. Radiosignaalien heikko läpäisy ikkunoiden kautta korostuu rakennuksen ollessa teräsbetonia tai jos eristeenä on käytetty polyuretaanilevyjä, joissa on alumiinipaperi. Näin ollen radiosignaalien läpäisy myös rungon osalta on heikkoa. Tämä aiheuttaa matkapuhelimien kuuluvuusongelmia. (Niemelä 2012)

7 Vaipparakenteiden sisäisen konvektion tarkastelut

7.1 Yleistä

Passiivi- ja matalaenergiarakennuksissa mm. tehokkaan lämmön talteenoton ja ilmatiiviuden lisäksi oleellinen tekijä rakennuksen energiatehokkuudessa on vaipan lämmöneristävyys, jota on pyritty parantamaan kehittämällä parempia lämmöneristemateriaaleja ja kasvattamalla lämmöneristekerrosten paksuuksia. Käytettäessä ilmaa läpäiseviä rakennuseristeitä, kuten kevyttä mineraalivillaa tai erilaisia puukuitueristeitä, suuret eristepaksuudet voivat kuitenkin johtaa pakkaskausilla eristeen sisällä tapahtuviin haitallisen suuriin ilmavirtauksiin, jotka voivat heikentää vaipparakenteen lämmöneristävyttä ja lisätä kosteuden kondensoitumisriskiä.

Vaipparakenteiden sisäisellä luonnollisella konvektiolla tarkoitetaan ilmaa läpäisevien materiaalikerrosten sisällä tapahtuvia lämpötilaerojen ja painovoiman yhdessä aiheuttamia ilmavirtauksia, joiden suuruuteen oleellisesti vaikuttavia tekijöitä ovat materiaalin ilmanläpäisevyys, materiaalikerroksen paksuus, lämpötilaero rakenteen yli sekä rakenteen geometria. Ilmaa läpäisevällä materiaalilla lämmöneristetyn pystyrakenteen tapauksessa sisäisen konvektion aiheuttamat ilman virtaussuunnat ovat helposti hahmotettavissa. Lämmitetyllä puolella eristeen huokosilma on kevyempää ja kylmällä puolella raskaampaa, jolloin painovoima pyrkii aiheuttamaan kuvan 7.1.1 (vasen puoli) mukaisen ilman kiertokulun.



Kuva 7.1.1 Sisäisen konvektion aiheuttamat ilman virtaussuunnat pysty- ja vaakarakenteella.

Alapuolelta lämmitetyn vaakarakenteen tapauksessa (kuva 7.1.1 oikea puoli) virtauskenttien arviointi on hankalampaa. Tässä tapauksessa sisäinen konvektio muodostuu toinen toisiinsa vaikuttavista pyörteisistä virtauksista, joiden laskennallinen tarkastelu on haastavaa. Mikäli lämpötilaeron suunta vaakarakenteen yli on päinvastainen (esimerkiksi alapohjassa), sisäistä konvektiota ei tapahdu lainkaan, sillä yläpuolelta lämmitetyssä vaakarakenteessa lämmin ilma on jo rakenteen yläpinnassa eikä nosteella ole lämmön siirtymisen kannalta merkitystä. Yläpohjissa ja ulkoseinissä lämmin ilma pyrkii kuitenkin aina virtaamaan lämpimän ja kylmän puolen välillä heikentäen rakenteen lämmöneristävyyttä ja kuljettaen myös vesihöyryä. Tässä FRAME-projektin tutkimusosiossa tarkasteltiin kokeellisesti sisäisen konvektion vaikutusta ulkoseinien ja yläpohjien lämpötekniiseen toimintaan sekä selvitettiin sisäisen konvektion mallinnettavuutta vertaamalla kokeellisia tuloksia numeerisesti ratkaistuihin tuloksiin.

Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C4 seuraava versio (RakMK C4 2012) tulee velvoittamaan lämmöneristykseen suunnittelijan ottamaan huomioon luonnollisen konvektion laskemalla standardin SFS-EN ISO 10456 (2008) mukaisella kaavalla lämmöneristekerrokselle modifioidun Rayleigh'n luvun (Ra_m) ja tarkistamalla, että se ei ylitä taulukoituja raja-arvoja. Modifioitu Rayleigh'n luku on dimensioton luku, joka kuvaa sekä pysty- että vaakarakenteen tapauksissa potentiaalia sisäisen konvektion muodostumiselle. Standardin mukainen kaava modifioidulle Rayleigh'n luvulle on:

$$Ra_m = 3 \times 10^6 \frac{d \cdot \kappa_a \cdot \eta_a \cdot \Delta T}{\lambda_U} \quad (7.1.1)$$

missä

d	on lämmöneristekerroksen paksuus [m]
κ_a	on lämmöneristeen ilmanläpäisevyys [$m^3/(m \cdot s \cdot Pa)$]
η_a	on ilman dynaaminen viskositeetti ($\approx 0,0175 \times 10^{-3} Pa \cdot s$)
ΔT	on lämpötilaero lämmöneristekerroksen yli [K]
λ_U	on lämmöneristeen lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo [$W/(m \cdot K)$]

Kerros 3×10^6 on likiarvo maan putoamiskiihtyvyyden, ilman lämpölaajenemiskertoimen, ilman tiheyden ja ilman ominaislämpökapasiteetin tulosta, joka on jaettu ilman kinemaattisella viskositeetilla siten, että kaikki aineominaisuudet on määritetty $10 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa. Tarkistettaessa ylittääkö Ra_m määräysten mukaista raja-arvoa, lämpötilaero lämmöneristekerroksen yli (ΔT) lasketaan ensin tilanteesta, jossa koko rakenteen yli vallitsee 50 K suuruinen lämpötilaero (RakMK C4 2012).

Toinen dimensioton luku, jota käytetään usein kuvaamaan luonnollisen konvektion vaikutusta, on Nusseltin luku (Nu), joka kuvaa konvektiivisen lämpövirran osuutta koko lämpövirrasta rakenteen läpi ja se lasketaan kaavalla:

$$Nu = \frac{q_{cd} + q_{conv}}{q_{cd}} \quad (7.1.2)$$

missä

q_{cd} on johtumalla siirtyvän lämmön osuus koko lämpövirrasta tarkasteltavan kerroksen läpi [W/m^2]

q_{conv} on konvektiolla siirtyvän lämmön osuus koko lämpövirrasta tarkasteltavan kerroksen läpi [W/m^2]

Esimerkiksi, kun $Nu = 1,0$, rakenteessa ei tapahdu sisäistä konvektiota lainkaan ($q_{conv} = 0$ W/m^2). Kun $Nu = 1,10$, sisäinen konvektio lisää lämpövirtaa rakenteen läpi 10 % ($q_{tot} = q_{cd} + q_{conv} = 1,10 \cdot q_{cd}$) verrattuna pelkällä johtumisella rakenteen läpi siirtyvään lämpövirtaan.

Sisäistä konvektiota huokoisessa materiaalissa sekä modifioidun Rayleigh'n luvun ja Nusseltin luvun välistä verrannollisuutta rakennusfysiikan tapauksissa on tutkittu aiemmin jonkin verran sekä Suomessa että muissa pohjoismaissa (mm. Kohonen et al. 1985; Wahlgren 2001 ja Uvsløkk et al. 2010), mutta sisäisen konvektion todellinen vaikutus sekä lämpö- että kosteustekniseen toimintaan on monissa tapauksissa pysynyt edelleen epäselvänä. Tämän FRAME-projektin tutkimusosion tavoitteena oli saada tietoa siitä, kuinka suuri vaikutus sisäisellä konvektiolla voi olla vaipparakenteiden lämmönläpäisykertoimiin pakkaskausilla sekä siitä, kuinka hyvin sisäisen konvektion vaikutuksia todellisuudessa hallitaan rajoittamalla rakenteiden modifioituja Rayleigh'n lukuja. Tutkimukseen pyrittiin valitsemaan tutkittaviksi rakenteiksi sellaisia, joissa käytetyt eristemateriaalit vastaavat tavanomaisia kevyitä, ilmaa läpäiseviä rakennuseristeitä ja joiden eristepaksuudet vastaavat sekä nykyisten määräysten että pienempien U-arvojen mukaisia rakenteita. Ulkoseinärakenteiden kokeissa tutkittiin myös eristeiden asentamisen laadun vaikutusta sisäiseen konvektioon ja lämmönläpäisykertoimen arvoihin.

7.2 Koejärjestelyt

Sisäisen konvektion aiheuttamaa lisää U-arvoon tutkittiin yläpohjarakenteiden tapauksissa vertaamalla kokeellisesti määritettyjä U_{test} -arvoja laskennallisesti määritettyihin U_{calc} -arvoihin, joissa otettiin huomioon ainoastaan lämmön johtuminen. Kokeellisesti ja laskennallisesti määritetyn U-arvon eron voidaan olettaa johtuvan enimmäkseen sisäisestä konvektiosta, jolloin:

$$Nu \approx \frac{U_{test}}{U_{calc}} \quad (7.2.1)$$

Yläpohjarakenteiden kokeissa asennettiin lisäksi lämpötila-antureita eristekerrosten sisälle, jotta saatiin tietoa, kuinka eristekerrosten sisäiset lämpötilakentät muuttuvat sisäisen konvektion vaikutuksesta.

Ulkoseinärakenteiden tapauksissa hiukan monimutkaisempi koerakenteiden geometria aiheuttaa aina jonkin verran poikkeamaa laskennallisen ja kokeellisen tuloksen välillä, vaikka sisäistä konvektiota ei käytännössä tapahtuisikaan. Nusseltin lukuja määritettiin ulkoseinärakenteille vertaamalla kokeellisia U-arvoja sellaisten koerakenteiden välillä, joissa osassa sisäistä konvektiota pääsi tapahtumaan ja osassa sisäinen konvektio oli estetty ns. konvektiokatkon avulla (ks. luku 7.3.1). Kokeellisia tuloksia verrattiin myös RakMK C4 (2012):n mukaisella käsinlaskentamenetelmällä määritettyihin U-arvoihin sekä elementtimenetelmään perustuvalla laskentaohjelmalla (COMSOL Multiphysics 4.2a) määritettyihin U-arvoihin. Lämpötilaero rakenteen yli sekä yläpohja- että ulkoseinäkokeissa oli 35 °C ($T_i = 20$ °C ja $T_e = -15$ °C).

Ilmoitettaessa lämmöneristemateriaalin lämmönjohtavuutta λ [W/(m·K)], sillä tarkoitetaan tehollista lämpöteknistä materiaaliominaisuutta, jonka määrittämisessä on otettu huomioon johtuminen materiaalin kiinteässä osassa (esimerkiksi mineraalivillan mineraalikuuduissa) sekä johtuminen, säteily ja konvektio huokosilmassa. Tällä konvektiolla ei tarkoiteta kuitenkaan kuvan 7.1.1 mukaista rakenteen laajuista sisäistä konvektiota, vaan paikallisia huokosten sisällä tapahtuvia mikrokooppisia ilmavirtauksia, joiden vaikutus lämmönjohtavuuteen on hyvin vähäinen. Vallitseva lämpötila vaikuttaa huokoisen lämmöneristemateriaalin sisäisen lämmönsiirron mekanismeista tarkkaan ottaen kaikkiin, mutta merkittävästi lähinnä johtumiseen kuiduissa ja huokostilassa tapahtuvaan säteilyyn (Hagentoft 2001).

U-arvojen laskennallisia määrittämiä varten kokeissa käytetyistä materiaaleista mitattiin lämmönjohtavuudet standardin ISO 8301 (1991) vaatimukset täyttävällä lämpövirtalevyllä (LaserComp FOX304), jotta laskennalliset tarkastelut vastaisivat mahdollisimman hyvin todellisuutta eikä suunnittelutilannetta, jossa erilaiset tilastolliset kertoimet vaikuttavat laskennassa käytettyihin lämmönjohtavuuksiin. Lämpövirtalevyllä voitiin säätää tutkittavan materiaalin keskimääräinen lämpötila mittauksen ajaksi vastaamaan samaa keskimääräistä lämpötilaa kuin U-arvokokeissa (2,5 °C). Modifioitujen Rayleigh'n lukujen laskemista ja numeerisia tarkasteluja varten lämmöneristeistä mitattiin myös ilmanläpäisevyyden arvot standardin ISO 9053 (1991) vaatimukset täyttävällä ilmanläpäisevyyden mittauslaitteella.

Materiaalien lämmönjohtavuuteen vaikuttaa myös eristeen kosteuspitoisuus, joka on stationääritilassa verrannollinen huokosilman suhteelliseen kosteuteen. Koska kosteuspitoisuus alkaa kuitenkin oleellisesti vaikuttaa lämmönjohtavuuteen vasta korkeilla huokosilman suhteellisilla kosteuksilla eikä kokeissa tapahtunut kosteuden tuottoa sisä- tai ulkoilmaan, voitiin kosteuspitoisuuden vaikutus lämmönjohtavuuksiin jättää tarkastelematta.

U-arvojen kokeelliset määrittäykset suoritettiin kahdella TTY:n rakennushallissa sijaitsevilla tutkimuslaitteistoilla, joiden toiminta perustuu ns. calibrated hot box -menetelmään (CHB, kuva 7.2.1). Menetelmässä käytetään sisältä sähkövastuksilla lämmitettyä kammiota (hot box), joka on sijoitettu pakkashuoneeseen. Lämpimässä kammiossa on aukko tutkittavalle

rakenteelle, jonka U-arvo voidaan määrittää mittaamalla lämpötilaero sisä- ja ulkoilman välillä sekä määrittämällä teho, joka kuluu lämpövirtaan koerakenteen läpi (Φ_{str}). Φ_{str} voidaan määrittää mittaamalla kammion lämpimänä pitämiseen tarvittava kokonaislämmitysteho P_{tot} , ja vähentämällä siitä häviöteho Φ_{loss} eli se osuus lämmitykseen käytetystä tehosta, joka kuluu lämmön siirtymiseen lämpimän kammion kaikkien muiden osien paitsi koerakenteen läpi. Kokonaislämmitysteho määritetään mittaamalla sähkövastuspiirin jännite ja sähkövirta, joiden tulo on yhdistetyn Ohmin ja Joulen lain mukaan teho, jolla sähkövastukset tuottavat lämpöä.

Häviöteho määritetään kalibrointikokeella, jossa tutkimusaukkoon asennetaan umpisoluisesta lämmöneristeestä koostuva kalibrointielementti, jonka lämmönjohtavuus tunnetaan. Teho, joka kuluu lämpövirtaan kalibrointielementin läpi Φ_{cal} , voidaan laskea tunnettaessa lämpötilaero elementin yli, kalibrointielementin paksuus ja lämmönjohtavuus. Vähentämällä kalibrointikokeesta mitatusta kokonaislämmitystehosta lämpövirta kalibrointielementin läpi saadaan tuloksena häviöteho. Kalibrointikokeessa häviötehon laskemiseen käytetään seuraavia kaavoja:

$$\Phi_{\text{cal}} = \Delta T \frac{\lambda_{\text{cal}}}{d} A \quad (7.2.2)$$

$$\Phi_{\text{loss}} = P_{\text{tot}} - \Phi_{\text{cal}} \quad (7.2.3)$$

missä

Φ_{cal}	on lämpövirta kalibrointielementin läpi [W]
λ_{cal}	on kalibrointielementin lämmönjohtavuus [W/(m·K)]
d	on kalibrointielementin paksuus [m]
A	on kalibrointielementin pinta-ala [m ²]
ΔT	on lämpötilaero kalibrointielementin sisä- ja ulkopinnan välillä [K]
Φ_{loss}	on häviöteho [W]
P_{tot}	on kokonaislämmitysteho [W]

Tutkittavan rakenteen paksuus vaikuttaa oleellisesti lämpimän kammion häviötehon arvoon, joten tutkittaessa eri paksuisia rakenteita joudutaan kalibrointikoe myös suorittamaan eri paksuisilla kalibrointielementeillä.

U-arvon määrittämissä kokonaislämmitystehon ja häviötehon erotuksena (kaava 7.2.4) saadaan koerakenteen läpi siirtyvä lämpövirta Φ_{str} , josta koerakenteen U-arvo voidaan laskea kaavalla 7.2.5.

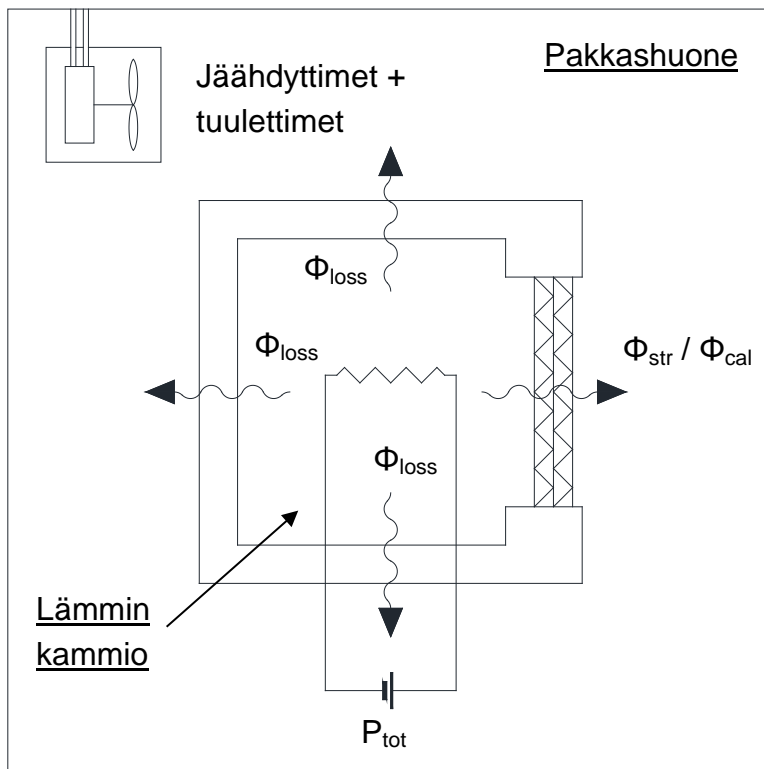
$$\Phi_{\text{str}} = P_{\text{tot}} - \Phi_{\text{loss}} \quad (7.2.4)$$

$$U = \frac{\Phi_{\text{str}}}{A \cdot \Delta T} \quad (7.2.5)$$

missä

U	on koerakenteen U-arvo [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]
Φ_{str}	on lämpövirta koerakenteen läpi [W]
A	on koerakenteen pinta-ala [m^2]
ΔT	on lämpötilaero koerakenteen yli [K]

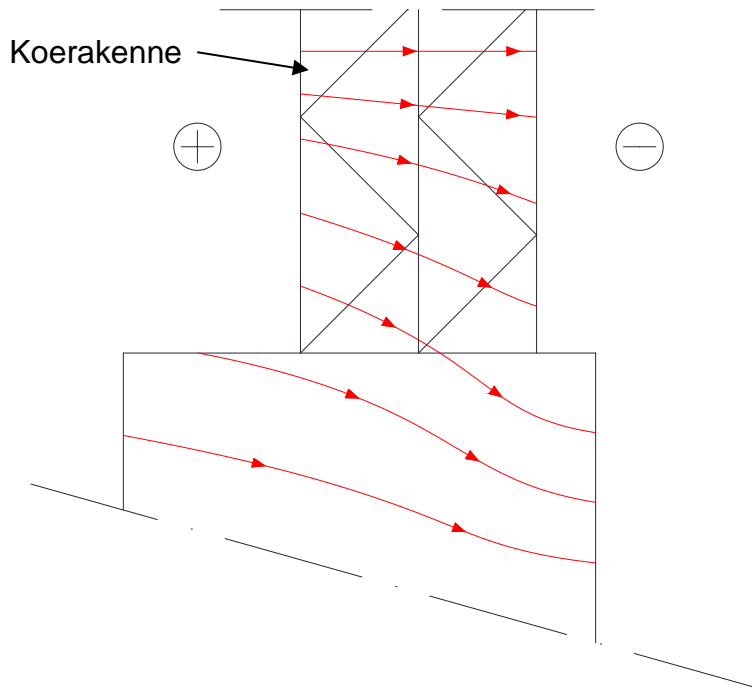
Lämpötilaero koerakenteen yli voidaan määrittää joko ilma- tai pintalämpötilojen erotuksena. Mikäli ΔT lasketaan sisä- ja ulkoilman lämpötilojen erotuksena laskettaessa U-arvoa mittaustuloksista, tulokseen sisältyy myös koetilanteen mukaiset ulko- ja sisäpintojen pintavastukset, jotka poikkeavat aina hiukan toisistaan eri koetilanteissa. Mikäli ΔT lasketaan pintalämpötilojen erotuksena, laskettu U-arvo kuvaa ns. pinnasta pintaan U-arvoa, jossa ei ole pintavastusten vaikutusta. Koetulosten vertailtavuuden takia tässä tutkimuksessa käsiteltiin pinnasta pintaan U-arvoja.



Kuva 7.2.1 Calibrated hot box -menetelmän periaate ja kokonaislämmitystehon jakaantuminen eri lämpövirroiksi.

Sekä U-arvokokeissa että kalibrointikokeissa pyritään ylläpitämään sisä- ja ulkoilman lämpötilat ja kokonaislämmitysteho mahdollisimman stationäärisinä lisäämällä tai vähentämällä tasaisin väliajoin lämmitystehoa ja/tai pakkashuoneen jäähdytysaikaa siten, että sisä- ja ulkolämpötila pysyvät mahdollisimman lähellä tavoitearvoja. Kokeen käynnistämisen jälkeen kuluu noin 1–4 vrk lämpötilojen ja lämmitystehon tasaantumiseen, jonka jälkeen U-arvon laskemiseen tarvittavista suureista mitataan vähintään 6 tunnin keskiarvot.

Luvuissa 7.3 ja 7.4 on kerrottu tarkemmin ulkoseinä- ja yläpohjakokeissa käytettyjen laitteistojen mittaustarkkuuteen vaikuttavista yksilöllisistä ominaisuuksista. Anturien ja jännitemittarien mittausepätkätkuuksien lisäksi CHB -menetelmällä määritettyihin U-arvoihin liittyy aina ns. reunahäiriöstä aiheutuva virhe, jonka tarkkaa suuruutta on vaikea arvioida. Reunahäiriöllä tarkoitetaan lämpövirtoja, jotka kulkevat koerakenteen ja lämpimän kammion välisen rajapinnan läpi. Laskennallisissa tarkasteluissa koerakenteen reunapinnat oletettiin adiabaattisiksi eli tasoiksi, joiden läpi lämpö ei pääse johtumaan koerakenteen sivusuunnassa. Reunahäiriön vaikutus lisää lämpövirtaa koerakenteen läpi, jolloin kokeellisesti määritetyt U-arvot ovat teoriassa aina hiukan suurempia kuin laskennallisesti määritetyt U-arvot. Mitä paremmin lämpöeristetty tutkimusaukon reuna-alue on, sitä vähäisempi reunahäiriön vaikutus on. Tyypillisesti reunahäiriön vaikutus alkaa korostua vasta hyvin paksuilla koerakenteilla. Kuvassa 7.2.2 on kuvattu reunahäiriön vaikutusta lämpövirtoihin koerakenteen ja tutkimusaukon välisillä reuna-alueilla.



Kuva 7.2.2 Periaatekuva reunahäiriön vaikutuksesta lämpövirtoihin (lämpövirrat on kuvattu punaisilla nuoliviivoilla) koerakenteen ja tutkimusaukon välisillä reuna-alueilla.

CHB -menetelmän lisäksi U-arvojen kokeellisia määrittämiä voidaan tehdä mm. guarded hot box -menetelmällä (GHB). Tässä menetelmässä tutkittavan rakenteen läpi siirtyvä lämpövirta Φ_{str} määritetään suojakammiossa erillisellä mittausselätköllä sellaiselta alueelta koerakenteesta, joka on riittävän kaukana tutkittavan rakenteen reunoista. Tällöin mittaukseen ei tule käytännössä lainkaan reunahäiriön vaikutusta. GHB -menetelmää voidaan siten pitää tietyissä tapauksissa CHB -menetelmää tarkempana, mutta sillä – tai millään muullakaan reunahäiriön kiertävällä U-arvon kokeellisella määrittämismenetelmällä – ei käytännössä voida tutkia sisäisen konvektion vaikutusta koko rakenteen U-arvoon. Tämä johtuu siitä, että

sisäinen konvektio muuttaa koko rakenteen lämpötilakenttää, jolloin johtumalla siirtyvä lämpövirta rakenteiden reunojen läheisyydessä muuttuu oleellisesti. Tästä syystä tutkittaessa sisäisen konvektion vaikutusta koko rakenteen lämmönläpäisykertoimeen on reuna-alueet oltava mittauksessa mukana.

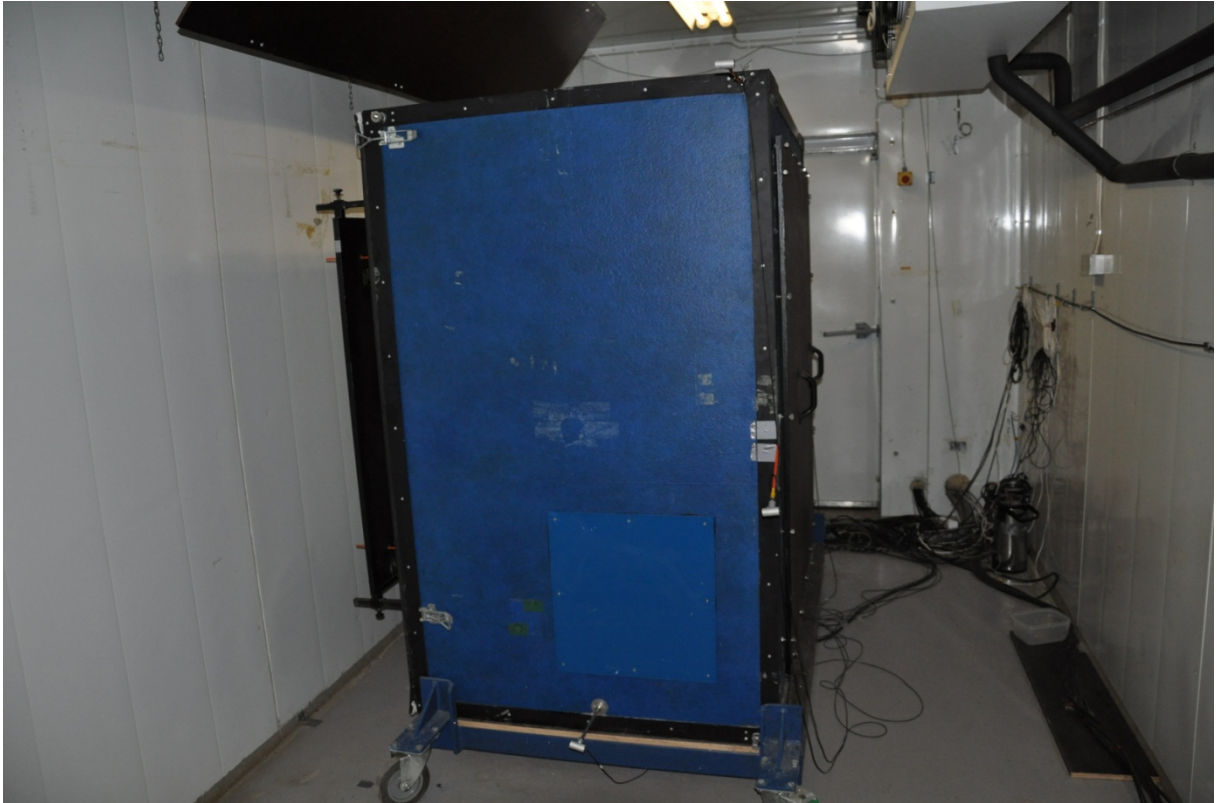
7.3 Ulkoseinärakenteiden tarkastelut

Sisäistä konvektiota tutkittiin ulkoseinärakenteiden lämmöneristekerroksissa vertailemalla laboratoriokoesarjan tuloksia keskenään sekä myös laskennallisten tarkasteluiden tuloksiin, joita saatiin määräysten mukaisella käsinlaskumenetelmällä sekä numeerisella laskentaohjelmalla. Teorian mukaan pystyrakenteen sisäiseen konvektioon vaikuttaa oleellisesti rakenteen korkeuden ja paksuuden suhde (h/d). Laboratoriokokeita voitiin tehdä ainoastaan samankorkuisille rakenteille, mutta sisäistä konvektiota erikorkuisilla pystyrakenteilla voitiin kuitenkin tutkia laskentaohjelmalla, jolla tutkittiin lisäksi tapauksia eri lämpötilaeroilla.

7.3.1 Laboratoriokokeet

Laboratoriokoesarja suoritettiin TTY:n rakennuslaboratoriossa sijaitsevalla rakennusfysikaalisella tutkimuslaitteistolla (kuvat 7.3.1–7.3.3), jonka lämpötekniinen toimintaperiaate vastaa CHB-laitetta (Vinha 1998). Laitteisto täyttää pääosin standardin SFS-EN ISO 8990 (1996) vaatimukset. Laitteisto toimi aluksi pelkästään rakenteiden lämmöneristysominaisuuksien mittausrakenteena, mutta sen säätö- ja mittausominaisuuksia on myöhemmin kehitetty siten, että laitteistolla voidaan tehdä erityyppisiä rakennusfysikaalisia olosuhdekokeita. Näissä kokeissa lämpötilojen lisäksi voidaan säätää myös sisä- ja ulkoilman suhteellista kosteutta sekä paine-eroa koerakenteen yli. Suhteellista kosteutta tai paine-eroa ei kuitenkaan säädetty tässä tutkimuksessa.

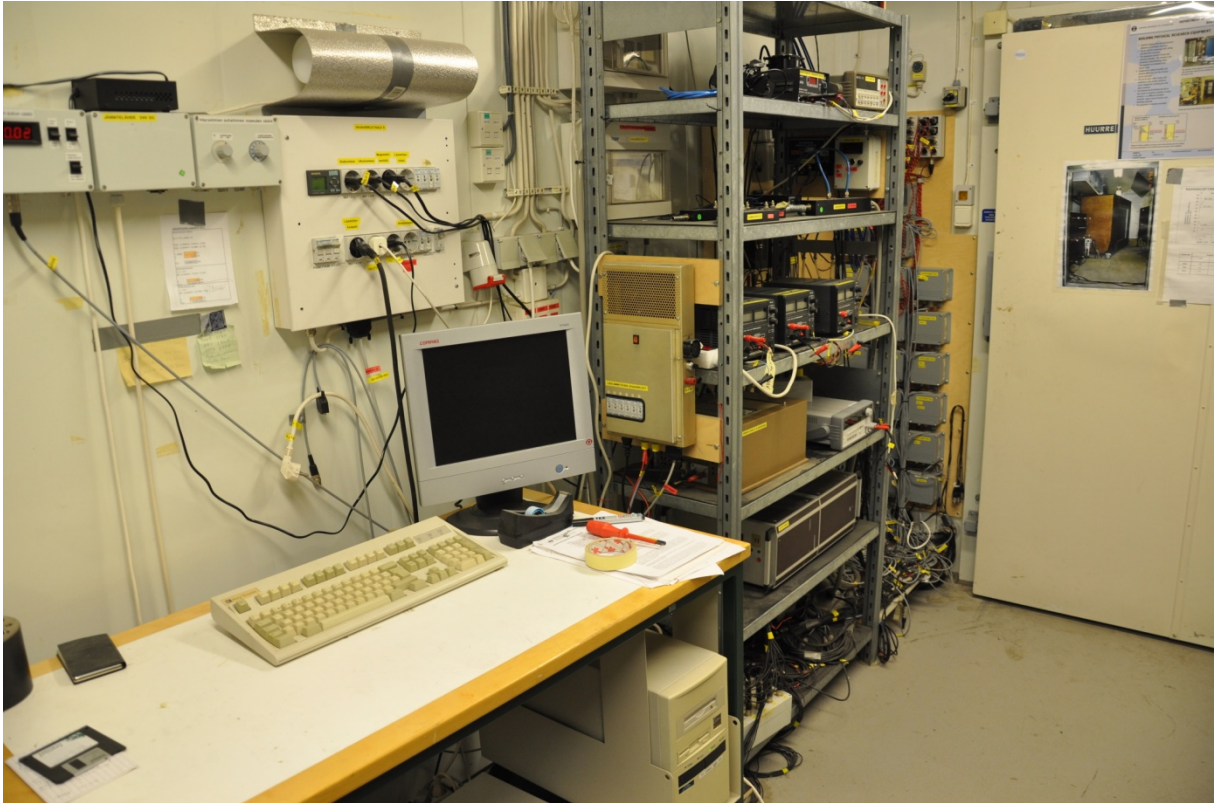
Laitteiston lämpimän kammion tutkimusaukon pysty- ja vaakamitat ovat $1200 \times 1200 \text{ mm}^2$ ja aukkoon voidaan asentaa pysty- ja vaakamitoiltaan enintään $1185 \times 1185 \text{ mm}^2$ kokoinen koerakenne. Koerakenteen maksimipaksuus on 400 mm. Tutkimusaukon ja koerakenteen väliin jäävä asennusvara tiivistetään lämpöä eristävällä polypropeenivillalla. Lämpimän kammion vaippa on eristetty polyuretaanilla. Koerakenteen sisä- ja ulkopinnan edessä käytetään mustaksi maalattuja suojalevyjä, jotka minimoivat sisä- ja ulkopintojen säteilytaseiden vaikutusta koetuloksiin sekä toimivat samalla anturien kiinnitystelineinä.



Kuva 7.3.1 Rakennusfysikaalisen tutkimuslaitteiston lämmin kammio ja pakkahuone.



Kuva 7.3.2 Rakennusfysikaalisen tutkimuslaitteiston lämmin kammio etupuolelta.



Kuva 7.3.3 Rakennusfysikaalisen tutkimuslaitteiston mittaushuone.

Laitteistossa eri suureiden mittaus perustuu elektronisiin antureihin, joista mitattavat ulostulojännitteet ovat verrannollisia mitattaviin suureisiin. Kokeen aikana ulostulojännitteet tallennetaan ensin itse rakennettuun dataloggeriin, josta jännitteet mitataan kanava kerrallaan tietokoneohjautusti. Koetta ohjataan TTY:ssä kehitetyllä CLIMATE-tietokoneohjelmalla. Jännitteiden mittaukseen käytetään Hewlett-Packard 34401A jännitemittaria. Laitteiston ohjausohjelma suorittaa kaikkien kanavien jännitteiden mittauksen kerran minuutissa. Lämmitystehon säätö tapahtuu 3 minuutin välein.

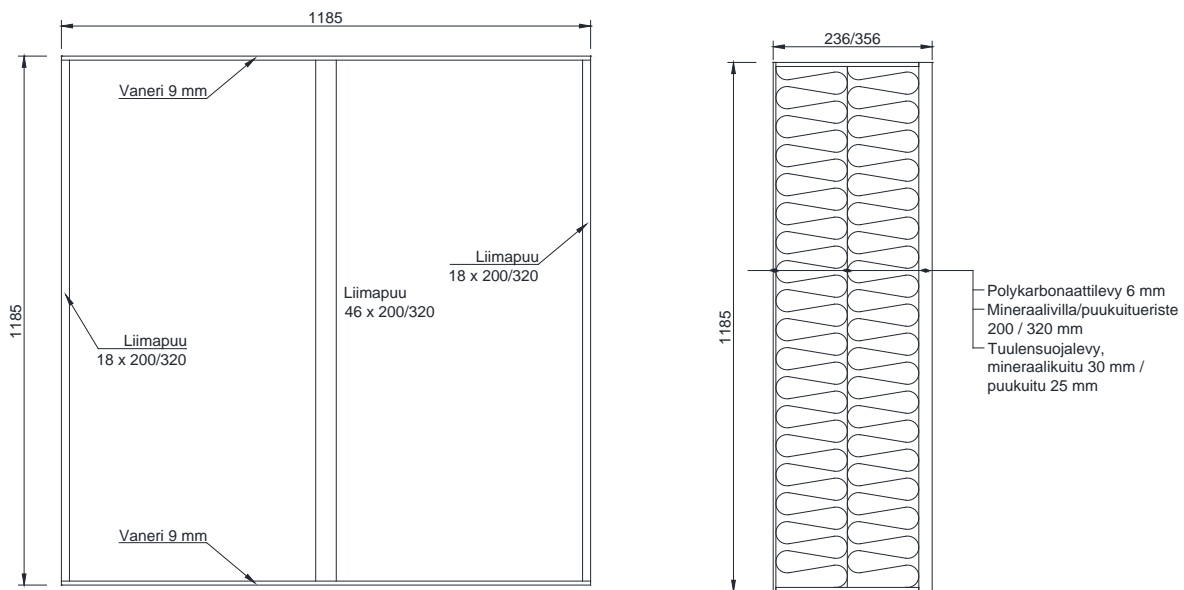
Laitteistossa käytetään lämpötilojen mittaamiseen National Semiconductor Corporationin valmistamia LM335 tyyppin puolijohdeantureita, joiden etuja ovat tarkkuus sekä anturista mitattavan ulostulojännitteen ja lämpötilan lineaarinen yhteys sopivalla mittausalueella. Lämpötila-anturien kalibrointi suoritetaan TTY:llä ketjukalibrointina hakemalla lämpötilan ja ulostulojännitteen väliselle lineaariselle funktiolle oikeat anturikohtaiset kulmakertoimet ja vakiotermit vertailumittarin avulla eri lämpötiloissa. Vertailumittarina kalibroinneissa käytetään lasiputkilämpömittaria. Laitteistossa voidaan tarvittaessa muuttaa eri lämpötilasuureiden mittaukseen käytettävien anturien määrää. Tässä tutkimuksessa sisä- ja ulkoilman sekä sisä- ja ulkopintojen mittaukseen käytettiin jokaiseen 5 anturia, joiden keskiarvoja käytettiin tulosten laskennassa.

Rakennusfysikaalisella tutkimuslaitteistolla mitatulle U-arvolle voidaan antaa $\pm 4,0$ % mittausepävarmuus varmuuskertoimella 2 (Vinha 1998). Tästä mittausepävarmuudesta suurin osa aiheutuu kuitenkin suureista, joiden absoluuttinen mittausvirhe on käytännössä sama

ajallisesti lähekkäin suoritetuissa kokeissa. Näin ollen laitteistolla voidaan tutkia samankaltaisten rakenteiden U-arvojen eroja tarkemmin kuin $\pm 4,0$ % epävarmuudella. Laajempaa mittausepävarmuuden tarkastelua ei kuitenkaan tehty, sillä reunahäiriön ja jokaisen kokeen yksilöllisen asennustyön vaikutusta ei ole käytännössä mahdollista tarkastella laskennallisesti.

Koerakenteet

Sisäisen konvektion vaikutuksia ulkoseinissä tutkittiin kevyellä mineraalivillalla (lasivillalla) ja puhalletulla puukuitueristeellä lämpöeristetyillä koerakenteilla. Tutkittaviksi eristepaksuuksiksi valittiin 200 mm ja 320 mm, joista 200 mm voidaan ajatella edustavan nykyhetken tavanomaisten, U-arvoltaan $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ -vertailutason täyttävien ulkoseinien lämmöneristekerrosten paksuutta. Paksumpien koerakenteiden eristepaksuudeksi valittiin 320 mm, jolloin koerakenteet mahtuivat tuulensuojaeristeen kanssa vielä laitteiston 400 mm syvään tutkimusaukkoon. Koerakenteiden mitat on esitetty kuvassa 7.3.4.



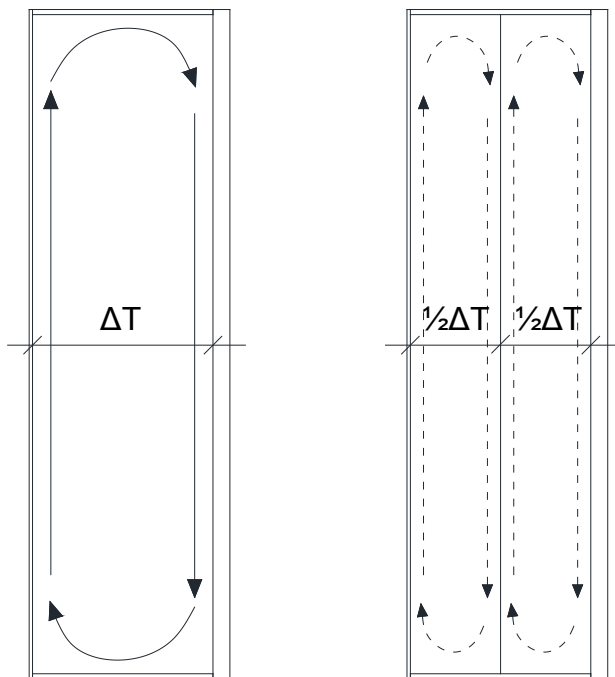
Kuva 7.3.4 *Ulkoseinäkoerakenteiden mitat.*

Koerakenteen keskellä oleva koko eristekerroksen paksuisen tukipuun tiedettiin jo ennen laskennallisia tarkasteluja toimivan merkittävänä kylmäsihtana, mutta koerakennetta ei päätetty toteuttaa esimerkiksi kaksoisrunkona tai levyuomaisilla runkotolpilla, sillä se olisi tuonut ylimääräistä haastavuutta kokeellisten ja laskennallisten tulosten vertailuun. Mekaanisten liittimien määrä koerakenteissa oli vähäinen eikä niiden vaikutusta otettu huomioon laskennallisissa tarkasteluissa.

Osaan koerakenteista asennettiin lämmöneristekerrokseen ns. konvektiokatko. Konvektiokatkolla tarkoitetaan pystysuoraa hyvin vesihöyryä läpäisevää ilmansulkukalvoa,

joka on sisäisen konvektion vähentämiseksi kannattavaa asentaa mahdollisimman keskelle lämmöneristekerrosta. Tällöin eristekerros jakaantuu kahteen lohkoon, joiden sisään muodostuu omat konvektiovirtauskentät ilmansulkukalvon estäessä lohkojen väliset virtaukset. Näiden lohkojen korkeuden ja paksuuden suhde (h/d) on nyt kaksinkertainen ja lämpötilaero yhden lohkon yli on noin puolet koko lämmöneristekerroksen yli olevasta lämpötilaerosta (kuva 7.3.5). Konvektiokatkon erottamissa lohkoissa tapahtuvan sisäisen konvektion voidaan olettaa olevan mitätöntä tai ainakin huomattavasti heikompaa kuin konvektiokatottomassa lämmöneristekerroksessa.

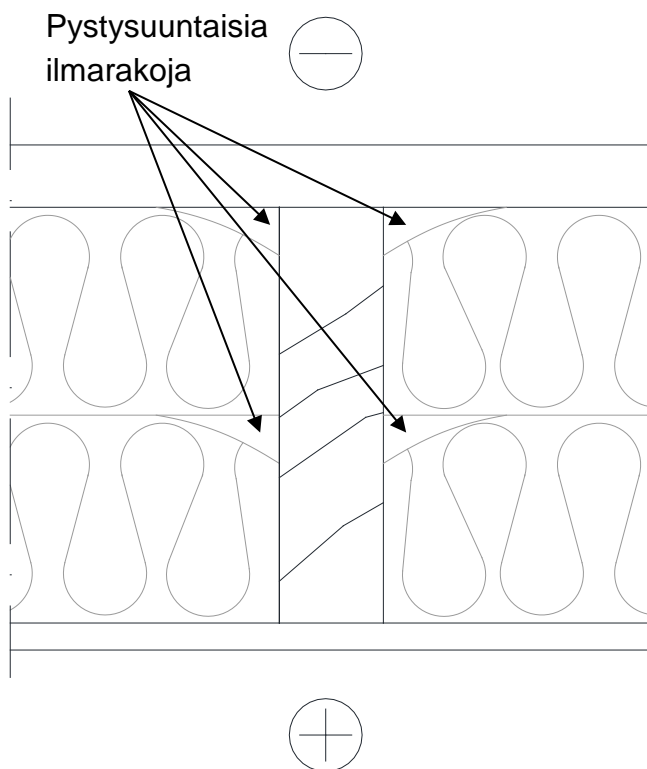
Konvektiokatkot tehtiin hyvin vesihöyryä läpäisevästä muovikuitukankaasta, joka leikattiin ensin oikean levyisiksi kaistoiksi ja kiinnitettiin koerakenteisiin päistään niittaamalla siten, että kalvo jäi kireälle. Niittaamisen lisäksi ylä- ja alapäissä olevat saumat tiivistettiin ilmastointiteipillä (ks. kuva 7.3.8). 320 mm paksuissa lämmöneristekerroksissa konvektiokatkoa ei voitu asentaa täysin keskelle, sillä kerros koostui kahdesta 125 mm paksusta ja yhdestä 70 mm paksusta eristelevystä. Konvektiokatkon vaikutusta ei tutkittu puukuitueristeellä eristetyissä koerakenteissa.



Kuva 7.3.5 Konvektiokatkon vaikutus sisäiseen konvektioon ulkoseinässä. Vasemmalla rakenne, jossa ei ole konvektiokatkoa ja oikealla konvektiokatkollinen rakenne.

Mineraalivillalla eristetyillä koerakenteilla tutkittiin myös asennustyön laadun vaikutusta rakenteiden lämmöneristävyteen. Huolimattoman asentamisen seurauksena lämmöneristelevyjen ja kantavien rakenteiden väliin voi jäädä ilmatiloja lämmöneristeen kulmien pyöristyessä ja painuessa kasaan (kuvat 7.3.6 ja 7.3.7). Asennettaessa lämmöneristelevyjä sisäpuolelta tuulensuojalevyä vasten asentajan on vaikea varmistua siitä, ettei pystysuuntaisia ilmarakoja jää asennettujen eristelevyjen taakse. Tällaisten

pystysuuntaisten ilmarakojen vaikutusta tutkittiin tekemällä kummallakin eristepaksuudella kolme koerakennetta, joissa lämmöneristeiden asennus suoritettiin mahdollisimman tavanomaisesti käyttämättä liikaa aikaa yhden levyn paikalleen asettamiseen (normaali asennus). Vertailua varten tehtiin yhteensä neljä koerakennetta, joissa lämmöneristeiden asennus pyrittiin suorittamaan ideaalisesti (ks. taulukko 7.3.1). Ideaalisella asennuksella tarkoitetaan tässä yhteydessä koerakennetta, jossa lämmöneristemateriaali pyrittiin asentamaan mahdollisimman huolellisesti siten, että eriste täyttää kokonaan sille varatun tilan rakenteessa muodostamatta ollenkaan ilmarakoja. Kaikkien koerakenteiden sisäpinta tehtiin läpinäkyvästä polykarbonaattilevystä, jolloin lämmöneristeiden ideaalisen asennuksen yhteydessä voitiin varmistua siitä, että sisäpintalevyn ja lämmöneristekerroksen väliin ei jäänyt ilmarakoja.



Kuva 7.3.6 Vaakaleikkaus ulkoseinärakenteesta, jonka lämmöneristekerrokseen on jäänyt ilmarakoja epäideaalisesta asentamisesta johtuen.

Huolimattoman asentamisen vaikutusta tutkittiin lisäksi koerakenteilla, joiden lämmöneristyksessä tehtiin tahallinen asennusvirhe jättämällä lämmöneristekerroksen yläreunaan noin 20 mm paksu vaakasuuntainen ilmarako, jossa ilma pääsee kiertämään lämpimältä puolelta kylmälle puolelle (ks. kuva 7.3.9). Vaakasuuntaisen raon vaikutusta tutkittiin myös koerakenteilla, joiden lämmöneristekerrokseen asennettiin konvektiokatko.

Kaikissa mineraalivillalla eristetyissä koerakenteissa käytettiin samaa puurunkoa, johon tehtiin muutoksia kokeiden välillä ainoastaan lämmöneristekerrokseen. Mineraalivillalla eristettyjen koerakenteiden U-arvojen kokeellisia määrittämiä tehtiin yhteensä 10 kpl ja ne on esitetty taulukossa 7.3.1.

Taulukko 7.3.1 Tutkitut koerakenteet, joissa lämmöneristeenä käytettiin mineraalivillaa.

Koerakenne	Lämmöneristekerroksen paksuus [mm]	Asennustapa	Konvektiokatko	Rako yläreunassa
US1	200	ideaali	ei	ei
US2	200	ideaali	kyllä	ei
US3	200	normaali	ei	ei
US4	200	normaali	ei	kyllä
US5	200	normaali	kyllä	kyllä
US6	320	ideaali	ei	ei
US7	320	ideaali	kyllä	ei
US8	320	normaali	ei	ei
US9	320	normaali	ei	kyllä
US10	320	normaali	kyllä	kyllä

Kuvissa 7.3.7–7.3.9 on esitetty valokuvia mineraalivillalla eristetyistä koerakenteista kokeiden purkamisen yhteydessä.

**Kuva 7.3.7** Lämmöneristeen reunan pyöristymiä normaalisti asennetussa koerakenteessa.



Kuva 7.3.8 Konvektiokatko asennettuna koerakenteeseen.



Kuva 7.3.9 Mineraalivillalla eristetty koerakenne, jossa näkyy lämmöneristekerroksen läpäisevä ilmarako yläreunassa.

Puhalletulla puukuitueristeellä lämmöneristetyt koerakenteet olivat mitoiltaan ja materiaaleiltaan samanlaisia kuin mineraalivillalla eristetyt koerakenteet lukuun ottamatta

lämmöneristemateriaalia ja tuulensuojalevyä. Mineraalivillalla eristetyissä koerakenteissa käytettiin tuulensuojana 30 mm paksua mineraalivillalevyä, joka kiinnitettiin koerakenteiden runkotolppiin ruuveilla ja muovisilla aluslevyillä. Puukuitueristeisissä koerakenteissa käytettiin tuulensuojana 25 mm paksua huokoista puukuitulevyä, joka kiinnitettiin koerakenteeseen ruuveilla.

Puhalletulla puukuitueristeellä tehtyjen kokeiden sarja oli suppeampi kuin mineraalivillalla eristettyjen koerakenteiden sarja. Molemmilla eristepaksuuksilla (200 mm ja 320 mm) tutkittiin normaalia rakennetta, jossa eriste oli puhallettu tavanomaisesti rakenteeseen tuulensuojalevyä vasten. Lisäksi tutkittiin kaksi rakennetta, joissa puhallus suoritettiin kuten normaaleissakin koerakenteissa, mutta niiden yläreunaan jätettiin noin 20 mm paksu vaakasuora ilmarako. Kokeita tehtiin siis yhteensä 4 kpl Puhalletun eristeen tapauksessa ilmarako voi todellisuudessa muodostua rakenteeseen esimerkiksi eristeen painuman seurauksena.

Taulukko 7.3.2 Tutkitut koerakenteet, joissa lämmöneristeenä käytettiin puhallettua puukuitueristettä.

Koerakenne	Lämmöneristekerroksen paksuus [mm]	Rako yläreunassa
US11	200	ei
US12	200	kyllä
US13	320	ei
US14	320	kyllä

Taulukossa 7.3.3 on esitetty koeseinärakenteissa käytetyistä materiaaleista lämpövirtalaitteella ja ilmanläpäisylaitteella mitatut lämmönjohtavuudet ja ilmanläpäisevydet, joita käytettiin laskennallisten U-arvojen ja modifioitujen Rayleigh'n lukujen laskemiseen.

Taulukko 7.3.3 Koerakenteissa käytettyjen materiaalien lämmönjohtavuudet ja ilmanläpäisevydet.

Materiaali	Lämmönjohtavuus λ [W/(m·K)]	Ilmanläpäisevyys κ_a [m ³ /(m·s·Pa)]
Mineraalivilla	0,035	202×10 ⁻⁶
Puukuitueriste	0,042	236×10 ⁻⁶
Tuulensuojalevy (mineraalikuitu)	0,029	-
Tuulensuojalevy (puukuitu)	0,050	-
Liimapuu	0,10	-
Vaneri	0,25	-
Polykarbonaatti	0,2 ¹	-

¹ Lämmönjohtavuuden arvoa ei mitattu, vaan se otettiin standardista SFS-EN ISO 10456 (2008).

Vanerin lämmönjohtavuuden mittausta varten tehtiin koekappale liimaamalla 30 kappaletta noin $50 \times 300 \text{ mm}^2$ kokoisia vanerisoioja lappeistaan toisiinsa siten, että lopulta muodostui noin 50 mm paksu, $300 \times 300 \text{ mm}^2$ kokoinen koekappale, jonka pinnat hiottiin tasaisiksi. Tällaisesta koekappaleesta lämpövirtaläylälaiteella mitattu lämmönjohtavuus vastaa vanerin lämmönjohtavuutta viilujen suunnassa.

Puukuitueristeen ilmanläpäisevyytenä käytettiin samaa mitattua arvoa kuin yläpohjienkin tutkimuksessa (tiheys $40,7 \text{ kg/m}^3$). Ulkoseinäkoekokeiden tapauksessa kyseinen arvo on oletettavasti todellista arvoa hiukan suurempi, sillä ilmanläpäisevyys mitattiin ripottelemalla eristemateriaali ilmanläpäisylaitteeseen, jolloin määrittämisessä ei otettu huomioon puhalluksessa käytetyn sideaineen vaikutusta. Mineraalivillan ilmanläpäisevyys mitattiin eristelevyn tason suuntaisesti (ns. y-suunnassa).

Laboratoriokokeiden tulokset

Taulukossa 7.3.4 on esitetty ulkoseinäkoekokeiden laboratoriokokeissa mitatut pintalämpötilat (T_{si} = sisäpinta ja T_{se} = ulkopinta), lämpövirrat koerakenteiden läpi sekä edellä mainituista suureista lasketut U-arvot. Taulukon $U_{0,17}$ -arvolla tarkoitetaan pinnasta pintaan U-arvoa (ks. luku 7.1), johon on lisätty standardin SFS-EN ISO 6946 (2008) mukaisten sisä- ja ulkopinnan pintavastusten vaikutus (yhteensä $0,17 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$) koko rakenteen lämmönvastukseen (U-arvon käänteislukuun).

Taulukko 7.3.4 Koeseinäkoekokeiden laboratoriokokeiden tulokset.

Koe	T_{si} [°C]	T_{se} [°C]	Φ_{rak} [W]	q_{rak} [W/m ²]	$U_{0,17}$ [W/(m ² K)]
US1	19,0	-14,8	8,13	5,79	0,167
US2	19,0	-14,7	8,06	5,74	0,165
US3	19,0	-14,8	8,43	6,01	0,173
US4	19,1	-14,8	8,59	6,12	0,175
US5	19,1	-14,8	8,71	6,20	0,178
US6	19,4	-15,0	6,37	4,54	0,130
US7	19,4	-15,0	6,16	4,39	0,125
US8	19,3	-14,9	6,22	4,43	0,127
US9	19,3	-15,0	6,89	4,91	0,140
US10	19,3	-14,9	6,91	4,92	0,140
US11	18,9	-14,6	11,40	8,12	0,233
US12	18,8	-14,6	12,67	9,02	0,258
US13	19,0	-14,7	8,92	6,35	0,182
US14	19,1	-14,8	9,06	6,45	0,185

Kokeellisesti määritettyjen $U_{0,17}$ -arvojen lisäksi koerakenteista laskettiin standardin SFS-EN ISO 6946 (2008) mukaisella yläraja-alaraja -menetelmällä U-arvot. Standardissa on esitetty menetelmä, jolla voidaan laskea tiettyjen ehtojen täytyessä seinärakenteen kokonaislämmönvastuksen ylä- ja alalikiarvot, joiden keskiarvon käänteisluku on rakenteen korjaamaton U-arvo. Korjattu U-arvo lasketaan RakMK C4 (2012):n mukaan kaavoilla:

$$U_c = U + \Delta U \quad (7.3.1)$$

$$\Delta U = \Delta U_g + \Delta U_f + \Delta U_r + \Delta U_\psi \quad (7.3.2)$$

missä

- U_c on rakennusosan korjattu U -arvo [$W/(m^2 \cdot K)$]
 U on rakennusosan korjaamaton U -arvo [$W/(m^2 \cdot K)$]
 ΔU on U -arvon korjaustermi [$W/(m^2 \cdot K)$]
 ΔU_g on ilmarakojen korjaustekijä [$W/(m^2 \cdot K)$]
 ΔU_f on mekaanisten kiinnikkeiden korjaustekijä [$W/(m^2 \cdot K)$]
 ΔU_r on käännettyjen kattojen korjaustekijä [$W/(m^2 \cdot K)$]
 ΔU_ψ on säännöllisten viivamaisten kylmäsiltojen korjaustekijä [$W/(m^2 \cdot K)$].

Koska mekaanisten liittimien määrä koerakenteissa oli vähäinen, korjattua U_c -arvoa laskettaessa otettiin huomioon ainoastaan ilmarakojen korjaustekijä ΔU_g , joka lasketaan kaavalla:

$$\Delta U_g = \Delta U'' \left(\frac{R_1}{R_{T,h}} \right)^2 \quad (7.3.3)$$

missä

- $\Delta U''$ on ilmaraon korjauskerroin [$W/(m^2 \cdot K)$]
 R_1 on ilmarakojen sisältävän kerroksen lämmönvastus ilman kylmäsiltojen vaikutusta [$m^2 \cdot K/W$]
 $R_{T,h}$ on koko rakenneosan lämmönvastus ilman korjaustekijöiden ja kylmäsiltojen vaikutusta [$m^2 \cdot K/W$].

Ilmaraon korjauskerroin $\Delta U''$ riippuu rakenteen sisältämien ilmarakojen tyypistä. $\Delta U''$:n arvo valitaan korjaustason ja ilmaraon kuvauksen mukaan taulukosta 7.3.5 (RakMK C4 2012).

Taulukko 7.3.5 Ilmarakojen korjauskertoimet eri tapauksissa.

Korjaus-taso	Ilmaraon kuvaus	$\Delta U''$ [$W/(m^2 \cdot K)$]
0	Lämmöneristeessä ei ole ilmarakoja tai on vain vähäisiä ilmarakoja, joilla ei ole merkittävää vaikutusta lämmönläpäisykerrotimeen.	0,00
1	On lämmöneristeeseen läpäiseviä ilmarakoja, jotka eivät aiheuta ilman kiertokulkua lämmöneristeeseen lämpimän ja kylmän puolen välillä	0,01
2	On lämmöneristeeseen läpäiseviä ilmarakoja, jotka aiheuttavat ilman kiertokulkua lämmöneristeeseen lämpimän ja kylmän puolen välillä	0,04

Taulukossa 7.3.6 on esitetty koerakenteiden lämmöneristekerrosten modifoidut Rayleigh'n luvut (ei-konvektiokatkolliset koerakenteet), U_c -arvot, U_c -arvoja laskettaessa käytetyt korjaustasot sekä U_c -arvojen ja kokeellisesti määritettyjen $U_{0,17}$ -arvojen koerakennekohtaiset

prosentuaaliset erot. Modifioidut Rayleigh'n luvut laskettiin käyttämällä mitattuja lämmönjohtavuuksia ja koko rakenteen yli olevana lämpötilaerona koeolosuhteiden mukaista arvoa 35 °C. U_c -arvoja laskettaessa käytettiin myös mitattuja lämmönjohtavuuksia suunnittelulämmönjohtavuuksien sijaan, sillä tutkimuksessa oltiin kiinnostuneita siitä, kuinka tarkasti käsinlaskumenetelmä ja siinä käytettävät korjaustermit vastaavat todellisuutta.

Taulukko 7.3.6 Kokeellisten $U_{0,17}$ -arvojen ja korjattujen U_c -arvojen vertailu.

Koerakenne	Eristys	Korjaustaso	Ra_m [-]	$U_{0,17}$ [W/(m ² ·K)]	U_c [W/(m ² ·K)]	Ero [%]
US1	200 MI	0	1,80	0,167	0,162	3,1
US2	200 MIK	0	0,45	0,165	0,162	1,9
US3	200 MN	1	1,80	0,173	0,169	2,4
US4	200 MNR	2	1,80	0,175	0,190	-7,9
US5	200 MNRK	1	0,45	0,178	0,169	5,3
US6	320 MI	0	3,08	0,130	0,111	17,1
US7	320 MIK	0	1,14	0,125	0,111	12,6
US8	320 MN	1	3,08	0,127	0,119	6,7
US9	320 MNR	2	3,08	0,140	0,142	-1,4
US10	320 MNRK	1	1,14	0,140	0,119	17,6
US11	200 PN	0	1,83	0,233	0,205	13,7
US12	200 PR	2	1,83	0,258	0,235	20,0
US13	320 PN	0	3,13	0,182	0,136	33,8
US14	320 PR	2	3,13	0,185	0,170	8,8

Taulukon sarakkeessa "Eristys" olevat numeroarvot tarkoittavat lämmöneristekerroksen paksuutta millimetreissä. Kirjaimien selite:

M mineraalivilla
P puukuitueriste
I ideaalinen asennus
N normaali asennus
K konvektiokatko
R ilmarako

Voidaan olettaa, että yhtä paksujen mineraalivillalla eristettyjen ideaalisten koerakenteiden ja ideaalisten konvektiokatkollisten koerakenteiden $U_{0,17}$ -arvojen erot johtuvat enimmäkseen sisäisen konvektion vaikutuksesta, jolloin koerakenteille US1 (200 mm mineraalivilla, ideaalinen asennus) ja US6 (320 mm mineraalivilla, ideaalinen asennus) voidaan laskea Nusseltin luvut:

$$Nu_{US1} = \frac{U_{0,17 US1}}{U_{0,17 US2}} = \frac{0,167}{0,165} \approx 1,01 \quad (7.3.4)$$

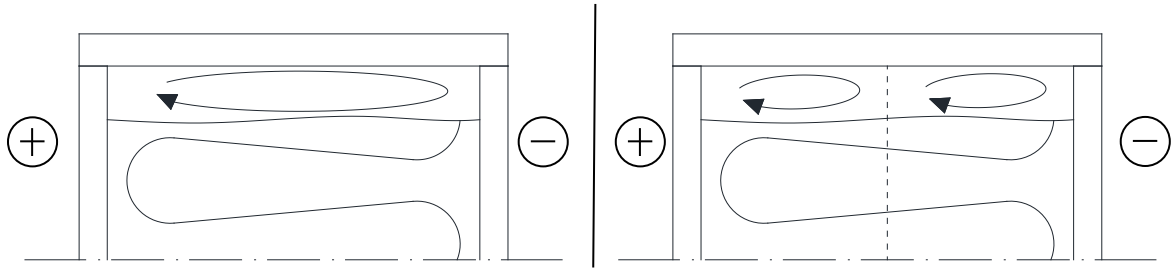
$$Nu_{US6} = \frac{U_{0,17 US6}}{U_{0,17 US7}} = \frac{0,130}{0,125} \approx 1,04 \quad (7.3.5)$$

Molemmissa tapauksissa sisäisen konvektion vaikutus lämmönsiirtoon koko rakenteen yli on koetulosten perusteella varsin pieni 35 °C lämpötilaerolla. Koeolosuhteiden ja mitattujen materiaaliominaisuuksien mukainen Ra_m ylitti 320 mm paksulla rakenteella kriittisen raja-

arvon 2,5 mutta koska koetulosten mukainen sisäisen konvektion vaikutus tässä tapauksessa oli vain noin 4 %, voidaan ulkoseinärakenteiden $R_{a,m}$:lle asetettua kriittistä raja-arvoa pitää vähintäänkin riittävänä. Lisäksi koerakenteiden korkeuden ja paksuuden suhde (h/d) on noin puolet verrattuna koko kerroksen korkuiseen seinään, jossa sisäinen konvektio on oletettavasti vielä vähäisempää. Tuloksia arvioitaessa on kuitenkin otettava huomioon, että kaavoilla 7.3.4 ja 7.3.5 lasketut Nusseltin luvut kuvaavat sisäisen konvektion aiheuttamaa prosentuaalista lisäystä koko koerakenteen lämmönsiirtoon, josta tietty osuus aiheutuu kylmäsiltojen vaikutuksesta. Sisäinen konvektio muuttaa rakenteessa eniten eristekerroksen lämpöteknistä käyttäytymistä ja mitä pienempi vaikutus rakenteen sisältämällä kylmäsiltoilla on rakenteen läpi siirtyvään lämpövirtaan, sitä suurempi prosentuaalinen vaikutus sisäisellä konvektiolla on koko rakenteen U -arvoon.

Mineraalivillalla eristetyistä koerakenteista lasketut U_c -arvot ovat 200 mm eristepaksuuksilla varsin lähellä kokeellisia tuloksia. Sekä 200 mm että 320 mm eristyspaksuuksilla toteutetuista ilmaraolisista ja konvektiokatottomista koerakenteista lasketut U_c -arvot ovat kokeellisia U -arvoja hiukan suurempia. Kun laskennallisissa tuloksissa otetaan huomioon korjaustason 1 mukainen lisäys U_c -arvossa, voidaan sen avulla ottaa huomioon pienien epäideaalisesta asentamisesta aiheutuneiden virheiden vaikutus 200 mm eristepaksuudella toteutetussa rakenteessa. 320 mm eristepaksuudella korjauskertoimen vaikutus ei ole aivan riittävä. Jos rakenteen lämmöneristekerros sisältää ilmaraon (≤ 20 mm), joka aiheuttaa ilman kiertokulkua lämpimältä puolelta kylmälle puolelle, korjaustason 2 mukainen ilmarakojen korjaustekijä ottaa riittävästi huomioon ilmaraon vaikutuksen U_c -arvoa laskettaessa paksuillakin rakenteilla.

Koerakenteiden US4, US5, US9 ja US10 koetuloksista voidaan päätellä, että konvektiokatko ei vaikuta ilmaraon aiheuttamaan lämmöneristävyuden heikkenemiseen. Mikäli suorakaiteen muotoisen, toiselta sivulta lämmitetyn ilmatilan h/d -arvo laskee alle 1, alkaa konvektion vaikutuskin laskea (Hagentoft 2001). Kuvassa 7.3.10 (vasen puoli) on vapaasti kuvattu luonnollisen konvektion aiheuttamat oletetut virtaussuunnat vaakasuuntaisessa ilmaraossa, jossa ei ole konvektiokatkoa. Kuvassa oikealla puolella on vastaavasti tapaus, jossa konvektiokatko jakaa ilmaraon kahteen lohkoksi. Oikeanpuoleisessa tapauksessa lämpötilaero molempien ilmarakolohkojen yli on puolet verrattuna vasemmanpuoleiseen, mutta toisaalta h/d on lähempänä arvoa 1. Lisäksi lämpösäteilyllä on oleellinen vaikutus ilmaraoissa, mutta sen suuruus konvektioon nähden on vaikeasti arvioitavissa. Koetulosten perusteella konvektion ja säteilyn yhteinen vaikutus koko rakenteen yli molemmissa tapauksissa on samaa suuruusluokkaa.



Kuva 7.3.10 Luonnollisen konvektion aiheuttamat ilmavirtaukset vaakasuuntaisissa ilmaraoissa.

Koetuloksista US1 ja US3 huomataan, että 200 mm eristekerroksella ideaalinen asennus tuotti hieman pienemmän U-arvon kuin normaali asennus, kun vastaavasti 320 mm paksulla eristekerroksella normaali asennus (US8) tuotti hieman paremman U-arvon kuin ideaalinen asennus (US6). Erot ovat molemmilla eristepaksuuksilla kuitenkin pieniä ja tästä voidaan päätellä, että pienillä kuvan 7.3.6 mukaisilla epäideaalisesta asentamisesta aiheutuneilla ilmaraoilla ei ole merkittävää vaikutusta rakenteen U-arvoon.

Puukuitueristeen puhaltaminen koerakenteisiin suoritettiin TTY:n ulkopuolella. Tästä syystä puukuitueristeisille koerakenteille jouduttiin tekemään kuljetuksia, joiden aikana koerakenteisiin aiheutui vaurioita (kuva 7.3.11). Puukuitueristeisten koerakenteiden kokeellisesti määritetyt U-arvot olivat selvästi suurempia kuin laskennalliset. Tämän voidaan olettaa osittain johtuvan koerakenteiden saamista vaurioista kuljetusten aikana sekä odottamattoman voimakkaasta eristeen painumasta, jota tapahtui koerakenteiden säilytyksen aikana. Koerakenteita säilytettiin tutkimuksen ajan pystyasennossa ilman jäykkää sisäpintalevyä mutta koerakenteiden eristekerros suojattiin säilytyksen ajan niittaamalla sisäpinnaksi muovikalvo mahdollisimman kireälle. Muovikalvosta huolimatta 320 mm paksuissa eristekerroksissa eristeet painuivat voimakkaasti säilytyksen aikana pullistuen sisäpinnasta vaakasuunnassa ulospäin ja muodostaen huomattavat ilmaraoit yläreunoihin. Myös 200 mm paksuissa eristekerroksissa tapahtui jonkin verran painumaa, mutta ei vastaavaa vaakasuuntaista pullistumaa kuin 320 mm paksuissa eristekerroksissa. Lisäksi kuvista 7.3.14 ja 7.3.15 voidaan nähdä, että etenkin keskimmäisen tukipuun läheisyydessä eristemateriaalin homogeeninen koostumus on selvästi häiriintynyt painumisen seurauksena. Painuman vaikutuksia pyrittiin korjaamaan lisäämällä varovasti puukuitueristettä muodostuneihin ei-toivottuihin ilmarakoihin, mutta lisätyssä eristeessä ei kuitenkaan ollut puhalluksessa käytettävää sideainetta (ks. kuva 7.3.15).



Kuva 7.3.11 Kuljetuksen aikana koerakenteeseen (320 mm paksu puukuitueriste) syntynyt vaurio reunapuussa.

Lisäksi 200 mm eristepaksuuden koerakenteissa sisäpinnan polykarbonaattilevyn ja eristeen väliin jäi selvästi ohut tasomainen ilmarako. Kuvassa 7.3.12 on esitetty 200 mm puukuitueristeinen koerakenne, jossa ei ole sisäpintalevyä. Kuvasta voidaan nähdä, että eristeen sisäpinta poikkeaa kauttaaltaan 1–3 mm runkopuiden sisäpinnan tasosta, johon polykarbonaattilevy kiinnitettiin. Pystyrakenteessa sisäisen konvektion aiheuttamien ilmavirtausten virtausnopeus on suurimmillaan eristeen sisä- ja ulkopinnan välittömässä läheisyydessä, jolloin eristeen tuoman virtausvastuksen puuttuminen eristekerroksen sisäpinnasta voidaan olettaa voimistavan sisäisen konvektion vaikutusta.



Kuva 7.3.12 Puukuitueristeellä eristetty koerakenne ilman sisäpintalevyä.

Vaikka puukuitueristeen ilmanläpäisevyys oli jonkin verran mineraalivillaa suurempi, on epätodennäköistä, että suuret kokeellisesti määritetyt U-arvot olisivat aiheutuneet enimmäkseen sisäisestä konvektiosta. Koetulosten perusteella voidaan todeta, että koelementeissä olleet rakenteelliset vauriot voivat heikentää merkittävästi rakenteiden lämmöneristävyyttä. Lisäksi koerakenteissa käytetty puhallettu puukuitueriste osoittautui luultua herkemmin painuvaksi materiaaliksi. Lämpö- ja kosteusteknisen toimivuuden takaamiseksi puhalletuilla puukuitueristeillä eristetyt seinärakenteet tarvitsevat lisätutkimusta, johon tulisi sisällyttää myös kenttäkokeita olemassa olevista rakennuksista. Tällöin saataisiin tietoa, kuinka asentamisen laatu ja painuminen vaikuttavat rakenteen U-arvoon todellisissa rakenteissa.



Kuva 7.3.13 *Painuman jälkiä koerakenteessa, jossa ilmarakoa ei ollut vielä välittömästi puhalluksen jälkeen (puukuitueriste 200 mm, normaali).*



Kuva 7.3.14 *Painuman jälkiä koerakenteessa, jossa ilmarakoa ei ollut vielä välittömästi puhalluksen jälkeen (puukuitueriste 320 mm, normaali).*



Kuva 7.3.15 Painuman vaikutuksia on korjattu vasemmassa lohossa lisäämällä varovasti eristettä (puukuitueriste 320 mm, normaali).

7.3.2 Laskennalliset tarkastelut

Laskentaan liittyvä teoria

Ulkoseinien sisäistä konvektiota tarkasteltiin laboratoriokokeiden lisäksi numeerisesti elementtimenetelmään perustuvalla COMSOL Multiphysics -laskentaohjelmalla (versio 4.2a), jolla voidaan ratkaista likiarvot lämpötila-, paine- ja virtauskentälle mielivaltaisessa geometriassa, kun tunnetaan tarkasteltavan tilanteen lämmön siirtymistä ja virtausdynamiikkaa hallitsevat osittaisdifferentiaaliyhtälöt ja reunaehdot. Laskentaohjelman ratkaistua toinen toisiinsa vaikuttavat virtaus- ja lämpötilakentät, voidaan tuloksista laskea ohjelman jälkikäsittelijällä lämpövirta mallinnettavan rakenteen läpi. Lämpövirran perusteella voidaan puolestaan laskea rakenteelle U-arvo, jossa on otettu lämmöneristyskerroksen sisäinen konvektio huomioon. Lämpötila-, paine- ja virtauskenttä huokoisessa materiaalissa voidaan ratkaista yleisesti tunnetusta lämpöyhtälöstä ja ns. Brinkmanin yhtälöistä (kaavat 7.3.7–7.3.9).

Lämmöneristeen huokosten sisältämän ilman tiheys voidaan ilmoittaa paineen ja lämpötilan funktiona:

$$\rho(p, T) = \frac{M_a p}{RT} = \frac{p}{R_a T} \quad (7.3.6)$$

missä

ρ	on ilman tiheys [kg/m^3]
p	on ilmanpaine [Pa]
M_a	on ilman molekyylimassa (28,96 kg/kmol)
R	on yleinen kaasuvakio (8314,3 J/(kmol·K))
R_a	on ilman ominaiskaasuvakio (287,1 J/(kg·K))
T	on lämpötila [K]

Luonnollinen konvektio huokoisen materiaalin lämmönsiirrossa otetaan huomioon sijoittamalla ilman tiheyden funktio $\rho(p,T)$ lämpöyhtälöön (kaava 7.3.7) ja Brinkmanin yhtälöihin (kaavat 7.3.8 ja 7.3.9):

Lämpöyhtälö (kun materiaaleissa ei tapahdu sisäistä lämmöntuottoa; $Q = 0 \text{ W/m}^3$):

$$\rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (7.3.7)$$

missä

c_p on ominaislämpökapasiteetti [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]

\mathbf{u} on virtausnopeusvektori = $[u(x,y), v(x,y), w(x,y)]^T$ [m/s]

(u = virtausnopeus x -suuntaan, v = virtausnopeus y -suuntaan ja w = virtausnopeus z -suuntaan)

∇ on gradientti: $\hat{\mathbf{e}}_x(\partial/\partial x) + \hat{\mathbf{e}}_y(\partial/\partial y) + \hat{\mathbf{e}}_z(\partial/\partial z)$, missä $\hat{\mathbf{e}}_x$ = x -suuntainen yksikkövektori

$\nabla \cdot$ on divergenssi: vektorille $\mathbf{A} = A_1 \hat{\mathbf{e}}_x + A_2 \hat{\mathbf{e}}_y + A_3 \hat{\mathbf{e}}_z$
 $\rightarrow \nabla \cdot \mathbf{A} = (\partial A_1/\partial x) + (\partial A_2/\partial y) + (\partial A_3/\partial z)$

$\hat{\mathbf{e}}_n$ = n -suuntainen yksikkövektori

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

Brinkmanin yhtälöt stationäärisessä tilassa (Nield & Bejan 2006), jossa sisäinen konvektio otetaan huomioon tilavuusvoimavektorilla \mathbf{F} , jonka y -suuntaiseksi komponentiksi asetetaan painovoiman ja ilman tiheyden tulo:

$$\frac{\rho}{\varepsilon_p} \left((\mathbf{u} \cdot \nabla) \frac{\mathbf{u}}{\varepsilon_p} \right) = \nabla \cdot \left[-p\mathbf{I} + \frac{\eta_a}{\varepsilon_p} (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2\eta_a}{3\varepsilon_p} (\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I} \right] - \frac{\eta_a}{k_a} \mathbf{u} + \mathbf{F} \quad (7.3.8)$$

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (7.3.9)$$

missä

ε_p on huokoisuus [-] (tutkimuksessa käytettiin kaikissa laskelmissa arvoa 0,98)

$\mathbf{u} \cdot \nabla$ on advektio-operaattori: $u(\partial/\partial x) + v(\partial/\partial y) + w(\partial/\partial z)$

\mathbf{I} on yksikkömatriisi

η_a on ilman dynaaminen viskositeetti [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]

k_a on permeabiliteetti ilmalle = $(\kappa_a \cdot \eta_a)$ [m^2] (κ_a = ilmanläpäisevyys)

\mathbf{F} on tilavuusvoimavektori = $(0, (-g \cdot \rho), 0)^T$ [N/m^3] ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$)

Laskentaohjelmassa käytettävien numeeristen menetelmien teoreettisia perusteita ei käsitellä tässä raportissa. Laskentaohjelman toimintaa voidaan kuitenkin luonnehtia siten, että se ratkaisee yhtälöissä esiintyvät tuntemattomat muuttujat äärellisessä määrässä pisteitä siten, että lämmön- ja ilmansiirtoa hallitsevat yhtälöt toteutuvat keskimäärin koko tarkastellussa geometriassa.

Laskentatulosten vertailu koetuloksiin

Ulkoseinien sisäisen konvektion numeeriset tarkastelut voidaan jakaa kahteen osaan. Ensimmäisessä osassa mallinnettiin osa laboratoriokokeissa käytetyistä koerakenteista kokeiden mukaisissa lämpötilaolosuhteissa ($T_i = 20 \text{ °C}$, $T_e = -15 \text{ °C}$), jolloin voitiin vertailla laskentaohjelmalla saatuja arvoja koetuloksiin. Toisessa osassa tehtiin sarja 2D-mallinnuksia tyypilliselle puurankarakenteiselle seinälle eri eristepaksuuksilla ja kahdella eri seinän korkeudella (ks. seuraava luku).

Numeerisen laskennan raskaudesta johtuen laboratoriokokeita vastaavia tilanteita ei pystytty mallintamaan aidosti kolmiulotteisina. Koerakenteiden kolmiulotteisuus otettiin kuitenkin huomioon tekemällä laskentaohjelmalla U-arvon määrittäminen sekä kolmiulotteisella että kaksiulotteisella mallilla, joista ratkaistiin pelkästään lämmön johtuminen. Kolmiulotteisesti ja kaksiulotteisesti määritettyjen U-arvojen erotus kuvaa pystypuiden osuutta U-arvossa.

Kolmiulotteisesti mallinnettu U-arvo, jossa sisäinen konvektio ja pystyputet otetaan huomioon, voidaan laskea seuraavasti:

$$U_{3D,conv} = U_{2D,conv} + (U_{3D} - U_{2D}) \quad (7.3.10)$$

missä

- $U_{3D,conv}$ on numeerisesti määritetty U-arvo, jossa sisäinen konvektio ja pystyputet on otettu huomioon [$W/(m^2 \cdot K)$]
- $U_{2D,conv}$ on kaksiulotteisesti määritetty U-arvo, jossa on mallinnettu sisäinen konvektio, mutta jossa ei ole pystypuiden vaikutusta [$W/(m^2 \cdot K)$]
- U_{3D} on kolmiulotteisesti määritetty U-arvo, jossa otettiin huomioon pelkästään lämmön johtuminen [$W/(m^2 \cdot K)$]
- U_{2D} on kaksiulotteisesti määritetty U-arvo, jossa otettiin huomioon pelkästään lämmön johtuminen [$W/(m^2 \cdot K)$]

Koerakenteiden U-arvojen numeerisissa määrittämisissä käytettiin kappaleessa 7.3.1 esitettyjä materiaaliominaisuuksia (taulukko 7.3.3). Pintavastuksina käytettiin laboratoriokokeita vastaavia arvoja ($0,04 + 0,13 = 0,17 \text{ m}^2\text{K/W}$). Ilman materiaaliominaisuuksina käytettiin laskentaohjelmaan sisäänrakennetun kuivan ilman materiaalimallin mukaisia lämpötilasta riippuvia arvoja.

Vaakasuuntaisia ilmarakojen sisältäviä rakenteita ei mallinnettu. Sisäisen konvektion huomioon ottavat numeeriset U-arvojen määrittäykset tehtiin koerakenteille US1, US6, US11 ja US13. Koerakenteille US2 ja US6 (konvektiokatkolliset koerakenteet) tehtiin U-arvojen numeeriset määrittäykset olettaen, että sisäistä konvektiota ei tapahdu ollenkaan. Laskentatulokset on esitetty taulukossa 7.3.7.

Taulukko 7.3.7 Numeerisesti määritetyt U -arvot koerakenteille.

Koerakenne	Eristys	U_{3D} [W/(m ² K)]	U_{2D} [W/(m ² K)]	ΔU_{3D-2D} ¹ [W/(m ² K)]	$U_{2D,cqnv}$ [W/(m ² K)]	$U_{3D,cqnv}$ [W/(m ² K)]
US1	200MI	0,165	0,153	0,012	0,155	0,167
US2	200MIK	0,165	-	-	-	-
US6	320MI	0,113	0,103	0,010	0,110	0,120
US7	320MIK	0,113	-	-	-	-
US11	200PN	0,206	0,193	0,013	0,196	0,210
US13	320PN	0,137	0,128	0,010	0,137	0,147

¹ $\Delta U_{3D-2D} = U_{3D} - U_{2D}$

Numeerisesti määritetyistä U -arvoista voidaan laskea vastaavasti kuin koetuloksistakin (ks. kaavat 7.3.4 ja 7.3.5) Nusseltin luvut tapauksille US1, US6, US11 ja US13:

$$Nu_{US1,COMSOL} = \frac{U_{3D,conv US1}}{U_{3D US2}} = \frac{0,167}{0,165} \approx 1,01 \quad (7.3.11)$$

$$Nu_{US6,COMSOL} = \frac{U_{3D,conv US6}}{U_{3D US7}} = \frac{0,120}{0,113} \approx 1,06 \quad (7.3.12)$$

$$Nu_{US11,COMSOL} = \frac{U_{3D,conv US11}}{U_{3D US11}} = \frac{0,210}{0,206} \approx 1,02 \quad (7.3.13)$$

$$Nu_{US13,COMSOL} = \frac{U_{3D,conv US13}}{U_{3D US13}} = \frac{0,147}{0,137} \approx 1,07 \quad (7.3.14)$$

Taulukossa 7.3.8 on vertailtu numeerisesti määritettyjä koerakenteiden U -arvoja kokeellisesti määritettyihin $U_{0,17}$ -arvoihin ja käsinlaskettuihin U_c -arvoihin. U_{c1} -arvoissa on otettu huomioon ilmarakojen korjaustekijä ΔU_g , jossa korjauskerroin $\Delta U'' = 0,01$ on valittu korjaustason 1 mukaan (ks. kaava 7.3.3 ja taulukko 7.3.5).

Taulukko 7.3.8 Eri tavoilla määritettyjen U -arvojen vertailu ($U_{comsol} = U_{3D,conv}$).

Koerakenne	Eristys	$U_{0,17}$ [W/(m ² K)]	U_c [W/(m ² K)]	U_{c1} ¹ [W/(m ² K)]	U_{comsol} [W/(m ² K)]
US1	200MI	0,167	0,162	0,169	0,167
US2	200MIK	0,165	0,162	0,169	0,165
US6	320MI	0,13	0,111	0,119	0,120
US7	320MIK	0,125	0,111	0,119	0,113
US11	200PN	0,233	0,205	0,212	0,210
US13	320PN	0,182	0,136	0,145	0,147

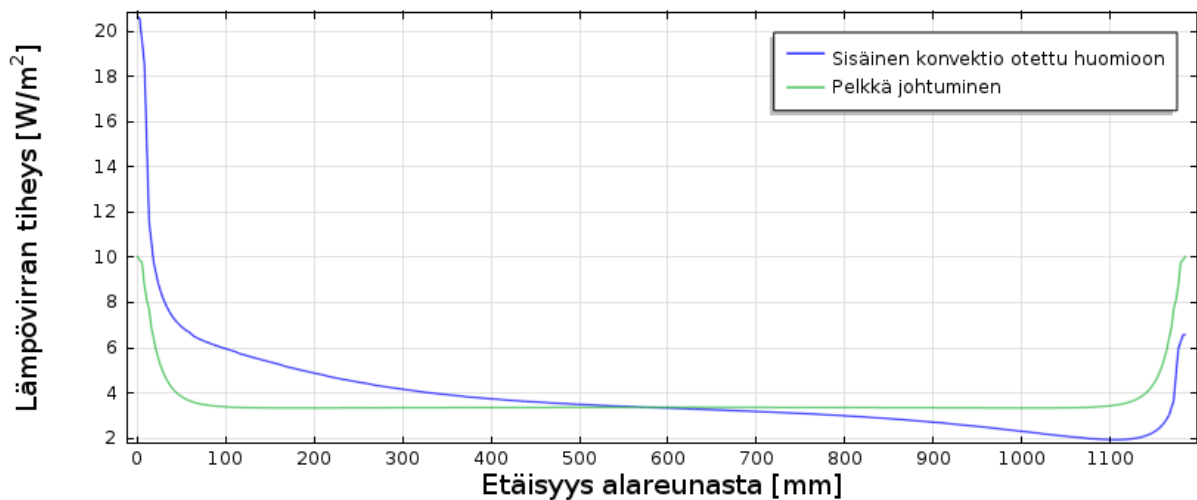
¹ U_{c1} -arvoissa on otettu huomioon ilmarakojen korjaustekijä ΔU_g ja korjaustasona on käytetty tasoa 1 (ks. taulukko 7.3.5).

Taulukosta 7.3.8 nähdään, että mineraalivillalla eristettyjen ideaalisten koerakenteiden laskennallisesti määritetyt U -arvot vastaavat hyvin kokeellisia tuloksia ja laskentaohjelmaa

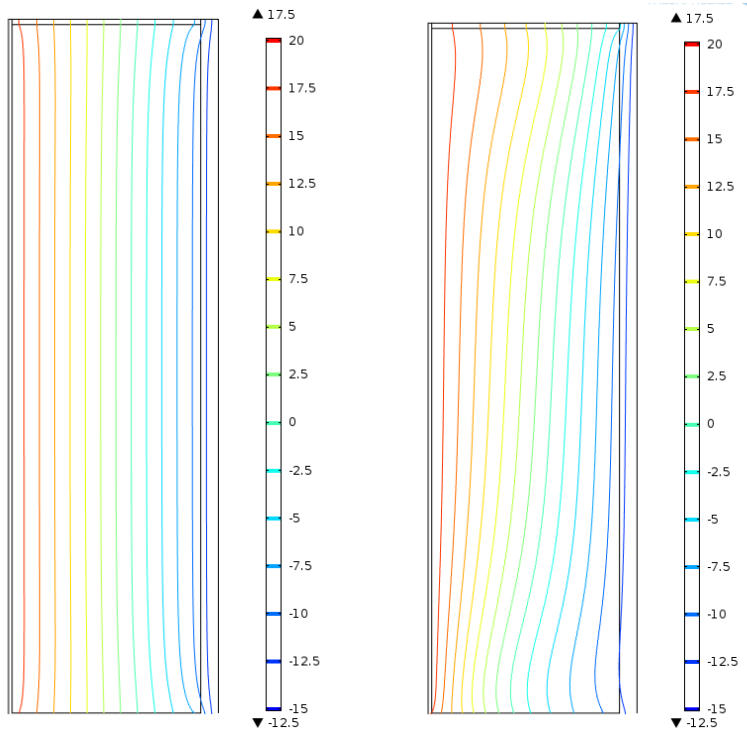
voidaan pitää luotettavana työkaluna sisäisen konvektion tutkimisessa ulkoseinärakenteissa. Vaikka puukuitueristeen mitattu ilmanläpäisevyys oli hiukan suurempi kuin mineraalivillalla, laskentaohjelmalla saadut tulokset vahvistavat käsitystä siitä, ettei oleellisesti suuremmat kokeellisesti määritetyt U-arvot puukuitueristeisistä koerakenteista voineet aiheutua pelkästään sisäisestä konvektiosta tai reunahäiriöstä, vaan rakenteiden vaurioilla ja eristeen painumisella oli merkittävin osuus (ks. luku 7.3.1).

Käsinlasketut U_c -arvot ilman ilmarakojen korjaustekijän vaikutusta ovat hieman pienempiä kuin laskentaohjelmalla määritetyt arvot sekä mineraalivillalla että puukuitueristeellä eristetyissä seinärakenteissa. Jos käsinlaskenta-arvoon lisätään ilmarakojen korjaustekijän vaikutus korjaustason 1 mukaisesti, voidaan tällä korjauksella ottaa riittävässä määrin huomioon laskentaohjelman ja käsinlaskennan väliset erot seinärakenteissa, joiden paksuus on ≤ 320 mm. Tämä tulos puoltaa sitä, että avohuokoisilla lämmöneristeillä eristetyissä rankarakenteissa tulisi käyttää korjaustason 1 mukaista ilmarakojen korjaustekijää U_c -arvon laskennassa.

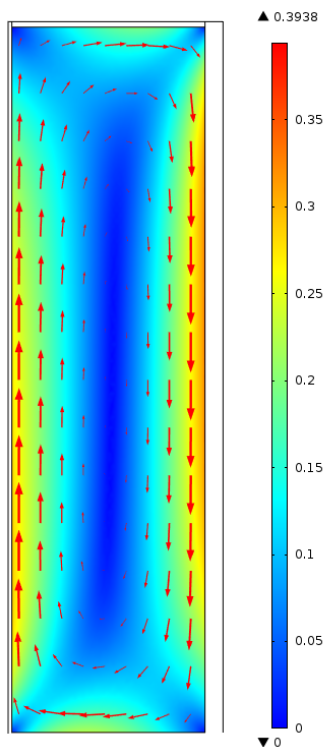
Kuvissa 7.3.16–7.3.18 on esitetty laskentaohjelmasta saatavia graafisia tulosteita koerakenteen US6 (mineraalivilla 320 mm, ideaalinen asennus, ei konvektiokatkoa) laskentatuloksista.



Kuva 7.3.16 Laskennallisesti määritetty lämpövirran tiheys koerakenteen US6 sisäpinnassa (320 mm paksu mineraalivillaeriste).



Kuva 7.3.17 Koerakenteen US6 2D-lämpötilakenttä isotermeillä kuvattuna [$^{\circ}\text{C}$] (320 mm paksu mineraalivillaeriste). Vasemmalla on laskentatuloks ilmaan konvektion vaikutusta ja oikealla konvektio on otettu huomioon mallinnuksessa.



Kuva 7.3.18 Sisäisen konvektion aiheuttama laskennallisesti ratkaistu virtauskenttä koerakenteessa (US6, 320 mm mineraalivilla). Virtaussuuntia on kuvattu nuolilla ja virtausnopeuksia taustan värillä [mm/s].

Laskennalliset tarkastelut vertailurakenteille

Laskennallisten tarkastelujen toisessa osassa tarkasteltiin sisäistä konvektiota 1,2 m ja 2,4 m korkean tyypillisen puurankaseinän sisällä eri eristepaksuuksilla ja eri ulkoilman lämpötiloilla. Sisäilman lämpötilana käytettiin kaikissa tapauksissa arvoa 20 °C. Tarkasteltavan puurankarakenteen rakennekerrokset sisältä ulospäin olivat:

- kipsilevy, 13 mm
- lämmöneriste, 200/300/400 mm
- tuulensuojalevy, 30 mm
- tuuletusväli
- julkisivulaudoitus

Tuuletusväliä ja julkisivulaudoitusta ei sisällytetty malleihin, mutta rakenteiden sekä sisä- että ulkopintojen pintavastuksina käytettiin arvoa 0,13 m²·K/W. Vertailurakenteiden laskennallisissa tarkasteluissa käytetyt materiaaliominaisuudet on esitetty taulukossa 7.3.9.

Taulukko 7.3.9 Vertailurakenteiden laskennallisissa tarkasteluissa käytetyt materiaaliominaisuudet.

Materiaali	Lämmönjohtavuus λ [W/(m·K)]	Ilmanläpäisevyys κ_a [m ³ /(m·Pa·s)]
Kipsilevy	0,21	-
Lämmöneriste	0,035	200×10 ⁻⁶
Tuulensuojalevy	0,030	-

Koska sisäisen konvektion prosentuaalinen vaikutus koko rakenteen U-arvoon (Nusseltin luku) riippuu runkotolppien kylmäsiirtovaikutuksen osuudesta koko rakenteen U-arvossa, tarkastelut tehtiin jokaisella eristepaksuudella kahdelle eri tapaukselle:

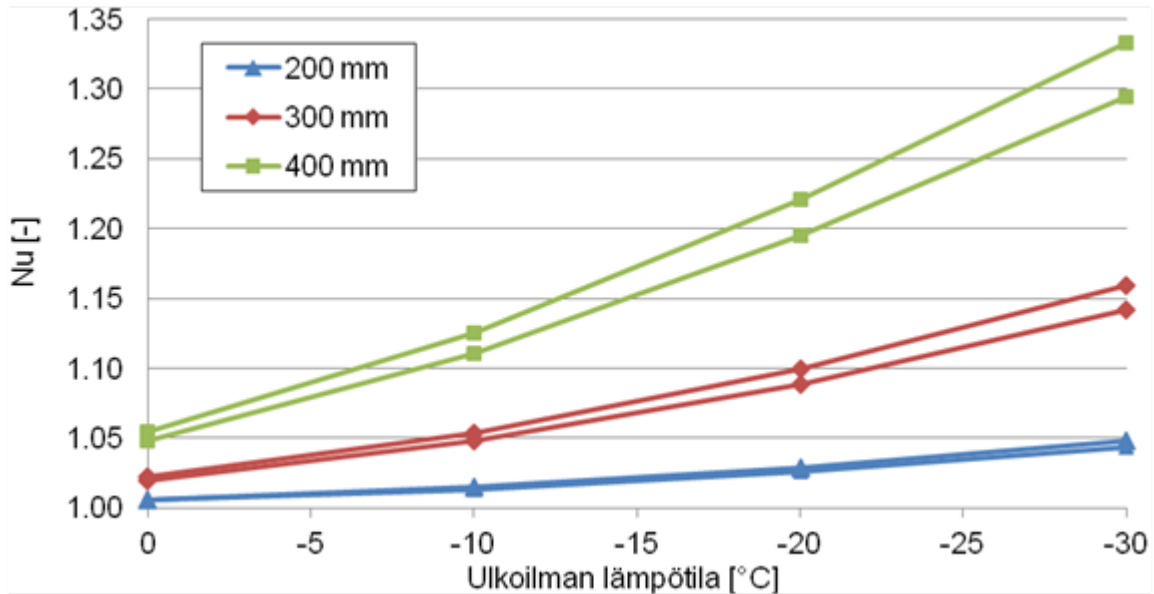
1. Rakenteessa ei ole ollenkaan runkotolppia. U-arvo (ilman sisäistä konvektiota) voitiin laskea helposti yksidimensionaalisesti.
2. Rakenteessa on 50 mm leveät eristekerroksen paksuiset puiset runkotolpat 600 mm jaolla. U-arvo (ilman sisäistä konvektiota) laskettiin laskentaohjelman 2D-mallilla.

Taulukossa 7.3.10 on esitetty vertailurakenteiden U-arvot ilman sisäisen konvektion vaikutusta eri eristepaksuuksilla. Runkotolpan lämmönjohtavuutena käytettiin arvoa 0,10 W/(m·K).

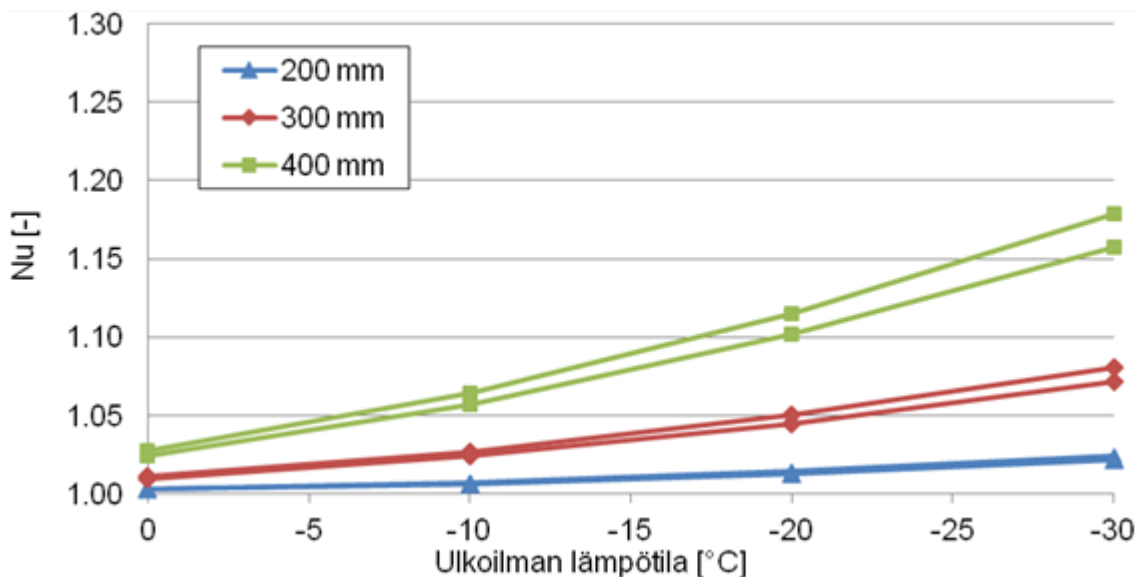
Taulukko 7.3.10 Vertailurakenteen U-arvot eri eristepaksuuksilla sekä ilman että runkotolppien kanssa.

Eristepaksuus [mm]	Ei runkotolppia U-arvo [W/(m ² ·K)]	Runkotolpat U-arvo [W/(m ² ·K)]
200	0,142	0,157
300	0,101	0,113
400	0,078	0,089

Kuvissa 7.3.19 ja 7.3.20 on esitetty numeerisesti määritetyt Nusseltin luvut 1,2 m ja 2,4 m korkeille vertailurakenteille eri eristepaksuuksilla ja eri ulkoilman lämpötiloissa. Molemmissa kuvissa on jokaiselle eristepaksuudelle kaksi käyrää, joista ylempi kuvaa rakennetta, jossa ei ole runkotolppia (tapaus 1) ja alempi käyrä rakennetta, jossa on mukana puiset runkotolpat, k600 (tapaus 2). Todellinen sisäisen konvektion vaikutus eri tyyppisillä puurunkorakenteilla toteutetuissa ulkoseinissä on jossain näiden kahden käyrän välissä.



Kuva 7.3.19 Laskennallisesti määritetyt Nusseltin luvut 1,2 m korkealle vertailurakenteelle kolmella eristepaksuudella eri ulkoilman lämpötiloissa. Saman eristepaksuuden käyristä ylempi kuvaa tapausta, jossa ei ole mukana runkorakenteita ja alempi tapausta, jossa on mukana puiset runkotolpat, k600.



Kuva 7.3.20 Laskennallisesti määritetyt Nusseltin luvut 2,4 m korkealle vertailurakenteelle kolmella eristepaksuudella eri ulkoilman lämpötiloissa. Saman eristepaksuuden käyristä ylempi kuvaa tapausta, jossa ei ole mukana runkorakenteita ja alempi tapausta, jossa on mukana puiset runkotolpat, k600.

Kuvissa 7.3.19 ja 7.3.20 esitettyjen laskentatulosten perusteella voidaan sanoa, että sisäisen konvektion vaikutus ulkoseinärakenteen U-arvoon riippuu oleellisesti myös rakenteen korkeudesta. Laskennallisten tulosten perusteella 200 mm eristepaksuudella konvektion vaikutus on matalassa rakenteessa kovallakin pakkasella vielä vähäistä. 300 mm ja 400 mm eristepaksuuksilla ja vastaavalla ilmanläpäisevyydellä ($200 \times 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{Pa} \cdot \text{s})$) toteutetuissa ulkoseinissä sisäinen konvektio voi kovilla pakkasilla kasvattaa U-arvoa yli 10 %. Näissä tapauksissa rakenteelle laskettu R_{a_m} ylittää kuitenkin RakMK C4 (2012):ssä ilmoitetun raja-arvon, joten määräysten mukaisissa rakenteissa ei ole tarpeellista ottaa sisäistä konvektiota huomioon esimerkiksi laskettaessa rakennuksen vuosittaista energiankulutusta.

7.3.3 Johtopäätökset

Tehtyjen laboratoriokokeiden ja numeeristen tarkasteluiden perusteella voidaan todeta, että sisäisen konvektion vaikutus ulkoseinien lämmönläpäisykertoimiin ei ole merkittävä kuin vasta kovilla pakkasilla ja tällöinkin lähinnä matalissa rakenteissa, joiden lämmöneristekerroksen paksuus on yli 300 mm. Määräysten mukaisissa ulkoseinärakenteissa ($R_{a_m, \Delta T=50K} \leq 2,5$) sisäisen konvektion vaikutus on kuitenkin rakennuksen vuosittaisen energiankulutuksen kannalta merkityksetön.

Mikäli lämmöneristekerroksissa on ilmarakoja, jotka mahdollistavat ilman kierron lämpimältä puolelta kylmälle puolelle, niiden vaikutus lämmönläpäisykertoimeen voidaan ottaa riittävän tarkasti huomioon energiateknisissä laskelmissa RakMK C4 (2012):n mukaisilla lisätermeillä. Tutkimustulokset puoltavat sitä, että avohuokoisilla lämmöneristeillä eristetyissä rankarakenteissa tulisi käyttää korjaustason 1 mukaista ilmarakojen korjaustekijää U_c -arvon laskennassa.

Tyypillisillä asennuksen yhteydessä syntyvillä pystysuuntaisilla ilmaraoilla (ks. kuva 7.3.6), jotka eivät mahdollista ilman kiertoa lämpimältä puolelta kylmälle puolelle, ei koetulosten perusteella näytä olevan suurta vaikutusta lämmönläpäisykertoimiin, kun ilmaraoit eivät ole kohtuuttoman suuria. Rakennerratkaisuja suunniteltaessa on kuitenkin otettava huomioon, että vaakasuuntaisten ilmarakojen heikentävää vaikutusta ei voida ehkäistä eristekerroksen keskelle asennettavalla pystysuuntaisella konvektiokatkolla. Vaikka vaakasuuntaisten eristekerroksen läpäisevien ilmarakojen vaikutus lämmönläpäisykertoimeen ei välttämättä ole kaikissa tapauksissa kovin merkittävä, niiden vaikutusta rakenteen kondensoitumis- tai homehtumisriskeihin tulisi tutkia tarkemmin.

Laskentaohjelmalla tehdyt numeeriset U-arvojen määrittäykset vastasivat hyvin koetuloksia mineraalivillalla eristetyillä koerakenteilla (US1 ja US2). 320 mm lämmöneristepaksuuksilla tehdyissä vertailuissa (US6 ja US7) laskentaohjelmalla määritetyistä U-arvoista laskettu konvektion osuus oli prosentuaalisesti samaa suuruusluokkaa kuin koetuloksistakin, jolloin kokeellisesti ja numeerisesti määritettyjen U-arvojen erot voidaan olettaa aiheutuneen suurimmalta osin tutkimuslaitteiston reunahäiriöstä. Tutkimuksessa käytettyä laskentaohjelmaa voidaan pitää hyvin soveltuvana sisäisen konvektion mallintamiseen

pystyrakenteissa, mutta epämääräisten geometrioiden (satunnaisia ilmarakoja sisältävät rakenteet, vaurioituneet rakenteet yms.) mallintaminen on hyvin haastavaa. Lisäksi laskentaa voisi tarkentaa vielä ottamalla huomioon mineraalivillan anisotrooppisuuden ilmanläpäisevyyden ja lämmönjohtavuuden osalta.

Puukuitueristeisten koerakenteiden osuutta tutkimuksessa voidaan pitää siltä osin epäonnistuneena, että tutkimustuloksista ei voitu tehdä selviä johtopäätöksiä sisäisen konvektion suuruudesta puukuitueristeisessä ulkoseinässä. Kuitenkin laskentaohjelman avulla laskettujen Nusseltin lukujen perusteella puukuitueristeelläkään sisäisen konvektion ei pitäisi tutkimuksen U-arvokokeiden lämpötilaolosuhteissa olla vielä merkittävää 320 mm eristepaksuudella. On todennäköistä, että puukuitueristeisten koerakenteiden kokeellisesti ja laskennallisesti määritettyjen U-arvojen suuret erot aiheutuivat eristeen painumasta ja koelementtien rakenteellisista vaurioista. Lämpö- ja kosteusteknisen toimivuuden takaamiseksi puhalletuille puukuitueristeille tulisi tehdä lisätutkimusta liittyen eristemateriaalin mekaaniseen käyttäytymiseen. Mahdollisiin lisätutkimuksiin tulisi sisällyttää myös kenttäkokeita todellisista rakenteista sekä ilmanläpäisevyyksien ja lämmönjohtavuuksien määrittämiä, joissa otetaan puhalluksessa käytettävän sideaineen vaikutus huomioon. Laskennallisten tarkastelujen luotettavuus riippuu eristemateriaalista riippumatta aina myös siitä, kuinka tarkasti materiaaliominaisuudet tunnetaan.

Tutkimuksen kokeellisista ja laskennallisista tuloksista tehdyt johtopäätökset ovat hyvin yhdenmukaisia norjalaisten tutkimusten (Uvsløkk et al. 2010 ja Clementz et al. 2011) kanssa. Niissä todetaan mm. sisäisen konvektion heikentävän ulkoseinärakenteen lämmöneristävyyttä tietyissä tapauksissa, mutta oleellisempi vaikutus on kuitenkin rakenteen huolellisella toteutuksella.

7.4 Yläpohjarakenteiden tarkastelut

7.4.1 Yleistä

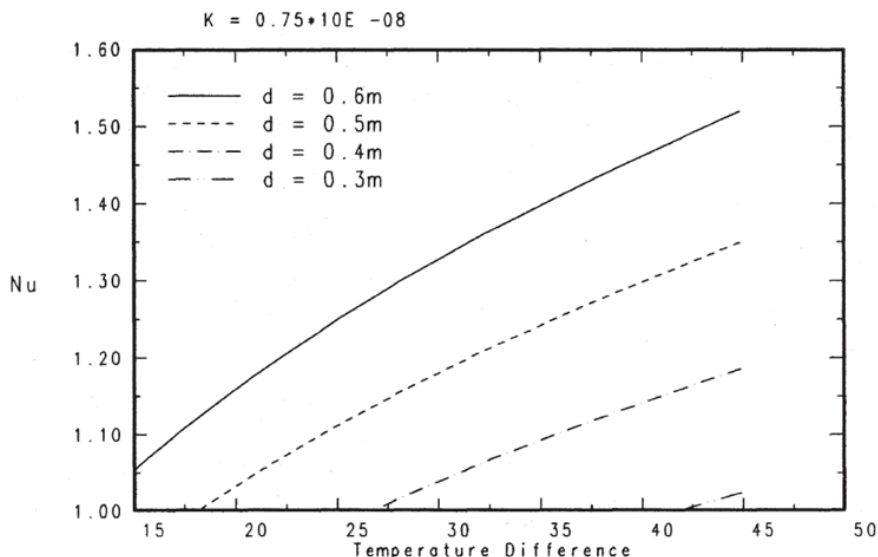
Yläpohjissa suosittuja lämmöneristeitä ovat erilaiset puhallettavat eristeet, joiden asentaminen on nopeaa ja kustannustehokasta. Viime vuosina rakennusten energiansäästö tavoitteet ovat johtaneet jopa yli 500 mm paksujen eristekerrosten käyttämiseen rakennusten yläpohjissa. Yläpohjaeristeiden tyypillinen heikkous on kuitenkin niiden suuri ilmanläpäisevyys, joka voi aiheuttaa rakenteissa sisäistä konvektiota ja heikentää niiden lämmöneristyskykyä. Tässä tutkimusosiossa haluttiin tietoa siitä, kuinka sisäinen konvektio voi vaikuttaa yläpohjan lämmöneristekerroksen lämpötekniiseen toimintaan, kun puhalluseristekerroksen paksuutta kasvatetaan jopa 600 mm:iin.

Yläpohjien sisäisestä konvektiosta tehdyistä aiemmista laskennallisista ja kokeellisista tutkimuksista on saatu varsin ristiriitaisia tuloksia. Eroja on ollut sekä laskennallisissa että kokeellisissa tutkimustuloksissa, vaikka tarkastelut on tehty pelkällä eristekerroksella. Tämän

lisäksi on epäselvää, kuinka eristekerroksessa olevat ilmaa läpäisemättömät epäjatkuvuuskohdat ja kylmäsilat (esimerkiksi kattoristikoiden alapaartteet ja sauvat sekä erilaiset putket) vaikuttavat sisäiseen konvektioon eri tilanteissa.

Hagentoft (2001) on määrittänyt homogeeniselle pinta-alaltaan äärettömän suurelle ilmaa läpäisevälle vaakasuuntaiselle eristekerrokselle teoreettiset kriittiset modifioidut Rayleigh'n luvut (Ra_m) (ks. kaava 7.1.1), joiden ylittyessä sisäinen konvektio voi käynnistyä. Kriittiseksi modifioiduksi Rayleigh'n luvuksi on saatu arvo 27, kun eristeen yläpinta on avoin ja arvo 40, kun yläpinta on suojattu ilmavirtauksilta (Hagentoft 2001). Toisaalta kriittisen modifioidun Rayleigh'n luvun määritelmä on jossain määrin epäselvä, sillä on myös osoitettu, että konvektiota tapahtuu ennen kriittisen modifioidun Rayleigh'n luvun ylittymistä (Langlais et al. 1990), mutta hyvin vähän. On myös esitetty, että konvektio on varsinaisesti käynnistynyt, kun Nusseltin luku (Nu) ylittää arvon 1,02–1,04 (Wahlgren 2005).

Shankar ja Hagentoft (2001) ovat puolestaan tarkastelleet yläpohjan sisäistä konvektiota laskennallisesti mineraalivillalevyssä, puhalletussa mineraalivillassa ja polystyreenipalloeristeessä. Lämmöneristekerrokset oletettiin homogeenisiksi eikä niissä ollut kattorakenteiden muodostamia kylmäsiltoja tai muita epäjatkuvuuskohtia. Tutkimuksessa ei tarkasteltu eristekerroksen ulkopuolisen ilman virtausnopeuden vaikutusta tuloksiin. Laskentatarkasteluissa käytettiin mineraalivillalevyn ilmanläpäisevyytenä arvoa $4,36 \times 10^{-4} \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ (permeabiliteetti $0,75 \times 10^{-8} \text{ m}^2$) ja puhalletun mineraalivillan ilmanläpäisevyytenä arvoa $5,81 \times 10^{-4} \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ (permeabiliteetti $1,0 \times 10^{-8} \text{ m}^2$). Kuvassa 7.4.1 on esitetty esimerkkinä laskennallisiin tarkasteluihin perustuvat Nusseltin luvut eri paksuisissa yläpohjaeristeissä lämpötilaeron funktiona, kun eristeen ilmanläpäisevyys on $4,36 \times 10^{-4} \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ (Shankar & Hagentoft 2001).



Kuva 7.4.1 Lämpötilaeron vaikutus Nusseltin lukuun mineraalivillaeristeen ilmanläpäisevyyden ollessa $4,36 \times 10^{-4} \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ (permeabiliteetti $0,75 \times 10^{-8} \text{ m}^2$). (Shankar & Hagentoft 2001)

Kuvasta 7.4.1 nähdään, että lämpötilaeron ollessa esimerkiksi 35 °C, on Nusseltin luku 600 mm paksulla eristeellä n. 1,4. Laskettaessa tämän rakenteen modifioitu Rayleighin luku lämpötilaeron ollessa 35 °C saadaan tulokseksi 11,8, joka on selvästi pienempi kuin Hagentoftin (2001) edellä esittämät raja-arvot. Tästä huolimatta rakenteessa esiintyy laskennallisten tarkastelujen mukaan merkittävää sisäistä konvektiota. Kuvan 7.4.1 perusteella 600 mm paksun lämmöneristekerroksen modifioidun Rayleighin luvun tulisi olla alle 5, jotta siinä ei esiintyisi sisäistä konvektiota.

Ranskalaisessa tutkimuksessa (Ciucasu et al. 2005) tehtiin laskennallisia tarkasteluja sisäisestä konvektiosta, jossa eristeessä tapahtuvan lämmönsiirron lisäksi mallinnettiin paarteiden ja muiden puuosien vaikutus sekä ullakon ilmavirtaukset. Laskennassa käytetty ullakko oli rakenteiltaan tyypillinen ruotsalaisen pientalon ullakko, jonka eristekerroksen paksuus oli 500 mm. Kaupallisella CFD-laskentaohjelmalla (ANSYS Fluent) tutkittiin sisäistä konvektiota kolmella eri eristetuotteella, joiden permeabiliteetit olivat väliltä $3,9\text{--}9,0 \times 10^{-9} \text{ m}^2$. Laskentatulosten mukaan kyseisillä eristeillä konvektio käynnistyi vasta kun ulkoilman lämpötila laski välille $-40\text{--}70 \text{ °C}$. Kriittiseksi modifioiduksi Rayleigh'n luvuksi tutkijat esittivät arvoa 28.

Wahlgren (2001) on tutkinut sekä laskennallisesti että kokeellisesti sisäistä konvektiota yläpohjien lämmöneristekerroksessa. Wahlgrenin tekemän aiempia tutkimustuloksia kartoittavan kirjallisuusselvityksen mukaan välillä 1983–1991 tehtyjen yhdysvaltalaisen ja ruotsalaisten pienen mittakaavan kokeellisten tutkimusten mukaan sisäinen konvektio alkaa oleellisesti vaikuttaa yläpohjan lämmönläpäisykerroimeen vasta modifioidun Rayleigh'n luvun arvolla 15–30. Suuren mittakaavan aiemmista kokeellisista tutkimuksista Wahlgren kuitenkin mainitsee muun muassa yhdysvaltalaisen tutkimuksen (Wilkes et al. 1991), jonka mukaan 40 K lämpötilaerolla puhalletulla lasivillalla eristetyn todellisen yläpohjan lämmönläpäisykerroin voi jopa kaksinkertaistua sisäisen konvektion vaikutuksesta. Kirjallisuusselvityksestä ilmenee myös, että toisen yhdysvaltalaisen tutkimuksen mukaan eristekerroksen seassa olevat kattoristikoiden alapaarteet voivat laskea kriittisen modifioidun Rayleigh'n luvun arvoa, mutta toisaalta paarteet voivat hyvin suurilla modifioiduilla Rayleigh'n luvuilla hidastaa ilmavirtauksia (Delmas & Arquis 1995).

Wahlgrenin omassa laboratoriokoejärjestelyssä koerakenne koostui n. 3 m leveästä ullakkoa mallintavasta vaakasuuntaisesta eristekerroksesta, jonka yläpuolista lämpötilaa ja tuuletusta voitiin säätää. Noin 20 m^2 kokoisen koe-eristekerroksen keskeltä mitattiin koerakenteen alapintaan asennetun lämmitetyn laatikon avulla kokonaislämpövirta 1 m^2 kokoiselta alueelta eri eristepaksuuksilla ja lämpötilaeroilla. Lasivillaeristetylle tuulettamattomalle yläpohjalle Wahlgren esitti kriittiseksi modifioiduksi Rayleigh'n luvuksi arvoa 22, joka vastaa hyvin aiempia yhdysvaltalaisen ja ruotsalaisten tutkijoiden saamia pienen mittakaavan mittaustuloksia. (Wahlgren 2001)

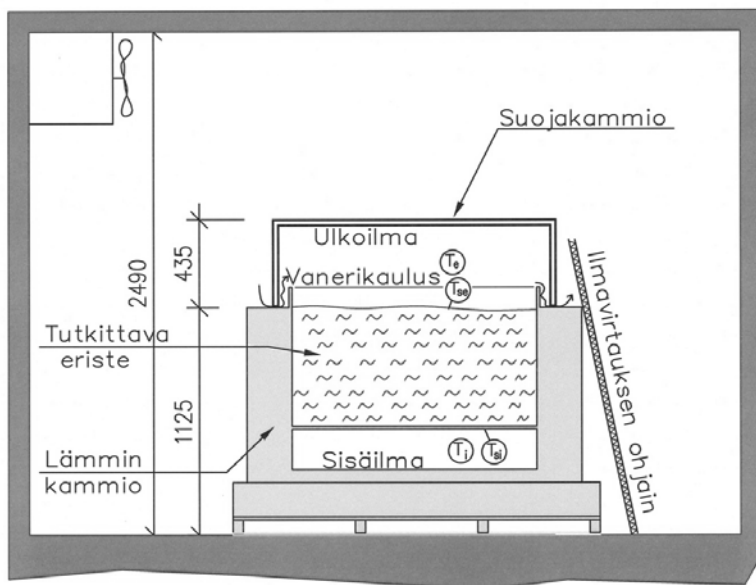
Wahlgrenin esittämiä tutkimustuloksia arvioitaessa on kuitenkin otettava huomioon, että lämpövirran mittaamisen käytetty laatikko mittasi lämpövirran ainoastaan yläpohjan

keskialueelta. Sisäisen konvektion aiheuttaman ilman kierron voidaan olettaa tapahtuvan siten, että lämmin ilma nousee keskialueella ylös ullakon tuuletustilaan ja eristekerroksen reuna-alueet imevät kylmää ilmaa eristeen sisään. Wahlgrenin esittämät numeerisesti määritetyt eristekerroksen yläpinnan pintalämpötilat tukevat tätä käsitystä ilmanvirtausten suunnasta eristeessä. Tällöin lämpövirran tiheydet ovat reunoilla keskialuetta suurempia, eikä sisäisen konvektion kokonaisvaikutusta voida määrittää luotettavasti mittaamalla lämpövirtoja pelkästään yläpohjan keskialueelta.

7.4.2 Koelaitteisto

Yläpohjarakenteissa tapahtuvaa sisäistä konvektiota tutkittiin kokeellisesti TTY:n rakennushallissa sijaitsevalla tutkimuslaitteistolla, jonka toimintaperiaate on sama kuin ulkoseinäeristekokeissakin käytetyssä laitteistossa (ks. luku 7.3), mutta yläpohjarakenteiden laitteistossa tutkimusaukko on lämpimän kammion päällä siten, että laitteistolla voidaan tutkia vaakarakenteita. Koelaitteistolla pyrittiin selvittämään sisäisen konvektion vaikutusta yläpohjarakenteiden lämpötilakenttiin ja lämmönläpäisykertoimeen eli U-arvoon.

Yläpohjarakenteiden konvektiokokeissa käytetyn koelaitteiston periaate on esitetty kuvassa 7.4.2 ja esimerkki koejärjestelystä kuvassa 7.4.3. Lämmin kammio sijaitsi tutkittavan rakenteen alapuolella. Koerakenne sijaitsi pinta-alaltaan $1200 \times 1200 \text{ mm}^2$ suuruisessa tutkimusaukossa, jonka korkeus oli 600 mm. Koerakenteen yläpuolella oli läpinäkyvästä polykarbonaattilevystä valmistettu suojakammio, jonka tarkoituksena oli estää jäädytyslaitteiston tuulettimien aiheuttamat voimakkaat ilmavirtaukset rakenteen yläpinnalla. Tuuletetun yläpohjan ilmavirtauksia kuvaava tilanne toteutettiin kammion sivulle kiinnitettyllä tuulettimella, jonka teho pidettiin samana kaikissa kokeissa.

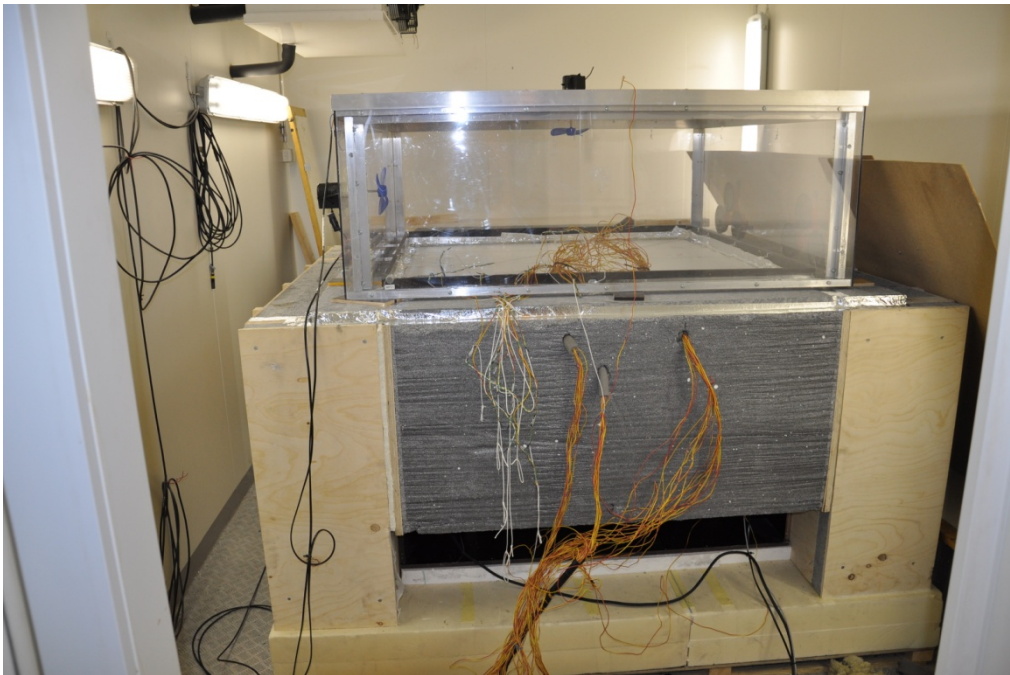


Kuva 7.4.2

Periaatekuva yläpohjarakenteiden sisäisen konvektion tutkimuksessa käytetystä koejärjestelystä osan 2 kokeissa. Osan 1 koejärjestely erosi osasta 2 siten, että osan 1 aikana lämmin kammio sijaitsi pakkashuoneen lattialla ja kammion pohjassa oli vähemmän lämmöneristystä.

Pakkahuoneen ilma pääsi vaihtumaan suojakammion ja lämpimän kammion reunan välistä (raon leveys oli n. 9 mm), jolloin suojakammion sisällä lämpötila oli lähes sama kuin pakkahuoneessa. Lämpimän kammion ympärillä vallitsi siten kauttaaltaan ulkoilman lämpötila vastaavalla tavalla kuin ulkoseinien konvektiokokeissa (ks. luku 7.3).

Lämpimän kammion häviöteho määritettiin 300 mm ja 600 mm paksuilla EPS-eristeillä. Häviötehon kalibrointikokeissa käytettiin EPS-80 ja EPS-100 luokan polystyreenia, joiden lämmönjohtavuus mitattiin TTY:n lämpövirtalevyllä. Häviöteho määritettiin samalla tavalla kuin ulkoseinien kalibrointikokeissa (ks. luku 7.2).



Kuva 7.4.3 *Esimerkki yläpohjarakenteiden koejärjestelystä.*

Koelaitteistossa käytettiin sisä- ja ulkolämpötilan sekä rakenteen pintalämpötilojen mittaamiseen puolijohdeantureita, joita oli jokaisella mittaustasolla vähintään 3 kpl. Puolijohdeantureista mitattuja lämpötiloja käytettiin myös lämpimään kammioon syötettävän lämmitystehon säätämiseksi siten, että lämpötila pysyi kammiossa mahdollisimman tasaisena. Rakenteen sisällä olevien lämpötilakenttien mittaamiseen käytettiin K-tyyppin termolankoja. Lämpötilaa mitattiin eristerokossessa 100 mm välein viidestä tasopisteestä. Ensimmäisessä koesarjassa lämmitystehoa säädettiin lämmityskaapelilla, jota kytkettiin päälle ja pois tiheällä syklillä. Toisessa koesarjassa sisäilman lämpötilaa säädettiin lämmitysvastuksilla, joiden jännitettä muutettiin 0,01 V tarkkuudella säädettävän jännitelähteen avulla (Agilent E364xA). Sisälämpötilan säätöön käytettiin samaa CLIMATE-ohjelmaa, jolla ohjataan rakennusfysikaalisen tutkimuslaitteiston olosuhteiden säätöä (ks. luku 7.3). Mittaukset tapahtuivat minuutin välein kummassakin koesarjassa ja lämmitystehon säätö kolmen minuutin välein. Stationääritilanteessa kaikista mitattavista suureista määritettiin vähintään 6 h keskiarvot, joiden perusteella laskettiin koerakenteen läpi siirtyvä lämpövirta ja U-arvo.

Suojakammion sisällä mitattiin lisäksi ilman virtausnopeuksia TSI-8388 monitoimimittarilla, käyttäen mittausturina kuumalanka-anemometriä. Koetilanteen alussa toteutettu mittauskerta sisälsi virtausnopeuksien mittauksen seitsemästä kohdasta eristeen ulkopinnalta. Yksittäisen mittauskohdan tulos oli 7 mittauksen keskiarvo, joten yksi mittauskerta sisälsi yhteensä 49 yksittäistä mittausta. Saaduista tuloksista laskettiin keskimääräinen ilman virtausnopeus kyseisellä mittauskerralla.

Yksityiskohtaisempi kuvaus koejärjestelyistä ja mittausturien asennuksista on esitetty lähteessä Pakkanen (2012).

7.4.3 Materiaaliominaisuuksien määrittäminen

Tutkittavissa koerakenteissa käytettiin kolmea eri lämmöneristysmateriaalia: levymäistä lasivillaa, puhallettavaa lasivillaa ja puhallettavaa puukuitueristettä. Kaikille tutkituille eristemateriaaleille tehtiin ilmanläpäisevyyden määrittäminen standardin ISO 9053 (1991) mukaisella tutkimusmenetelmällä. Ilmanläpäisevyydet määritettiin kolmen koekappaleen tuloksen keskiarvona. Lämmöneristeiden keskimääräiset ilmanläpäisevyydet ja tiheydet on esitetty taulukossa 7.4.1.

Puhalluseristeiden ilmanläpäisevyydet määritettiin tyypillisissä asennustiheyksissä siten, että irtoeriste levitettiin koekappaleisiin käsin. Käsin tehdystä levityksestä johtuen puukuitueristettä tarvittiin 600 mm paksuisen eristetilän täyttämiseen enemmän kuin normaalissa puhallettuna tehdyssä asennuksessa. Tästä syystä puukuitueristeen ilmanläpäisevyys määritettiin myös suuremmalla tiheydellä, joka vastasi 600 mm paksuisissa koerakenteissa käytettyä eristeen tiheyttä. Näissä koerakenteissa käytetyn käsin levitetyn puukuitueristeen ilmanläpäisevyys vastasi kuitenkin tyypillistä pienemmällä tiheydellä puhalletun eristeen ilmanläpäisevyyttä. Näin ollen paksummat koerakenteet vastasivat ilmanläpäisevyyden osalta tavanomaisia puhalletulla puukuitueristeellä toteutettuja yläpohjarakenteita.

Taulukko 7.4.1 Kokeissa käytettyjen lämmöneristysmateriaalien keskimääräiset ilmanläpäisevyydet ja tiheydet.

Materiaali	Tiheys ρ [kg/m ³]	Ilmanläpäisevyys κ_a [m ³ /(m·s·Pa)]
Puhalluslasivilla, käsin levitetty	25,0	$3,50 \times 10^{-4}$
Puukuitueriste, käsin levitetty (300 mm paksut eristekerrokset)	34,5	$4,18 \times 10^{-4}$
Puukuitueriste, käsin levitetty (600 mm paksut eristekerrokset)	40,7	$2,36 \times 10^{-4}$
Lasivillalevy 100 mm	23,6	$0,516 \times 10^{-4}$

Tutkituille eristemateriaaleille ja rakenteen alapintana käytetylle vanerilevyille tehtiin lämmönjohtavuuskokeet standardin ISO 8301 (1991) mukaisella menetelmällä. Kokeiden tarkempaa toteutusta on käsitelty lyhyesti luvussa 7.2. Puhalluseristeiden lämmönjohtavuudet

määritettiin kokeissa käytetyillä asennustiheyksillä siten, että irtoeriste levitettiin koekappaleisiin käsin. Koekappaleita säilytettiin ennen mittauksia TTY:n rakennushallissa, jonka lämpötila oli n. 20 °C ja suhteellinen kosteus n. 50 % RH. Mittaukset tehtiin 10 °C ja 2,5 °C keskilämpötilassa kolmelle eri koekappaleelle jokaisesta materiaalista. Materiaalien keskimääräiset lämmönjohtavuudet 10 °C lämpötilassa sekä koekappaleiden keskimääräiset tiheydet on esitetty taulukossa 7.4.2.

Taulukko 7.4.2 Koerakenteissa käytettyjen materiaalien keskimääräiset lämmönjohtavuudet ja tiheydet.

Materiaali	Tiheys ρ [kg/m ³]	Lämmönjohtavuus λ_{10} [W/(m·K)]
Puhalluslasivilla, käsin levitetty	25,0	0,039
Puukuitueriste, käsin levitetty (300 mm paksut eristekerrokset)	34,5	0,044
Puukuitueriste, käsin levitetty (600 mm paksut eristekerrokset)	40,7	0,042
Lasivillalevy	23,6	0,034
Vaneri 15 mm, mittaussuunta poikittain levyä vasten	680	0,12

7.4.4 Laboratoriokokeet

Laboratoriokokeet koostuivat kahdesta tutkimusosioista, joista ensimmäisessä tutkittiin sisäisen konvektion vaikutusta lämmöneristekerroksen lämpötilakenttiin eri tasoilla ja toisessa sisäisen konvektion vaikutusta rakenteen U-arvoon. Kaikki koetulokset on esitetty lähteessä Pakkanen (2012).

Tutkimuksen ensimmäisessä osassa tarkasteltiin lämpötilojen muutosta eristekerroksen sisällä eri syvyyksissä seuraavissa kolmessa vaiheessa:

1. Ei merkittäviä ilmavirtauksia eristekerroksen yläpinnalla (koevaiheella kuvattiin rakenteen käyttäytymistä tuulettomassa säässä).
2. Vaakasuuntaisen ilmavirtaus eristekerroksen yläpinnalla (koevaiheella kuvattiin tuulen vaikutusta lämmöneristeen ulkopinnalla, vaikutus saatiin aikaan suojakammion sivussa olevalla tuulettimella).
3. Ei merkittäviä ilmavirtauksia eristekerroksen yläpinnalla, sisäpinnan lähellä pistemäinen lämmönlähde (koevaiheella kuvattiin valaisimen vaikutusta rakenteen lämpötilakenttään).

Edellä kuvattujen vaiheiden lisäksi koerakenteiden toimintaa tarkasteltiin myös tilanteessa, jossa eristekerrokseen kohdistettiin ylhäältä päin pystysuuntainen ilmavirtaus suojakammion katossa olevalla puhaltimella. Tämän koevaiheen oli tarkoitus kuvata rakenteen toimintaa voimakkaan myrskytuulen vaikuttaessa. Koska tämän koevaiheen olosuhteet olivat

rakenteiden normaaliin käyttötilanteeseen verrattuna hyvin poikkeukselliset ja ilman virtausnopeus oli suuri, ei näitä tuloksia ole tarpeellista esittää tässä tutkimusraportissa.

Tutkimuksen toisessa osassa laitteiston lämmitystehon säätöä ja mittausta tarkennettiin siten, että laitteistolla voitiin kokeen aikana mitata riittävän tarkasti myös lämpövirran kokonaismäärä koerakenteen läpi. Tällöin voitiin tarkastella myös sisäisen konvektion vaikutusta tutkittavan rakenteen U-arvoon. Rakenteen läpi siirtyvä lämpövirta määritettiin luvussa 7.2 esitetyllä tavalla. Tutkimuksen toisessa osassa koevaiheet olivat muuten samat kuin ensimmäisessä osassa, mutta pistemäisen lämmönlähteen vaikutusta ei tutkittu jälkimmäisessä osassa.

Eristepaksuuksina käytettiin kokeissa 300 mm ja 600 mm. Lämmöneristeet asennettiin käsin koelaitteiston tutkimusaukkoon. Eristekerros asennettiin 15 mm paksun vanerilevyn päälle. Puhallettavat irtoeristeet toimitettiin TTY:n tiloihin tutkimusta varten tiiviisti paketoituna. Ennen asennusta irtoeristeiden paakut hajotettiin käsisekoittimella. Irtoeristeistä eroteltiin vaa'an avulla ennen asennusta oikeaa tiheyttä vastaava määrä eristettä, joka asennettiin käsin tai kauhalla sirottelemalla mahdollisimman tasaiseksi kerrokseksi rakenteen eristetilaan. Tätä ennen eristeen tiheys mitattiin $300 \times 300 \times 300 \text{ mm}^3$ kokoisessa vanerikaukalossa. Lämmöneristeet säilytettiin ennen mittauksia TTY:n rakennushallissa, jonka lämpötila oli n. $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ja suhteellinen kosteus n. 50 % RH.

Osassa koerakenteita käytettiin eristekerroksen päällä tuulensuojamateriaalina Tyvek-kalvoa. Tuulensuojamateriaalin ilmanläpäisykerroin saa olla RakMK C4 (2012):n mukaan korkeintaan $10 \times 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$. Kokeissa käytetylle tuulensuojakalvolle valmistaja oli antanut ilmanläpäisykerroimen arvoksi $K_a \leq 1,39 \times 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$, joten se täytti vaatimukset.

Tutkimuksen 1. ja 2. osan kokeissa käytettiin samoja sisä- ja ulkoilman lämpötilaolosuhteita. Kokeissa ei mitattu sisä- tai ulkoilman suhteellista kosteutta. Sisäkammion lämpötila oli kaikissa kokeissa $20,0 \text{ }^\circ\text{C}$. Kokeen toisessa osassa pakkahuoneen lämpötila oli säädetty ohjainlaitteesta vakioksi $-15,5 \text{ }^\circ\text{C}$, jolloin suojakammion sisällä saavutettiin lämpötila $-15,0 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,4 \text{ }^\circ\text{C}$ puolijohdeantureilla mitattuna. Taulukossa 7.4.3 on esitetty puolijohdeantureilla mitatut lämpötilakeskiarvot tutkimuksen 2. osan kokeissa. Sisäilman ja sisäpinnan lämpötilat olivat lähes vakioita yhtä koetta lukuun ottamatta. Tutkimuksen 1. osassa ei päästy näin tarkkaan sisälämpötilaan. Ulkopinnan lämpötila vaihteli ilmavirtauksesta, käytetystä lämmöneristeestä ja tuulensuojakalvosta riippuen.

Taulukossa 7.4.3 ja tuloksissa koemateriaalit ovat merkitty seuraavasti:

PUH	puhalluslasivillaeriste
PUU	puhalluspuukuitueriste
LEVYPUH	lasivillalevy sisäpinnassa (rakenteen pohjalla), ulkopinnassa puhalluslasivilla
LEVY	lasivillalevy

T hyvin vesihöyryä läpäisevä muovikuitukangas (Tyvek) lämmöneristeen ulkopinnassa

Numeroarvo edellä mainittujen merkintöjen perässä tarkoittaa lämmöneristekerroksen kokonaispaksuutta (300 mm tai 600 mm).

Koevaiheiden alussa suoritettujen ilman virtausnopeusmittausten keskiarvot olivat seuraavat:

1. ja 3. Tuulettamaton tilanne: ilmavirtaus 0,06 m/s koerakenteen yläpinnan suuntaisesti (4:n mittauskerran keskiarvo)
2. Sivutuuletin käytössä: ilmavirtaus 0,59 m/s koerakenteen yläpinnan suuntaisesti (9:n mittauskerran keskiarvo)

Taulukko 7.4.3 Lämpöteknisten arvojen laskennassa käytetyt puolijohdeantureilla mitatut 10 h lämpötilakeskiarvot sisäilmassa (T_i), ulkoilmassa (T_e) sekä lämmöneristeen sisäpinnassa (T_{si}) ja ulkopinnassa (T_{se}) tutkimuksen 2. osassa.

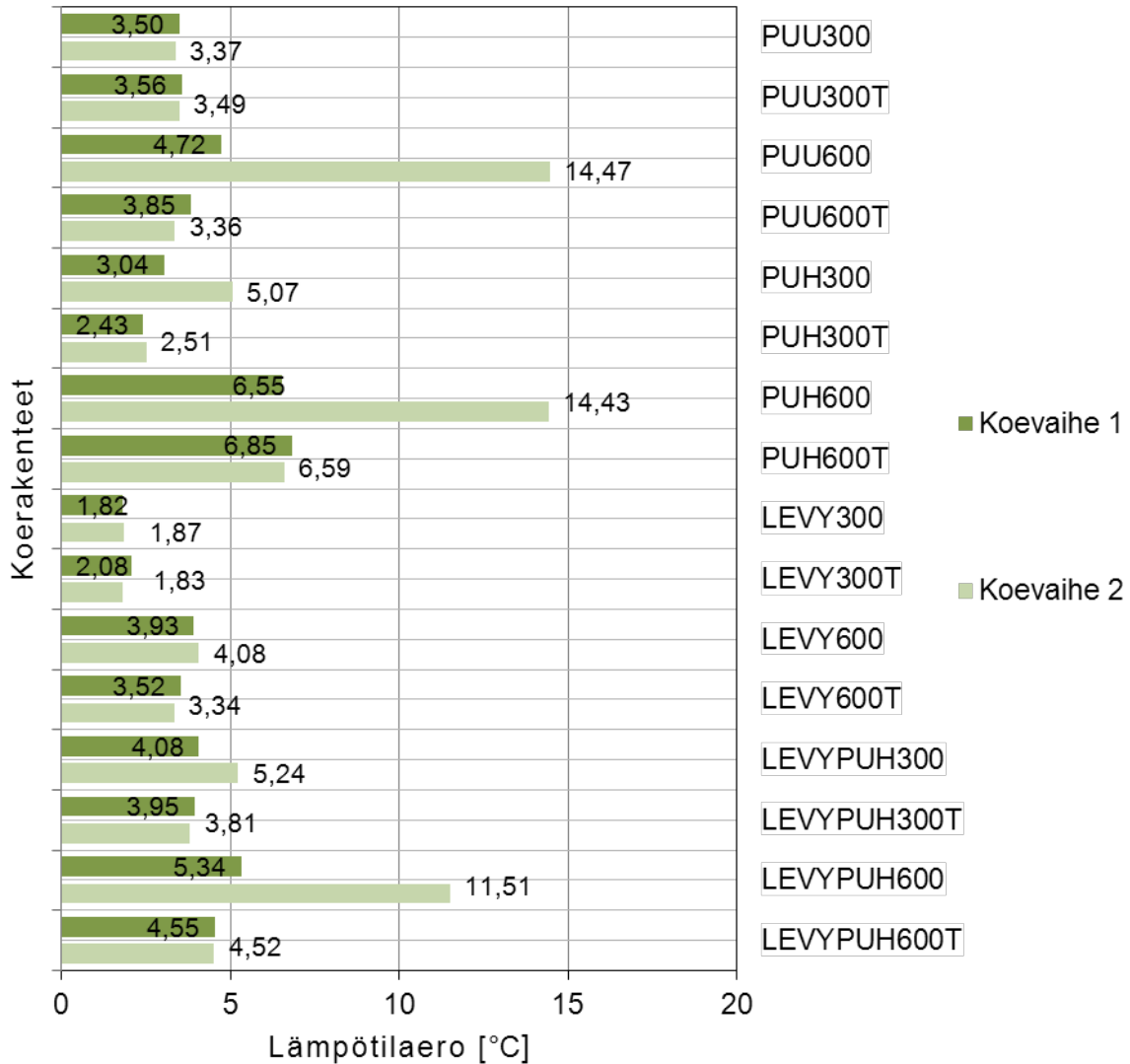
Koerakenne	Kokeen vaihe	T_i [°C]	T_{si} [°C]	T_{se} [°C]	T_e [°C]	ΔT [°C]
PUU300	1. koevaihe	20,00	19,47	-12,61	-13,85	33,85
	2. koevaihe	20,00	19,49	-12,86	-14,40	34,40
PUU600	1. koevaihe	20,00	19,62	-15,14	-15,37	35,37
	2. koevaihe	20,00	19,60	-14,81	-15,21	35,21
PUU600T	1. koevaihe	20,00	19,64	-14,29	-15,17	35,17
	2. koevaihe	20,00	19,63	-14,45	-15,28	35,28
PUH300	1. koevaihe	20,00	19,43	-12,99	-14,05	34,05
	2. koevaihe	20,00	19,47	-13,12	-14,22	34,22
PUH600	1. koevaihe	20,00	19,58	-14,20	-14,69	34,69
	2. koevaihe	20,00	19,57	-14,13	-14,69	34,69
PUH600T	1. koevaihe	20,00	19,62	-13,95	-14,91	34,91
	2. koevaihe	20,00	19,60	-13,83	-15,03	35,03
LEVY600	1. koevaihe	20,00	19,70	-14,51	-14,75	34,75
	2. koevaihe	20,00	19,70	-14,69	-14,94	34,94
LEVY600T	1. koevaihe	20,00	19,70	-14,29	-14,73	34,73
	2. koevaihe	20,00	19,70	-14,42	-14,94	34,94
LEVYPUH600	1. koevaihe	20,00	19,63	-14,15	-14,81	34,81
	2. koevaihe	20,00	19,65	-13,98	-14,84	34,84
LEVYPUH600T	1. koevaihe	20,00	19,66	-13,81	-14,90	34,90
	2. koevaihe	20,01	19,67	-13,83	-14,92	34,92

7.4.5 Koetulokset

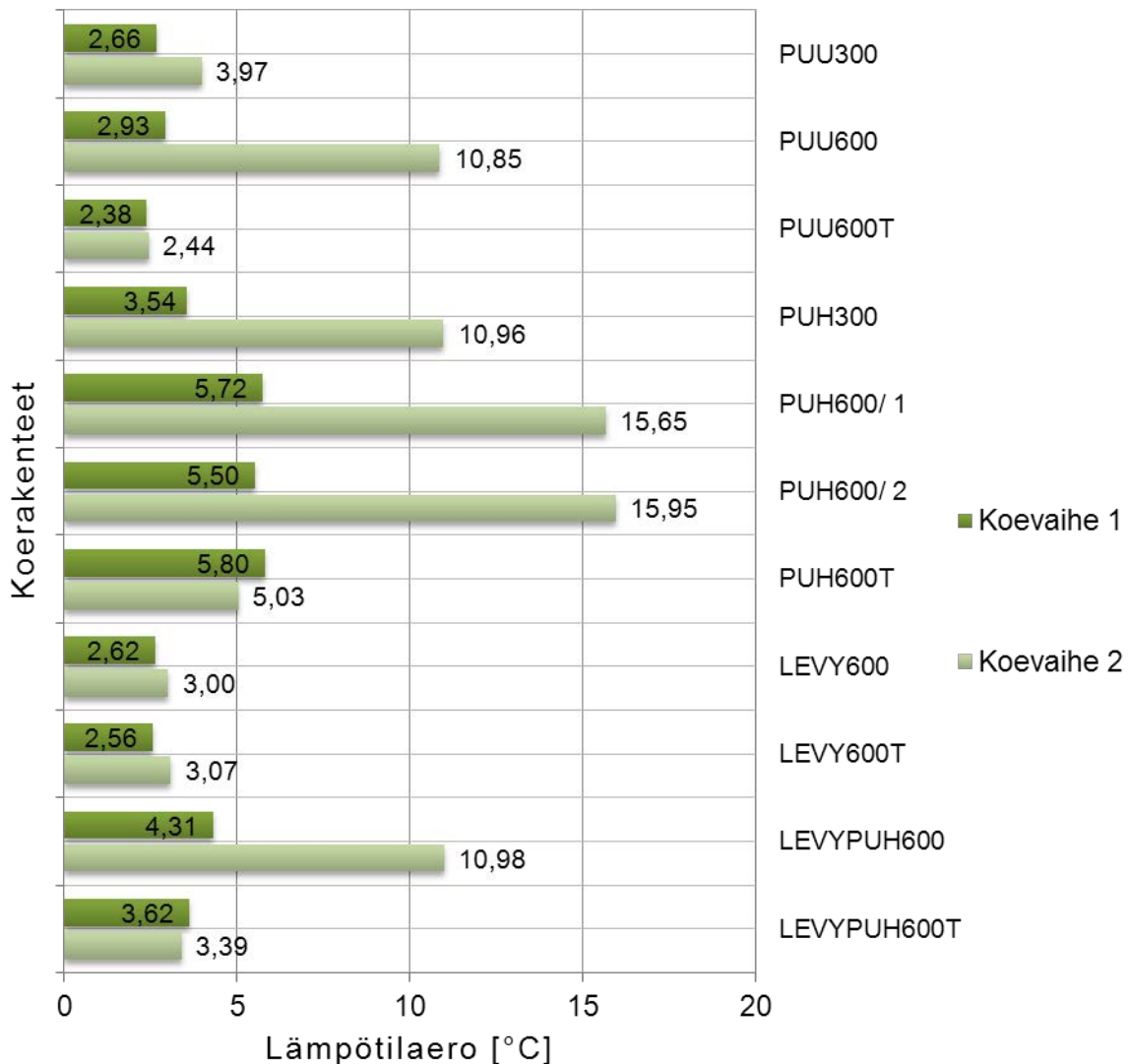
Lämpötilakenttien muutokset lämmöneristeen sisällä

Kummassakin tutkimuksen osassa tarkasteltiin lämpötilakenttien muutosta lämmöneristekerroksessa 100 mm välein eristeen paksuuden suunnassa. Ideaalisessa tilanteessa, jossa konvektiota ei esiinny, lämpötilan tulisi muuttua tasaisesti koko eristeen paksuuden matkalla. Lähtökohtaisesti voidaan olettaa, että mitä suurempi lämpötilaero on, sitä suurempia ovat myös rakenteessa tapahtuvat ilmavirtaukset ja sitä enemmän rakenteen

lämmöneristävyys heikkenee. Kuvassa 7.4.4 on esitetty lämmöneristeen sisältä mitattu suurin lämpötilaero samalta mittaustasolta (kaikkien mittaustasojen suurin ero) tutkimuksen 1. osassa ja kuvassa 7.4.5 vastaavat erot tutkimuksen 2. osassa. Tulokset on esitetty 6 tunnin keskiarvona stationääritilanteessa.



Kuva 7.4.4 Tutkimuksen 1. osan rakenteissa esiintynyt suurin lämpötilaero samalla mittaustasolla lämmöneristeen sisällä. Tulokset ovat 6 tunnin keskiarvoja. (Koevaihe 1 = tuulettamaton tilanne, Koevaihe 2 = ilmavirtaus rakenteen ulkopintaa pitkin).



Kuva 7.4.5 Tutkimuksen 2. osan rakenteissa esiintynyt suurin lämpötilaero samalla mittaustasolla lämmöneristeen sisällä. Tulokset ovat 6 tunnin keskiarvoja. (Koevaihe 1 = tuulettamaton tilanne, Koevaihe 2 = ilmavirtaus rakenteen ulkopintaa pitkin).

Kuvista 7.4.4 ja 7.4.5 nähdään, että kaikissa koerakenteissa lämpötilakentät olivat jossain määrin epälineaarisia. Lämpötilaeroja esiintyi etenkin rakenteissa, joiden yläpinnalla ei ollut tuulensuojakalvoa. Ohuissa levyvillalla eristetyissä koerakenteissa LEVY300 ja LEVY300T lämpötilaerot olivat kaikkein pienimmät tutkimuksen 1. osassa.

Koevaiheessa 2 eristeen pinnan suuntainen ilmavirtaus aiheutti koevaihetta 1 suurempia lämpötilaeroja ainoastaan sellaisissa 600 mm paksuissa puhalluseristeissä, joiden yläpinnassa ei ollut tuulensuojakalvoa. Puhaltimella pyrittiin saamaan aikaan tilanne, joka kuvaa voimakkaasti tuuletettua yläpohjarakennetta.

Tutkimuksen 1. osassa oli myös koevaihe, jossa sisäpinnan lähelle asennettiin pistemäiseksi lämmönlähteeksi eristekerroksen lämpötilakenttään vaikuttava hehkulamppu. Tässä tapauksessa suurin lämpötilaero kaikissa kokeissa oli 15,95–22,38 °C. Yhtä koetta lukuun

ottamatta suurin lämpötilaero esiintyi tasolla 0 eli eristeen alapinnassa. Tarkemmat lämpötilajakaumat tämän koevaiheen osalta on esitetty lähteessä Pakkanen (2012). Lampun lämmitystehon vaikutus lämmöneristeen lämpötilakenttiin oli erittäin suuri, mutta todellisten valaisimien synnyttämät lämpötilakenttien muutokset eristeissä edellyttävät vielä lisätutkimusta. Koetulokset osoittavat kuitenkin, että valaisimilla voi olla merkittävä vaikutus sisäistä konvektiota synnyttävänä tekijänä yläpohjarakenteissa.

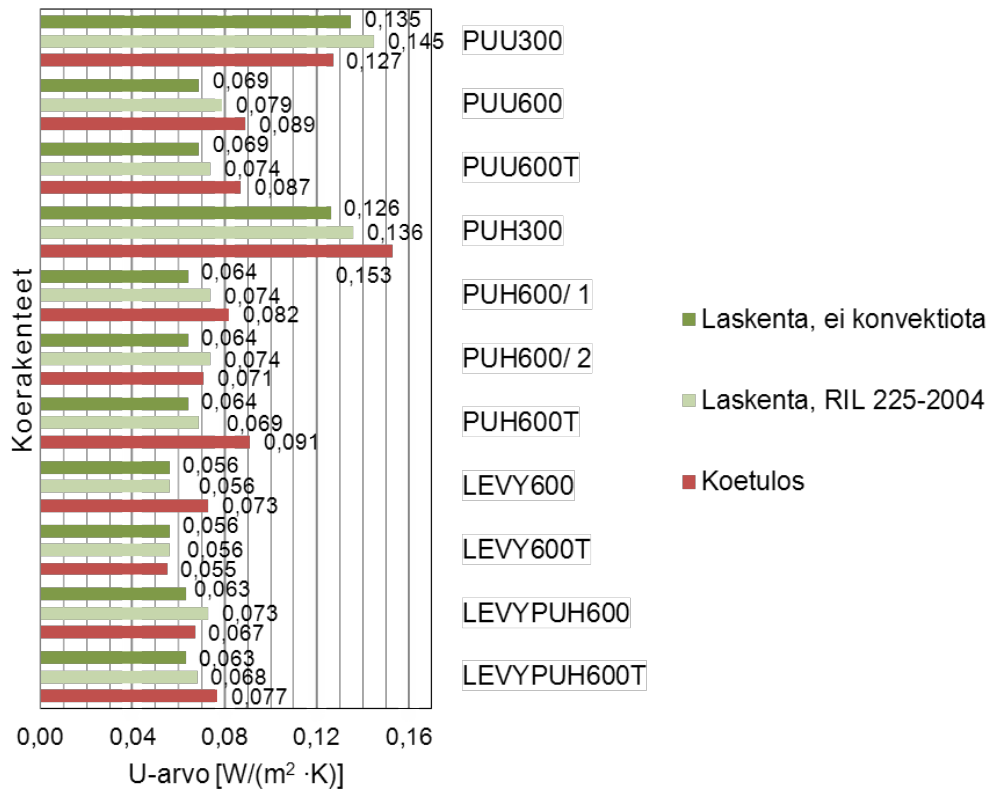
Lämpötilapoikkeamat vastasivat ennakko-odotuksia siitä, missä rakenteissa ja koetilanteissa sisäistä konvektiota esiintyy eniten. Tuuletetussa tilanteessa (koevaihe 2) konvektion määrä näytti kasvavan erityisesti paksuilla puhalluseristeillä, joiden yläpinnassa ei ole tuulensuojakalvoa. Tällöin myös lämpötilaero eristeen sisällä kasvoi voimakkaasti. Tutkimuksen osien 1 ja 2 välillä tulokset olivat lämpötilakenttien osalta pääpiirteissään yhteneväiset, mutta puhalluseristeiden osalta samassa rakenteessa esiintyi tutkimuksen eri osissa kuitenkin jonkin verran vaihteluita. Tämä osoittaa, että eristeen ilmanläpäisevyyden lisääntyessä myös eristekerroksen lämpötilaerot vaihtelevat enemmän samojen koerakenteiden välillä. Tämän perusteella voidaan arvioida, että puhalluseristeillä eristetyissä yläpohjissa esiintyy myös todellisissa U-arvoissa enemmän vaihtelua.

Rakenteiden U-arvot

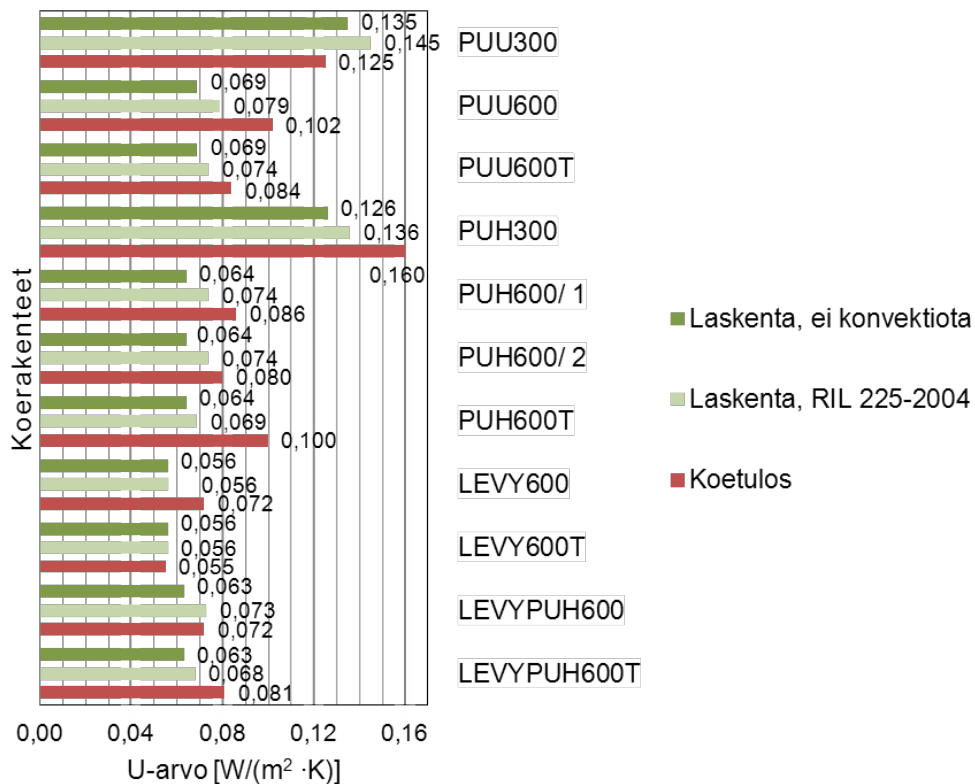
Tutkimuksen 2. osassa tutkituille rakenteille laskettiin teoreettinen lämmönläpäisykertoimen arvo siten, että lämmönsiirto eristeen läpi oletettiin tapahtuvan pelkän johtumisen ja säteilyn avulla. Nämä tekijät on otettu huomioon lämmöneristeen tehollisessa lämmönjohtavuuden arvossa. Lämmönläpäisykerroin laskettiin myös RIL 225 (2005) mukaan, jolloin U-arvossa otettiin tarvittaessa huomioon lämmöneristeen ilmanläpäisevyydestä johtuva lisäystermi ΔU_a . Lisäystermin arvot olivat lämmöneristeen ilmanläpäisevyydestä riippuen joko 0; 0,005 tai 0,01 W/(m²·K).

Kokeessa U-arvo määritettiin tutkittavan rakenteen läpi siirtyvän lämpövirran ja kokonaislämpötilaeron avulla (ks. luku 7.2). Kuvissa 7.4.6 ja 7.4.7 on esitetty laskennalliset ja kokeesta mitatut U-arvot tutkimuksen 2. osassa tutkituille rakenteille.

Kuvien teksteissä ”Laskenta, ei konvektiota” tarkoittaa rakenteen laskennallista U-arvoa ilman konvektion vaikutusta, ”Laskenta, RIL 225-2004 (2005)” tarkoittaa laskennallista U-arvoa, jossa on otettu lisäksi huomioon RIL 225 (2005) annettu U-arvon lisäystermi ja ”Koetulos” kokeesta saatua mittaustulosta.



Kuva 7.4.6 Tutkimuksen 2. osan rakenteiden laskennalliset ja kokeelliset U-arvot koevaiheessa 1 (tuulettamaton tilanne).



Kuva 7.4.7 Tutkimuksen 2. osan rakenteiden laskennalliset ja kokeelliset U-arvot koevaiheessa 2 (ilmavirtaus rakenteen ulkopintaa pitkin).

Kuvien 7.4.6 ja 7.4.7 perusteella voidaan todeta, että lämmöneristeiden sisällä tapahtuvat ilmavirtaukset kasvattavat puhalluseristeillä toteutettujen yläpohjarakenteiden U-arvoja merkittävästi. Ilmavirtauksen tapahtuessa lämmöneristeen yläpinnan suuntaisesti (koevaihe 2) U-arvot suurenevät 0–56 % verrattuna pelkän johtumisen ja säteilyn perusteella laskettuihin U-arvoihin ja 0–45 % verrattuna laskennallisiin U-arvoihin, joissa sisäisen konvektion vaikutus on pyritty ottamaan huomioon RIL 225 (2005) mukaisesti. Jälkimmäisessä tapauksessa laskenta- ja koetulokset vastasivat toisiaan parhaiten PUU600T, PUH600 ja LEVYPUH600 rakenteilla. Koetulosten perusteella voidaan todeta, että RIL 225 (2005) esitetty lisästermi U_a ei ota sisäisen konvektion vaikutusta kaikissa tapauksissa riittävästi huomioon.

300 mm paksuilla eristeillä tehdyissä kokeissa sisäistä konvektiota esiintyi koetulosten perusteella ainoastaan puhalluslasivillassa, mutta 600 mm paksuilla eristeillä konvektion vaikutus oli samaa suuruusluokkaa kummassakin eristetyypissä. 100 mm levyvillan käyttö puhalluslasivillan alapuolella vähensi sisäisen konvektion vaikutusta 30–50 %. Näissä rakenteissa sisäinen konvektio suurensi koetulosten perusteella laskettua U-arvoa 15–30 % koevaiheen 2 olosuhteissa.

Ainoa rakenne, joka vastasi teoreettisia arvoja hyvin molemmissa koevaiheissa oli 600 mm paksu levyvilla, jonka yläpinnassa oli tuulensuojakalvo (LEVY600T). Tämän rakenteen voitiin olettaakin olevan lämmöneristävyydeltään paras rakenne, koska levyvillan ilmanläpäisevyys on oleellisesti pienempi kuin puhalluseristeillä ja rakenteen yläpintaa suojasi lisäksi tuulensuojakalvo.

Koevaiheissa 2 tuulensuojakalvon käyttö rakenteen yläpinnassa vähensi konvektiota lasivillalevyistä ja puhalletusta puukuitueristeestä tehdyissä rakenteissa, mutta sen sijaan konvektio lisääntyi pääasiassa puhalletulla lasivillalla toteutetuissa rakenteissa. Puhalluslasivillalla saadut koetulokset eivät johdu eristeen erilaisesta asennuksesta, koska tuulensuojakalvo asetettiin saman rakenteen päälle, jonka U-arvo oli mitattu aiemmin ilman kalvon vaikutusta. Jos tarkastellaan eristekerroksessa esiintyneitä suurimpia lämpötilaeroja kuvassa 7.4.5, havaitaan että lämpötilaerot olivat kuitenkin tuulensuojalla peitetyissä puhalluslasivillarakenteissa oleellisesti pienemmät kuin ilman tuulensuojaa olevissa vastaavissa rakenteissa. Näin ollen näyttää siltä, että eristekerroksen sisäisistä lämpötilaeroista ei voida aina arvioida sitä, missä rakenteessa konvektiovirtausten vaikutukset U-arvoon ovat suurimmat.

Yksi selitys tuulensuojalla peitetyn puhalluslasivillarakenteen suuremmalle U-arvolle voi olla se, että tuulensuojan alla eristekerrokseen pääsee kehittymään häiriötön sisäinen konvektiokierto, joka kuljettaa lämpöä rakenteen läpi tehokkaasti. Ilman tuulensuojaa olevissa rakenteissa ulkopinnan ilmavirtaukset saattavat sekoittaa ilman virtausreitit lämmöneristeen sisällä niin, että konvektion vaikutus U-arvoon on vähäisempi. Toisaalta ilman tuulensuojaa olevan rakenteen U-arvo oli pienempi myös tuulettamattomassa tilanteessa, mikä osoittaa, että

yläpinnan ilmavirtaukset eivät riitä selittämään tätä ilmiötä kokonaan. Tämän asian tarkempi selvittäminen edellyttää siten lisätutkimusta.

Levyvillalla toteutetussa rakenteessa, jossa ei ollut tuulensuojakalvoa (LEVY600), havaittiin U-arvon heikkenemistä laskennalliseen arvoon verrattuna myös tuulettamattomassa tilanteessa (koevaihe 1), vaikka tässä tilanteessa tuloksen tulisi olla lähellä tuulensuojalla suojattua levyvillarakennetta. Selityksenä voi olla, että konvektiovirtauksia on kuitenkin tapahtunut lämmöneristeen ja tutkimusaukon reunan välisellä liitosalueella. Tutkimusaukon reuna-alueilla vähäistenkin konvektiovirtausten vaikutus voi olla suhteellisen merkittävä koetulokseen, sillä konvektiovirtaukset joko lämmittävät tai jäädyttävät reunojen vaneria, jolloin lämpötilagradientti kasvaa ja reunoilla johtumalla siirtyvä lämpövirta kasvaa. Tämä näkyy koetuloksissa suurempana U-arvona. Sama ilmiö on tällöin vaikuttanut myös muissa koetilanteissa. Todellisessa levyvillalla tehdyssä rakenteessa eristelevyjen jatkoskohdat limitettäisiin toistensa päälle niin, ettei yhtenäistä pystysuoraa jatkosta synny rakenteeseen muuten kuin erityistapauksessa (esim. hormien ja IV-kanavien kohdalla). Tästä syystä LEVY600 rakenteen osalta kokeesta saatuihin U-arvoihin tulee suhtautua varauksella.

Koerakenteille määritetyt Nusseltin luvut

Rakenteen läpäisevän lämpövirran perusteella määritettiin koerakenteille myös Nusseltin luku (Nu), joka kuvaa sitä, kuinka paljon konvektio lisää rakenteen läpi siirtyvää lämpövirtaa (ks. luku 7.2). Jos Nusseltin luku on 1, lämpö siirtyy tutkittavan rakenteen läpi pelkästään johtumalla ja säteilyllä. Mitä suurempi Nusseltin luku on, sitä suurempi on konvektion osuus rakenteen läpi siirtyvässä lämpövirrassa.

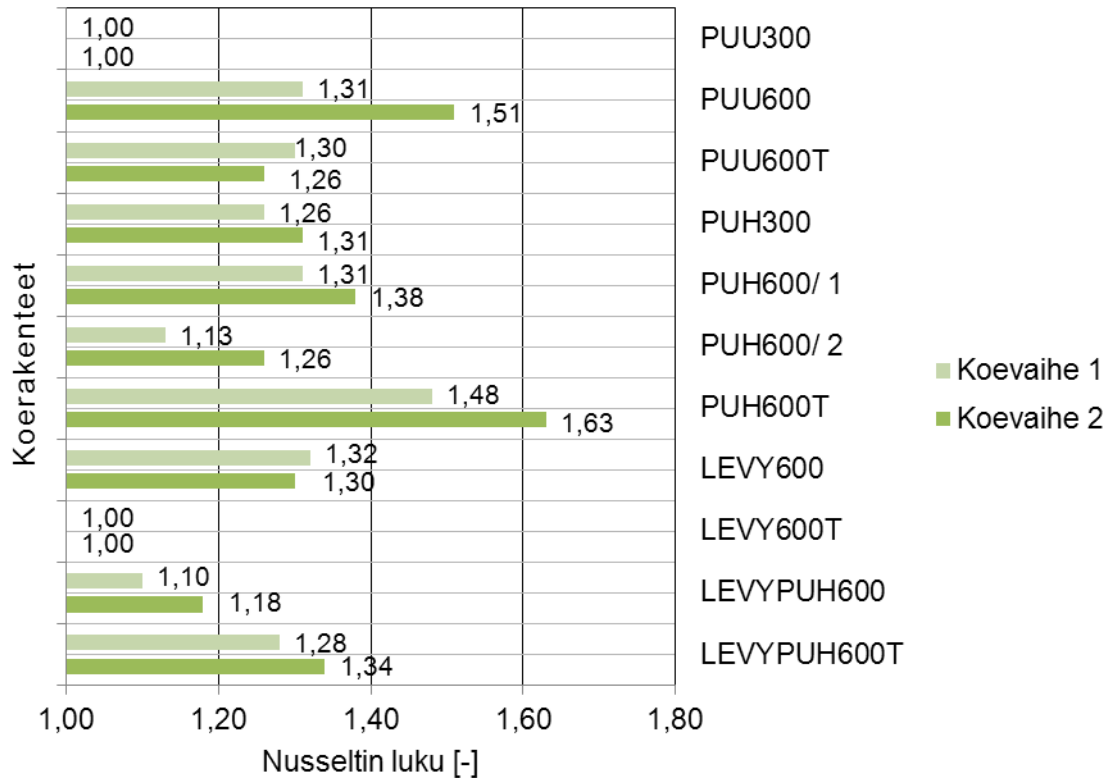
Pelkän johtumisen ja säteilyn avulla siirtyvä laskennallinen lämpövirta määritettiin rakenteen sisä- ja ulkopinnan lämpötilaeron sekä lämmöneristeelle ja vanerille määritettyjen lämmönjohtavuuksien (ks. taulukko 7.4.2) perusteella kaavalla 7.4.1.

$$\Phi_{cd+r} = \frac{T_{si} - T_{se}}{\frac{d_{ins}}{\lambda_{ins}} + \frac{d_{board}}{\lambda_{board}}} \cdot A_{str} \quad (7.4.1)$$

missä

Φ_{cd+r}	on rakenteen läpi siirtyvä lämpövirta johtumalla ja säteilemällä [W]
A_{str}	on rakenteen pinta-ala [m ²]
d_{ins}	on lämmöneristekerroksen paksuus [m]
d_{board}	on vanerilevyn paksuus [m]
λ_{ins}	on lämmöneristeen mitattu lämmönjohtavuus [W/(mK)]
λ_{board}	on vanerilevyn mitattu lämmönjohtavuus [W/(mK)]
T_{si}	on rakenteen sisäpinnan lämpötila [°C, K]
T_{se}	on rakenteen ulkopinnan lämpötila [°C, K]

Lämpövirran laskennassa ei otettu huomioon pintavastuksia, koska eri tuuletustilanteet vaikuttivat ulkopuolen pintavastuksen arvoon. Kuvassa 7.4.8 on esitetty Nusseltin luvut eri koerakenteille tutkimuksen 2. osassa.



Kuva 7.4.8 Tutkimuksen 2. osan rakenteiden Nusseltin luvut koevaiheissa 1 ja 2.

Kuvasta 7.4.8 nähdään, että kaikissa kokeissa kahta koetta lukuun ottamatta esiintyi sisäistä konvektiota. Konvektion osuus oli tyypillisesti suurempi 600 mm paksuissa koerakenteissa kuin 300 mm paksuissa koerakenteissa. 600 mm paksuissa koerakenteissa sisäinen konvektio lisäsi lämpövirtaa rakenteen läpi tapauksesta riippuen 13–63 %. Suurimmassa osassa kokeita ilman virtausnopeuden kasvulla lämmöneristeen yläpinnalla ei ollut kovin suurta vaikutusta sisäisen konvektion arvoon. Esimerkiksi 600 mm paksuissa puhalluslasivillalla eristetyissä rakenteissa muutokset olivat varsin pieniä, vaikka eristeen yläpinnassa ei ollut tuulensuojakalvoa.

PUU600-rakenteessa (koevaihe 2) esiintyi enemmän sisäistä konvektiota kuin kokeessa PUH600. Tämä oli odottamaton tulos, sillä puhalluslasivillan ilmanläpäisevyydeksi mitattiin suurempi arvo kuin puhalluspuukuitueristeellä (ks. taulukko 7.4.1). Kuitenkin tarkasteltaessa kokeiden PUU300 ja PUH300 tuloksia, konvektiota tapahtui enemmän puhalluslasivillassa, mikä oli odotusten mukaista. PUH600-koe päätettiin uusiksi, jotta saatiin lisävarmuutta johtopäätöksiin sekä tietoa asentamisen vaikutuksesta. Lisäkokeen mittaustulosten mukaan kokeessa PUH600/2 esiintyi vielä vähemmän sisäistä konvektiota. PUH600/1 ja PUH600/2 tulosten poikkeamisesta voidaan tehdä johtopäätös, että pienilläkin asennuseroilla voi olla merkittävä vaikutus eristeellä, jonka ilmanläpäisevyys on suhteellisen suuri. PUU600-

rakenteelle (koevaihe 2) mitattua suurempaa sisäistä konvektiota on hankalampi selittää. Tähän voi olla syynä asennuksesta aiheutunut eristekerroksen epähomogeenisempi kuiturakeiden jakauma, josta saattoi aiheutua hyvin ilmaa läpäiseviä vyöhykkeitä koerakenteen eristekerrokseen, vaikka asennustiheys oli keskimäärin oikea. Tarkempi kuva eri eristeiden välisistä eroista edellyttäisi laajempaa koesarjaa, jossa testattaisiin useampi samanlainen rakenne kummallakin lämmöneristeellä. Tässä tutkimuksessa laajempaa koesarjaa ei voitu tehdä aikataulusyistä.

Kuvasta 7.4.8 nähdään myös, että lasivillapuhalluseristeellä tuulensuojakalvon asennus eristeen yläpintaan lisäsi konvektion vaikutusta oleellisesti ilmavirtauksen tapahtuessa lämmöneristeen pintaa pitkin (koevaihe 2). Tulos on ristiriitainen verrattuna näistä rakenteista mitattuihin lämpötilaerojen maksimiarvoihin (ks. kuva 7.4.5), kuten jo aiemmin todettiin U-arvotarkastelujen yhteydessä. Sama ilmiö esiintyi myös LEVYPUH600T-tapauksessa, mutta vähäisempänä.

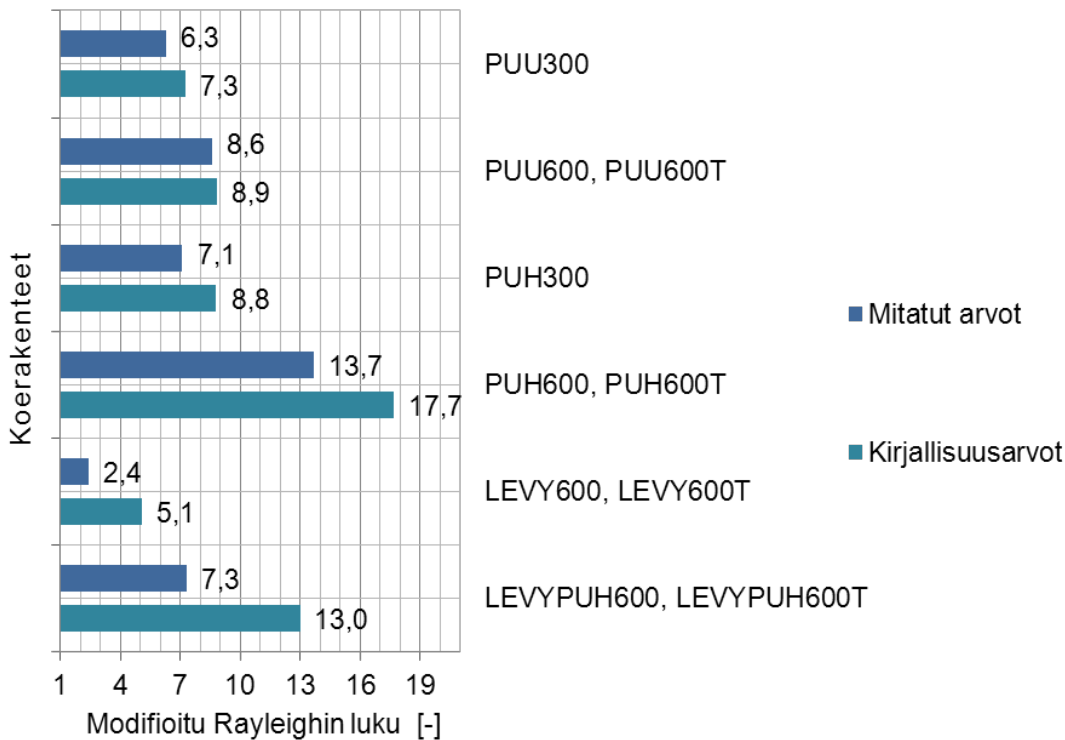
Koerakenteille määritetyt modifioidut Rayleighin luvut

Uudessa RakMK C4 (2012):ssä yläpohjarakenteiden sisäisen konvektion vaikutusta tarkastellaan modifioidun Rayleighin luvun (Ra_m) avulla (ks. kaava 7.1.1). Tarkastelussa oletetaan, että rakenteessa ei esiinny merkittävää sisäistä konvektiota, jos modifioitu Rayleighin luku on alle ohjeissa annetun raja-arvon. Yläpohjarakenteelle, jonka yläpinta on avoin, raja-arvo on 15 ja rakenteelle, jonka yläpinnassa on tuulensuoja, raja-arvo on 30. Raja-arvot perustuvat standardiin SFS-EN ISO 10456 (2008). Jos raja-arvo ylittyy, rakenne ei ole hyväksyttävä, vaan siihen on tehtävä joko rakenteellisia muutoksia tai lämmöneriste on vaihdettava pienemmän ilmanläpäisevyyden omaavaan eristeeseen (RakMK C4 2012).

RakMK C4 (2012):n mukaan modifioitu Rayleighin luku lasketaan 50 °C lämpötilaerolla. Kuvassa 7.4.9 on esitetty tällä lämpötilaerolla lasketut yläpohjarakenteiden modifioidut Rayleighin luvut. Modifioidut Rayleighin luvut on laskettu sekä kokeissa mitatuilla lämmöneristeiden materiaaliominaisuuksilla (ks. taulukot 7.4.1 ja 7.4.2) että kirjallisuudesta/valmistajilta saaduilla materiaaliominaisuuksilla (taulukko 7.4.4).

Taulukko 7.4.4 Kirjallisuudesta/valmistajilta saadut lämmöneristeiden ominaisuudet, joita on käytetty kuvan 7.4.9 modifioitujen Rayleighin lukujen laskennassa.

Materiaali	Tiheys ρ [kg/m ³]	Lämmönjohtavuus λ_U [W/(m·K)]	Ilmanläpäisevyys κ_a [m ³ /(m·s·Pa)]
Puhalluslasivilla	22–28	0,041	$4,6 \times 10^{-4}$
Puhallettu puukuitueriste	26–40	0,039	$2,3 \times 10^{-4}$
Lasivillalevy	15–20	0,037	$1,2 \times 10^{-4}$
Puhalluslasivilla + lasivillalevy	20–26	0,040	$3,1 \times 10^{-4}$



Kuva 7.4.9 Yläpohjarakenteiden modifioidut Rayleighin luvut tutkimuksen 2. osassa. Modifioitu Rayleighin luku on laskettu kokeissa käytettyjen lämmöneristeiden mitatuilla lämmönjohtavuus- ja ilmanläpäisevyysarvoilla (Mitatut arvot) ja kirjallisuudesta/valmistajilta saaduilla materiaaliominaisuuksilla (Kirjallisuusarvot).

Kuvasta 7.4.9 havaitaan, että kaikkien koerakenteiden modifioidut Rayleighin luvut jäävät alle RakMK C4 (2012):ssä annettujen raja-arvojen, joten kaikki rakenteet ovat hyväksyttäviä ja sisäisen konvektion ei pitäisi olla niissä merkittävää. RakMK C4 (2012):n ohjetta käytettäessä laskennalliseen U-arvoon ei tarvitse lisätä myöskään konvektion huomioon ottavaa lisätermiä U_a , joka on annettu RIL 225 (2005):ssä. Tästä huolimatta rakenteissa esiintyy todellisuudessa merkittävää sisäistä konvektiota.

Verrattaessa kokeissa käytettyjä lämmöneristeiden ilmanläpäisevyyksiä (ks. taulukko 7.4.2) tyypillisiin kirjallisuudesta/valmistajilta saataviin arvoihin voidaan todeta, että kokeissa käytetyn puhalluslasivillan ilmanläpäisevyys oli vielä pienempi kuin tyypillinen arvo ja 600 mm paksuissa rakenteissa käytetyn puhalletun puukuitueristeen ilmanläpäisevyys vastasi tyypillistä ilmanläpäisevyyden arvoa. Sen sijaan 300 mm paksuissa rakenteissa käytetyn puukuitueristeen ilmanläpäisevyys oli suurempi kuin tyypillinen arvo. Näin ollen 600 mm paksut koerakenteet ovat ilmanläpäisevyyden osalta vertailukelpoisia nykyisiin puhalluseristeillä toteutettuihin yläpohjarakenteisiin.

Koetulosten perusteella näyttää siltä, että modifioidun Rayleighin luvun raja-arvoa tulisi laskea välille 2–7 sekä avoimissa että tuulensuojatuissa yläpohjissa, jotta konvektiovirtaukset voitaisiin eliminoida rakenteista riittävän hyvin. Suositeltavana modifioidun Rayleighin luvun arvona voidaan pitää kummassakin tapauksessa lukua 5, joka vastaa myös Shankarin ja

Hagentoftin (2001) laskentatulosten perusteella saatua arvoa. Taulukossa 7.4.5 on laskettu tällä modifioidulla Rayleighin luvun arvolla eripaksuisille eristekerroksille lämmöneristeen ilmanläpäisevyyden enimmäisarvo, jolla rakenteessa ei todennäköisesti esiinny merkittävää sisäistä konvektiota.

Taulukko 7.4.5 Yläpohjarakenteen lämmöneristeen ilmanläpäisevyyden enimmäisarvot, joilla modifioidun Rayleighin luvun arvoksi saadaan 5, kun $\lambda_U = 0,040 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ja $\Delta T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$.

Lämmöneristekerroksen paksuus [mm]	Ilmanläpäisevyyden enimmäisarvo κ_a [$\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$]
800	$0,95 \times 10^{-4}$
700	$1,09 \times 10^{-4}$
600	$1,27 \times 10^{-4}$
500	$1,52 \times 10^{-4}$
400	$1,90 \times 10^{-4}$
300	$2,54 \times 10^{-4}$
200	$3,81 \times 10^{-4}$

Taulukosta 7.4.5 nähdään, että mitä paksumpi eristekerros tehdään, sitä pienempi lämmöneristeen ilmanläpäisevyyden tulee olla, jotta eristekerroksessa ei esiintyisi sisäistä konvektiota. Tämän tutkimuksen perusteella nykyisillä puhalluseristeiden ilmanläpäisevyyksillä eristekerroksen enimmäispaksuus voisi olla n. 250–300 mm, jotta merkittävää sisäistä konvektiota ei ilmenisi.

On kuitenkin huomattava, että suurimmassa osassa aiemmista tutkimuksista modifioidun Rayleighin luvun kriittinen raja-arvo on vaihdellut yläpohjarakenteissa välillä 15–30 (ks. luku 7.4.1). Esimerkiksi Wahlgrenin (2001) esittämällä kriittisen modifioidun Rayleigh'n luvun arvolla 22 sisäistä konvektiota alkaisi esiintyä vasta noin 950 mm paksussa puhalluslasivillakerroksessa (tässä tutkimuksessa mitatuilla materiaaliominaisuuksilla ja 50 °C lämpötilaerolla).

7.4.6 Koetulosten tarkastelu

Tässä tutkimuksessa sisäisellä konvektiolla oli selvästi suurempi vaikutus yläpohjarakenteiden lämpötekniseen toimintaan kuin useimmissa luvussa 7.4.1 esitetyissä aiemmissä tutkimuksissa. Toisaalta myös aiemmat tutkimustulokset eroavat toisistaan tässä suhteessa merkittävästi.

Shankarin ja Hagentoftin (2001) esittämässä tutkimustuloksissa kuvassa 7.4.1 käytettiin levyvillan ilmanläpäisevyytenä arvoa $4,36 \times 10^{-4} \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$, joka vastaa kohtuullisen hyvin tässä tutkimuksessa mitattua puhalluslasivillan ilmanläpäisevyyttä $4,6 \times 10^{-4} \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$ (ks. taulukko 7.4.4). Näin ollen tällä ilmanläpäisevyydellä saatuja laskentatuloksia voidaan verrata saatuihin koetuloksiin. Kuten aiemmin jo todettiin, laskentatulosten mukaan lämpötilaeron

ollessa 35 °C, on Nusseltin luku 600 mm paksulla mineraalivillaeristeellä n. 1,4. Kuvan 7.4.8 koetuloksista taas nähdään, että 600 mm paksujen puhalluslasivillalla eristettyjen koerakenteiden Nusseltin luvut vaihtelivat koevaiheissa 1 ja 2 välillä 1,13–1,63 keskiarvon ollessa 1,37. Tällä perusteella voidaan todeta, että tämän tutkimuksen tulokset vastaavat varsin hyvin Shankarin ja Hagentoftin (2001) esittämiä laskentatuloksia.

Tämän tutkimuksen koetuloksia tarkasteltaessa on huomattava, että todellisuudessa lämmöneriste levitetään yläpohjaan puhaltamalla, jolloin eristekuidut liittyvät toisiinsa eri tavalla kuin käsin levitettäessä. Tällöin eristekerroksessa on mahdollista saavuttaa sama ilmanläpäisevyys pienemmällä tiheydellä kuin käsin levitettäessä. Tämä tekijä otettiin huomioon kuitenkin lisäämällä lämmöneristeen tiheyttä siten, että paksuilla 600 mm eristeillä päästiin samaan tai pienempään ilmanläpäisevyyteen kuin tyyppillisessä puhallusasennuksessa.

Puhalluseristeiden levityksessä syntyy aina jonkin verran eroja, joten koetuloosiin tulee tätä kautta aina jonkin verran vaihtelua. Kuitenkin kaikki kokeet tehtiin saman henkilön toimesta ja samanlaista toteutustapaa käyttäen, jotta koetulokset olisivat mahdollisimman hyvin vertailukelpoisia. Tutkimuksen osien 1 ja 2 maksimilämpötilaeroja vertaamalla voidaan todeta, että yleisesti ottaen samat rakenteet käyttäytyivät kokeessa samalla tavalla. Tuulensuojakalvon vaikutuksen tarkasteluissa eristeen asennus ei vaikuttanut mitattujen koeparien eroihin lainkaan, koska mittauksissa lämmöneristekerros oli aina sama. Toisaalta puhalluseristeiden osalta eroja löytyy myös käytännön rakenteista, koska eristystyön laatu riippuu merkittävästi työntekijän ammattitaidosta ja huolellisuudesta.

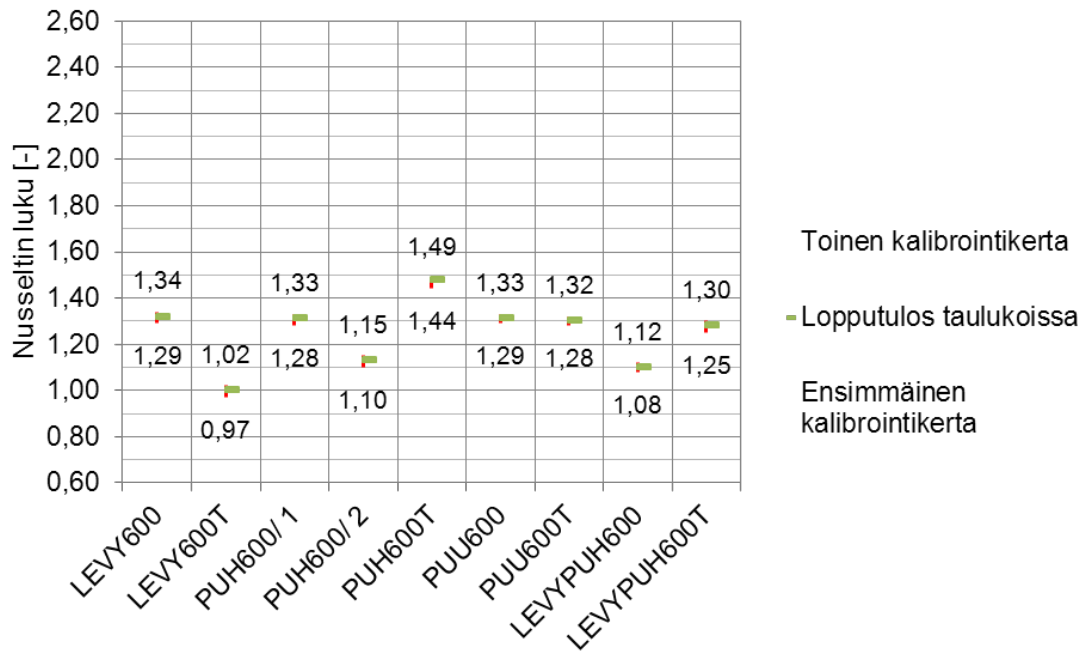
Tuulettimen aiheuttama virtausnopeus eristeen pinnalla koevaiheessa 2 oli jonkin verran suurempi kuin todellisessa tilanteessa, mutta koevaiheen 1 tilanteessa ilmavirtaukset olivat puolestaan pienempiä kuin todellisuudessa. Näin ollen käytännön yläpohjarakenteissa tuuletustilojen virtausolosuhteiden voidaan olettaa olevan pakkaskausilla koevaiheiden 1 ja 2 välillä. Koska lämmöneristekerroksen Nusseltin luvut olivat molemmissa koevaiheissa lähes kaikissa tapauksissa lähellä toisiaan, voidaan todeta, että ilman virtausnopeus eristeen yläpinnalla ei vaikuta koetuloosiin kovin merkittävästi. Tätä tukee myös se havainto, että rakenteiden yläpintaan laitettu ilmansulkukalvo ei pienentänyt sisäistä konvektiota merkittävästi, vaan päinvastoin lisäsi sitä puhalluslasivillalla eristetyissä rakenteissa.

Materiaaliominaisuuksien ja eristepaksuuden lisäksi muotosuhteiden eli eristekerroksen leveyden, pituuden ja paksuuden keskinäisten suhdelukujen tiedetään vaikuttavan oleellisesti eristekerroksessa tapahtuvien ilmavirtausten suuntiin ja voimakkuuksiin ja siten myös sisäisen konvektion suuruuteen. Tässä tutkimuksessa käytetyn tutkimuslaitteiston pakkahuoneen mitat rajoittivat rakennettavan lämpimän kammion mittoja. Koelaitteiston mitoista johtuen koerakenteiden muotosuhteet olivat jossain määrin poikkeavia todellisiin yläpohjiin nähden. Toisaalta monissa tapauksissa kattoristikoiden tai -vasojen jako on 1200 mm, jolloin todellisissakin rakenteissa puhtaasti yhtenäiset kylmäsiltojen erottamat eristetilat ovat samaa suuruusluokkaa kuin koerakenteissa. Tutkimuksessa käytetty koelaitteisto ei ollut kuitenkaan muodoltaan täysin ideaalinen, sillä todellisessa tilanteessa paarteet ja vasat muodostavat

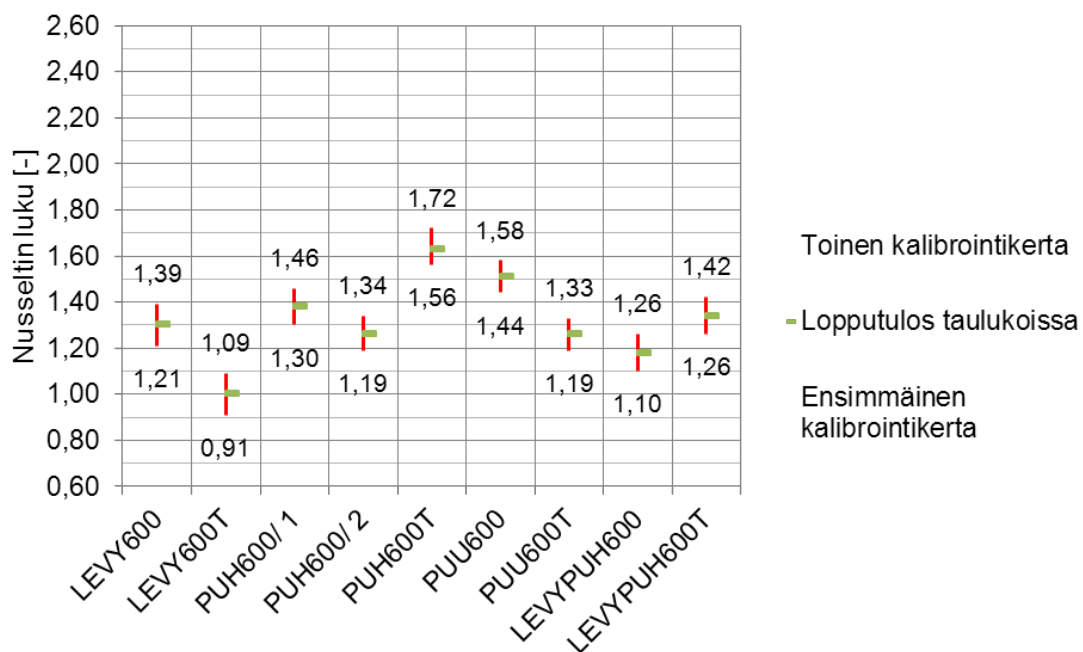
eristekerroksiin suorakaiteen muotoisia tilavuuksia, joissa konvektio voi muodostua. Joka tapauksessa yläpohjissa ei ole järkevää tutkia sisäistä konvektiota laajoissa ja täysin homogeenisissä eristekerroksissa, sillä sellaiset rakenteet eivät ole käytännössä mahdollisia todellisissa rakennuksissa. Lisäksi koko tutkittavan rakenteen tulee olla mittauksessa mukana, jotta koetuloksissa saadaan otettua huomioon ilman kierto koerakenteen reuna-alueiden ja keskiosan välillä (ks. luku 7.4.1). Tämä vaatimus jo yksistään rajoittaa yläpohjarakenteen sisäisen konvektion tarkasteluun tehtävän koejärjestelyn kokoa.

Muotosuhteiden lisäksi käytetyssä tutkimusmenetelmässä tutkimusaukon reunahäiriö vaikuttaa tutkimustuloksiin (ks. luku 7.2). Mikäli rakenteissa muodostui sisäisiä konvektiovirtauksia, ne saattoivat jäädyttää tutkimusaukon reunoja kasvattaen lämpötilagradientteja ja voimistaen lämmön johtumista tutkimusaukon reunavereissa. Toisaalta mikäli teoria konvektion käynnistymisestä vaakarakenteissa vasta kriittisen modifioidun Rayleigh'n luvun ylityttyä pitää paikkansa, reunahäiriö ei yksistään voi selittää odottamattoman suuria Nusseltin lukuja, sillä konvektion täytyy ensin käynnistyä, jotta se voi kasvattaa reunahäiriön vaikutusta. Tätä käsitystä tukevat LEVY600T-kokeiden tulokset, joissa konvektiota ei selvästi tapahtunut ja U-arvotulokset olivat hyvin lähellä laskennallisia arvoja. Tästä voidaan päätellä, että mikäli koerakenteissa ei tapahdu sisäistä konvektiota, laitteistolla voidaan mitata suhteellisen tarkasti rakenteiden U-arvoja.

Myös koelaitteiston mittaustarkkuus vaikuttaa osaltaan koetuloksiin. Tutkimuksen 2. osassa tutkimuslaitteiston laskennallinen mittaustarkkuus oli periaatteessa sama kuin ulkoseinäkoikkeissakin käytetyssä laitteistossa ($\pm 4\%$ U-arvolle), sillä yläpohjarakenteiden kokeissa käytettiin samaa mittausohjelmaa, samanlaisia lämmitysvastuksia ja jännitelähdettä, yhtä tarkkaa tehon mittaamiseen käytettyä dataloggeria sekä tarkkuudeltaan vastaavia puolijohdeantureita lämpötilaeron mittaamiseen kuin ulkoseinien tutkimuslaitteistossa (ks. luku 7.3). Koelaitteiston häviötehon kulutus tarkistettiin kalibroimalla koelaitteisto tutkimuksen 2. osan alussa ja lopussa. Häviötehon osalta havaittiin jonkin verran muutosta, joka lisää koetulosten mittauserävarmuutta. Koevaiheen 1 häviötehon ero kalibrointikokeissa oli 0,14 W ja koevaiheessa 2 0,49 W. Kuvissa 7.4.10 ja 7.4.11 on esitetty koelaitteiston kalibroinnissa mitatun häviötehon eron vaikutukset kokeista määritettyihin Nusseltin luvun arvoihin koevaiheiden 1 ja 2 osalta.



Kuva 7.4.10 Kalibrointikokeissa mitatun häviötehon eron vaikutus koerakenteista määritettyihin Nusseltin luvun arvoihin koevaiheessa 1 (tuulettamaton tilanne). Pystyviivojen päät kuvaavat eri kalibrointikertojen perusteella laskettuja Nusseltin lukuja. Kuvaan on merkitty näkyviin myös koetuloksissa esitetyt arvot (Lopputulos taulukoissa). Lämpimän kammion häviötehon kalibroinnista johtuva keskimääräinen epätarkkuus on $\pm 1,9\%$.



Kuva 7.4.11 Kalibrointikokeissa mitatun häviötehon eron vaikutus koerakenteista määritettyihin Nusseltin luvun arvoihin koevaiheessa 2 (ilman virtaus koerakenteen pintaa pitkin). Pystyviivojen päät kuvaavat eri kalibrointikertojen perusteella laskettuja Nusseltin lukuja. Kuvaan on merkitty näkyviin myös koetuloksissa esitetyt arvot (Lopputulos taulukoissa). Lämpimän kammion häviötehon kalibroinnista johtuva keskimääräinen epätarkkuus on $\pm 6,2\%$.

Kuvien 7.4.10 ja 7.4.11 perusteella tutkimuksen 2. osassa laitteiston kokonaismittausepävarmuuden voidaan katsoa olleen enintään n. $\pm 8,0$ % koetuloksesta koevaiheissa 1 ja 2.

Edellä esitettyjen näkökohtien perusteella yläpohjien sisäisen konvektion tutkimiseen liittyy paljon haasteita ja ongelmia. Tarkempi tutkimus vaatisi suuren mittakaavan tutkimuslaitteiston sekä laajan koesarjan. Tämän tutkimuksen tulokset ovat suuntaa-antavia eikä mittaustuloksista laskettuja Nusseltin luvun arvoja voida pitää kovin tarkkoina. Kuitenkin koska lähes kaikkien puhalluseristeillä tehtyjen 600 mm paksujen koerakenteiden Nusseltin luvut olivat varsin suuria, voidaan todeta, että näissä koerakenteissa sisäinen konvektio heikensi rakenteiden lämmöneristyskykyä merkittävästi jo 35 °C lämpötilaerolla. Kovina pakkaskausina, jolloin sisä- ja ulkolämpötilan ero on suurempi kuin kokeissa, sisäisen konvektion merkitys korostuu entisestään.

8 Rakennusten energiatehokkuuden ja sisäilman olosuhteiden tarkastelu

8.1 Yleistä

Rakennusten lämpötekni­sen mallinnuksen avulla tutkittiin, kuinka rakennusten vaipan lämmöneristystaso sekä rakenteiden termi­nen massa vaikuttavat rakennusten energiatehokkuuteen nykyisissä sekä tulevaisuuden ilmasto-oloissa Suomessa. Tutkimuksessa selvitettiin myös kuinka hyvään kesäaikaiseen lämpöolojen hallintaan passiivisilla sekä vapaa­jäähdytysratkaisuilla pystytään nyt ja tulevaisuudessa. Lisäksi tutkittiin ilmastonmuutoksen ja talotekni­sen järjestelmien vaikutuksia sisäilman kosteuteen.

8.1.1 Energialaskennan testivuodet

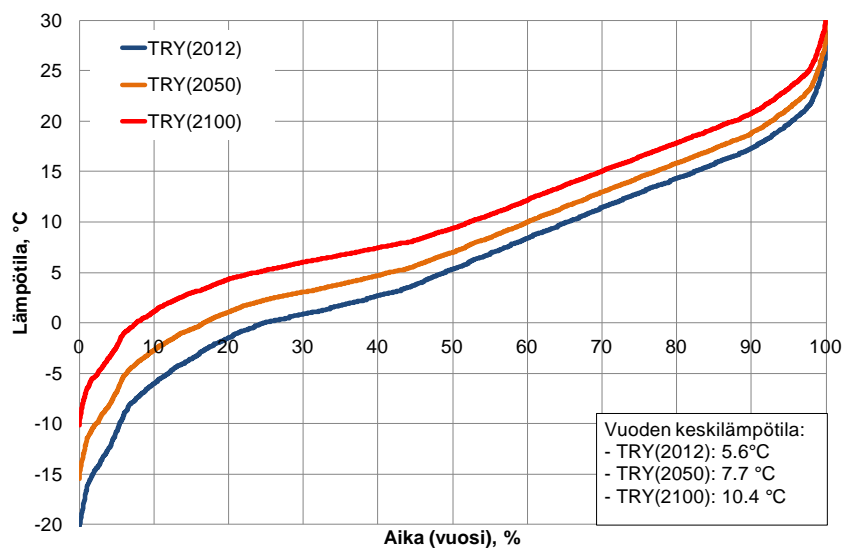
Tässä luvussa esitettävät energia- ja sisäilman olosuhteiden mallinnustulokset on laskettu REFI-A -hankkeessa (Jylhä et al. 2011a) määritettyjen energialaskennan testivuosien avulla. REFI-A -hankkeessa määritettiin Suomen nykyilmastoa kuvaava energialaskennan tunnit­tainen testivuosi kullekin Suomen ilmastovyöhykkeelle I–IV käyttäen vuosien 1980–2009 säähavaintoaineistoa. Nykyilmaston testivuoden kuukaudet valittiin havaintoaineistosta standardoidun valintamenetelmän (SFS-EN ISO 15927-4 2005) avulla siten, että kuukausien valinnassa painotettiin lisäksi rakennusten lämmitys- ja jäähdytystarpeen kannalta merkittävimpää sääsuureita, joita ovat lämpötila ja auringonsäteily. Valittujen kuukausien sääsuureiden keskiarvot ja keskihajonnat vastaavat mahdollisimman tarkasti 30 v. havaintoaineistossa esiintyneiden kuukausien keskiarvoa ja keskihajontaa, joten koostettu nykyilmaston testivuosi TRY 2012 kuvaa mahdollisimman tarkasti keskimääräisiä nykyilmaston sääoloja. Testivuoden valintamenetelmä on esitetty tarkemmin julkaisuissa SFS-EN ISO 15927-4 (2005), Jylhä et al. (2011a) ja Kalamees et al. (2012). Valittua testivuotta käytetään myös RakMK D3 (2012) mukaisessa rakennusten energialaskennassa.

Ilmatieteen laitos tutki REFI-B hankkeessa lukuisten ilmastomallien avulla (Jylhä et al. 2011a), kuinka ilmastonmuutos vaikuttaa nykyilmaston testivuoden TRY 2012 sääsuureisiin vuoteen 2050 ja 2100 mennessä, mikäli A2-kasvihuonekaasuskenaario toteutuu. Tässä luvussa esitettävät vuosien 2050 ja 2100 mallinnustulokset on laskettu käyttäen REFI-B hankkeessa määritettyjä tulevaisuuden tunnit­taisia testivuosia TRY 2050 ja TRY 2100. Nämä testivuodet on ladattavissa Ilmatieteen laitoksen [www-sivuilta](http://www.sivuilta) (Rakennusten energialaskennan ilmastolliset testivuodet 2013).

Energiankulutukseen liittyvät mallinnustulokset on laskettu Vantaan testivuosilla, jotka soveltuvat Suomen ilmastovyöhykkeiden I–II rakennusten lämmitys- ja jäähdytysenergiantarpeen laskentaan (Jylhä et al. 2011a). Ilmastovyöhykkeillä I ja II sijaitsee 75 % Suomen rakennuskannasta, joten esitettäviä tuloksia voidaan hyödyntää laajasti suomalaisten rakennusten suunnittelussa. Tässä tutkimuksessa pyrittiin tutkimaan erityisesti

rakennusten jäähdytystarpeen kannalta kriittisintä tilannetta ja jäähdytystarpeen lisääntymisen vaikutuksia. Rakennusten jäähdytystarve on Etelä-Suomessa suurempi ja lämmitystarve pienempi kuin muualla Suomessa, joten Vantaan testivuodet valittiin sen vuoksi tähän tutkimukseen. Esimerkiksi Vantaalla rakennusten jäähdytystarve on hieman yli 20 % suurempi ja lämmitystarve hiukan alle 20 % pienempi kuin Jyväskylässä, joka edustaa Suomen III ilmastovyöhykettä.

Kuvassa 8.1.1 on esillä Vantaan testivuoden ulkolämpötilan pysyvyyskäyrät sekä vuoden keskilämpötilat nykyisessä sekä tulevaisuuden ilmastossa. Kuvasta havaitaan, että matalimmat talven ulkolämpötilat nousevat selvästi enemmän kuin kesäaikaisten lämpötilat, mikäli A2-kasvihuonekaasuskenaario toteutuu.



Kuva 8.1.1 Vantaan testivuosien TRY 2012, TRY 2050 ja TRY 2100 ulkolämpötilan pysyvyyskäyrät.

8.1.2 Laskentamenetelmä

Mallinnustulokset on laskettu dynaamisella IDA-ICE 4 simulointiohjelmalla (Equa Simulation 2013). Ohjelmalla voidaan tutkia esimerkiksi rakennusten lämpö- ja kosteusoloja, lämmitys- ja jäähdytystarvetta sekä taloteknisten järjestelmien energiankäyttöä. Laskennassa otetaan yksityiskohtaisesti huomioon mm. sääolot (auringonsäteily, tuulen suunta ja nopeus jne.), ikkunoiden sekä erilaisten auringon varjostusratkaisujen vaikutukset, rakennuksen sisäiset lämpö- ja kosteuskuormat, rakennuksen vuotoilmanvaihto sekä koneellinen ilmanvaihto, tilojen painesuhteet sekä tilojen väliset ilmavirtaukset ja rakenteiden termisen massan vaikutukset rakennuksen lämpöoloihin ja lämmitys- ja jäähdytystarpeeseen.

IDA-ICE simulointiohjelman luotettavuutta on tutkittu lukuisissa validointitutkimuksissa, esimerkiksi Moinard & Guyon (1999), Travesi et al. (2001), Achermann & Zweifel (2003) ja Woloszyn & Rode (2008b).

8.1.3 Tutkitut rakennustyyppit

Tutkimuksessa simuloitiin kolme eri rakennustyyppiä: Pientalo, kerrostalo ja toimisto. Simulointikohteena käytetty pientalo on yksikerroksinen ja sen lämmitetty nettoala on 134 m². Mallinnetussa kerrostalossa on 3 asuinkerrosta sekä kellarikerros ja talon lämmitetty nettoala on kaikkiaan 1627 m². Mallinnetussa toimistorakennuksessa on neljä toimistokäytössä olevaa kerrosta sekä kellarikerros ja talon lämmitetty nettoala on kaikkiaan 5390 m².



Kuva 8.1.2 Pientalon ja toimistorakennuksen mallinnuskohteet.

Rakennusten laskentamallien suuntaus valittiin siten, että jäähdytystarve on suurimmillaan ja lämmitystarve pienimmillään auringonsäteilystä johtuen, koska tutkimuksessa keskityttiin jäähdytystarpeen kannalta kriittisimpään tilanteeseen. Eniten ikkunoita sisältävät julkisivut suunnattiin sen vuoksi länteen jokaisessa rakennustyyppissä. Ikkunoiden kokonaispinta-ala on pientalossa 20 %, kerrostalossa 16 % ja toimistossa 18 % lämmitetystä nettoalasta.

Laskennassa rakennuksissa oleskelevien ihmisten, kuluttajalaitteiden ja valaistuksen tiloihin luovuttamat lämpökuormat vastasivat RakMK D3 (2012) määrittämää päivittäistä (kWh/d) ja vuotuista (kWh/v) tasoa. Laskennassa henkilöiden tunnitaiset läsnäolo-profiilit sekä laitteiden ja valaistuksen käyttöprofiilit valittiin kuitenkin niin, että ne vastaavat asuinrakennusten tapauksessa työssäkäyvien perheiden tyyppillistä käyttöä ja toimistorakennuksessa normaalia työaika.

Asuinrakennuksissa lämmöntalteenotolla varustettu koneellinen ilmanvaihto on käytössä jatkuvasti, mutta toimistorakennuksessa rakennuksen käytön aikainen ilmanvaihto on päällä vain arkisin klo 6–21 ja muina aikoina perusilmanvaihto hoidetaan sosiaalityötilojen erillispoistojen kautta. Koneellisesti jäähdytetyissä asuinrakennuksissa jäähdytys on käytössä aina tarpeen mukaan, mutta toimistorakennuksessa koneellista jäähdytystä käytetään tarpeen mukaan vain arkisin klo 6–21 välisenä aikana.

Kaikissa laskentatapauksissa kesäaikaisten (1.6–31.8) sisälämpötilojen tavoitetaso on asuinrakennuksissa 27 °C ja toimistossa 25 °C RakMK D3 (2012) mukaisesti. Muina aikoina kaikkien rakennustyyppien sisälämpötilan maksimitasoksi valittiin 24 °C.

Kaikki rakennukset ovat jatkuvasti lämmitettyjä ja tilojen lämmityksen asetusarvo on kaikissa asuin- ja toimistotiloissa 21 °C.

8.2 Rakennusten lämmöneristystaso

Tässä luvussa esitetään simulointitulokset vaipan lämmöneristystason sekä ilmastonmuutoksen vaikutuksista tutkittujen rakennustyyppien jäähdytys- ja lämmitysenergian nettotarpeeseen, ostoenergiankulutukseen sekä RakMK D3 (2012) mukaiseen kokonaisenergiankulutukseen (E-luku).

8.2.1 Laskennan lähtötiedot

Taulukossa 8.2.1 on esillä luvussa 8.2.2 esitettävien laskentatapausten lämmöneristystasot (A-E). Tapaukset laskettiin RakMK C3 (2007) mukaisesta lämmöneristystason normitasosta lähtien RIL 249 (2009) määrittämälle passiivirakenteiden lämmöneristystasolle asti. Koska tapauksilla tutkittiin vain ulkoseinän, yläpohjan ja alapohjan lämmöneristystason vaikutuksia, käytettiin kaikissa luvussa 8.2.2 esitetyissä laskentatapauksissa samoja MSE-ikkunoita (U-arvo 1,0 W/(m²K), g (auringonsäteilyn kokonaisläpäisykerroin) = 0,56, ST (suoran auringonsäteilyn läpäisykerroin) = 0,44) ja vaipan ilmanvuotoluku n₅₀ oli kaikissa tapauksissa 1,0 1/h. Tutkituissa toimistorakennuksen tapauksissa alapohjan lämmöneristystason vaikutusta ei otettu huomioon, koska toimiston laskentamalliin ei otettu mukaan rakennuksen alinta kerrosta, joka on puolilämmintä tilaa.

Taulukko 8.2.1 Rakenteiden U-arvot eri laskentatapauksissa.

Lämmöneristystaso	U-arvo, W/(m ² K)			Lämmöneristystason valintaperuste
	US	YP	AP	
<i>Pientalo</i>				
A	0,24	0,15	0,24	RakMK C3 (2007) normitaso
B	0,17	0,09	0,16	RakMK C3 (2010) normitaso
C	0,12	0,08	0,12	Matalaenergiapientalo (RIL 249 2009)
D	0,08	0,07	0,10	Passiivipientalo (RIL 249 2009)
<i>Kerrostalo ja toimisto</i> ¹				
A	0,24	0,15	0,24	RakMK C3 (2007) normitaso
B	0,17	0,09	0,16	RakMK C3 (2010) normitaso
C	0,14	0,08	0,12	Matalaenergiakerrostalo (RIL 249 2009)
D	0,12	0,08	0,10	Passiivikerrostalo (RIL 249 2009)
E	0,08	0,07	0,10	Passiivipientalo (RIL 249 2009)

¹ Toimistossa vain US ja YP:n lämmöneristystasot on otettu huomioon.

Luvussa 8.2.2 esitettävissä laskentatapauksissa kaikkien asuinrakennusten ilmanvaihdon tuloilman lämmöntalteenoton lämpötilasuhde on 60 % riippumatta vaipan lämmöneristystasosta ja vastaavasti kaikkien toimistorakennuksen tapauksen lämpötilasuhde on 80 %.

Taulukossa 8.2.2 on esillä luvussa 8.2.2 esitettävien laskentatapausten vaihtoehtoiset lämmitys- ja jäähdytystavat. Maalämpöpumpun (MLP) vuotuinen lämpökerroin (SPF-luku) on tutkituissa laskentatapauksissa 3.1. Jäähdytysvaihtoehdoissa I ja III passiivisia sekä vapaajäähdytysratkaisuja käytetään ensisijaisesti ja koneellista jäähdytystä käytetään vasta siinä tilanteessa, mikäli passiivinen jäähdytys ei yksin riitä saavuttamaan sisälämpötilan asetusarvoa. Tässä luvussa pientalon ja kerrostalon passiivisina jäähdytysratkaisuina käytetään uloimmassa ikkunavälissä olevia sälekaihtimia sekä vapaajäähdytysratkaisuna tarpeenmukaista ikkunatuuletusta. Yksinkertaisuuden vuoksi molempia jäähdytystapoja kutsutaan tässä luvussa passiivisiksi jäähdytysratkaisuiksi. Toimistorakennuksessa passiivisena jäähdytysratkaisuna käytetään ikkunoiden ulkopuolisia sälekaihtimia. Kaikkia sälekaihdintyyppäjä ohjataan auringon säteilytason mukaan.

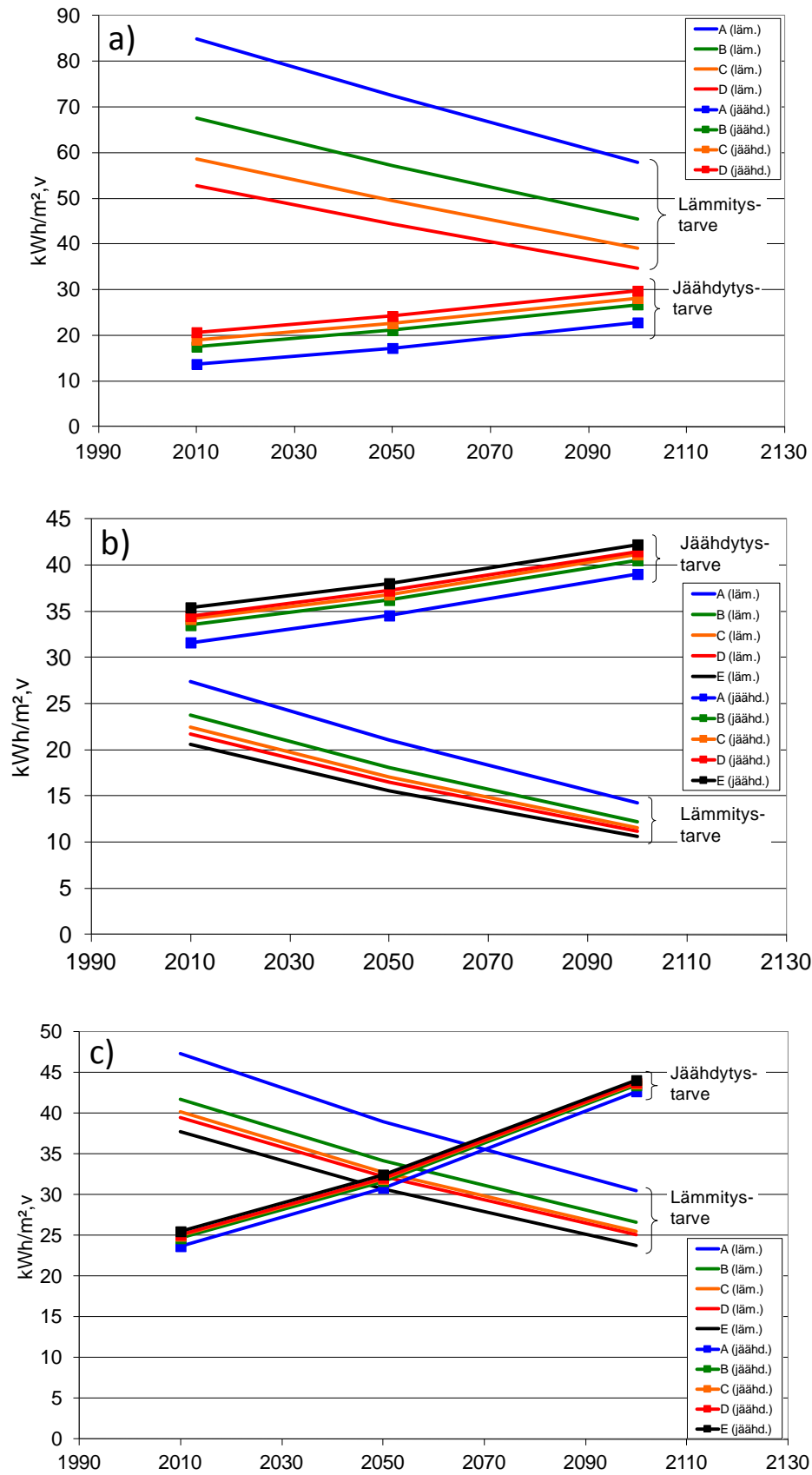
Jäähdytysvaihtoehdoissa II ja IV käytetään pelkästään koneellista jäähdytystä, kaukojäähdytystä tai maalämpöpumpulla varustetuissa rakennuksissa maapiirillä toteutettua vapaajäähdytystä. Pientalon ja kerrostalon koneellinen jäähdytys toteutetaan split-laitteilla, joiden vuotuinen kylmäkerroin on 3 ja toimiston koneellinen jäähdytys toteutetaan kompressorikylmälaitteella, jonka vuotuinen kylmäkerroin on 2,5. Maapiirillä toteutetun vapaajäähdytyksen vuotuinen kylmäkerroin on tutkituissa tapauksissa 30.

Taulukko 8.2.2 Lämmitys- ja jäähdytystavat eri laskentatapauksissa.

Rakennus	Lämmitys	Jäähdytys			
		I	II	III	IV
Pientalo	Vesikiertoinen sähkö	Passiivinen +kon. jäähdytys	Kon. jäähdytys	-	-
	MLP	Passiivinen + MLP vapaajäähdytys	MLP vapaajäähdytys	-	-
Kerrostalo	Kaukolämpö	Passiivinen +kon. jäähdytys	Kon. jäähdytys	-	-
	MLP	Passiivinen + MLP vapaajäähdytys	MLP vapaajäähdytys	-	-
Toimisto	Kaukolämpö	Passiivinen +kon. jäähdytys	Kon. jäähdytys	Passiivinen +kaukojäähdytys	Kaukojäähdytys
	MLP	Passiivinen + MLP vapaajäähdytys	MLP vapaajäähdytys	-	-

8.2.2 Tulokset

Kuvassa 8.2.1 on esillä ilmastomuutoksen sekä vaipan lämmöneristystason vaikutus pientalon, kerrostalon ja toimistorakennuksen tilojen ja ilmanvaihdon lämmitys- ja jäähdytysenergian nettotarpeeseen. Tulokset osoittavat, että simuloituissa rakennuksissa em. lämmityksen nettotarve vähenee 15–25 % vuoteen 2050 mennessä ja 30–50 % vuoteen 2100 mennessä mikäli A2-kasvihuonekaasuskenaario toteutuu. Vastaavasti jäähdytyksen nettotarve kasvaa 10–30 % vuoteen 2050 mennessä ja 20–75 % vuoteen 2100 mennessä.



Kuva 8.2.1

Pientalon (a), kerrostalon (b) ja toimistorakennuksen (c) tilojen ja ilmanvaihdon lämmitys- ja jäähdytysenergian nettotarve eri lämmöneristystasoilla A–E (ks. taulukko 8.2.1) ja testivuosilla TRY 2012, TRY 2050 ja TRY 2100 laskettuna.

Kuva 8.2.1 osoittaa myös, että lämmöneristyksen vaikutus lämmityksen nettotarpeeseen pienenee hieman ilmastomuutoksen vaikutuksesta vuoteen 2100 mennessä, koska ulkolämpötilojen ennustetaan nousevan ilmastomuutoksen myötä erityisesti lämmityskaudella (ks. kuva 8.1.1). Kuvasta 8.2.1 voidaan myös havaita, että rakennuksen jäähtymisen nettotarve kasvaa, kun vaipan lämmöneristystasoa lisätään tasoa A paremmaksi.

Taulukoissa 8.2.2–8.2.4 on esillä ilmastomuutoksen ja vaipan lämmöneristystason vaikutus tutkittujen rakennuksen tilojen lämmityksen ja jäähtymisen ostoenergiankulutukseen sekä RakMK D3 (2012) mukaisilla energiamuotojen kertoimilla laskettuun kokonaisenergiankulutukseen, eli E-lukuun. Taulukoissa lämmöneristyksen vertailutasoksi on valittu RakMK C3 (2010) mukainen normitaso B (ks. taulukko 8.2.1), jolloin ostoenergian- ja kokonaisenergiensäästöt on laskettu B-tason suhteen. Tulokset on laskettu luvussa 8.2.1 ja taulukossa 8.2.2 esitetyillä vaihtoehtoisilla lämmitys- ja jäähtytystavoilla.

Taulukko 8.2.2 Pientalon vaipan lämmöneristystasojen A–D (ks. taulukko 8.2.1) vaikutus tilojen lämmityksen ja jäähtymisen ostoenergiankulutukseen sekä rakennuksen E-lukuun. Vaikutus E-lukuun on esitetty sulkeissa.

Vuosi	Lämmöneristystaso	Energiansäästö RakMK C3 (2010) normitasoon (B) verrattuna, kWh/(m ² a)			
		Vesikiertoinen sähkölämmitys Jäähtytystavat		MLP-lämmitys Jäähtytystavat	
		I Passiivinen- ja kon. jäähtytys	II Kon. jäähtytys	I Passiivinen- ja MLP- vapaajäähtytys	II MLP-vapaajäähtytys
2012	A	-20,7 (-35,2)	-18,2 (-31,0)	-7,1 (-12,1)	-6,5 (-11,1)
	B (ref.)	0,0	0,0	0,0	0,0
	C	10,3 (17,5)	9,4 (16,0)	3,5 (6,0)	3,3 (5,7)
	D	17,3 (29,4)	15,4 (26,3)	5,9 (10,1)	5,5 (9,4)
2050	A	-17,8 (-30,3)	-15,8 (-26,8)	-6,1 (-10,4)	-5,7 (-9,7)
	B (ref.)	0,0	0,0	0,0	0,0
	C	9,1 (15,4)	8,1 (13,8)	3,1 (5,3)	2,9 (4,9)
	D	15,1 (25,7)	13,3 (22,7)	5,2 (8,8)	4,8 (8,2)
2100	A	-14,5 (-24,6)	-12,6 (-21,4)	-5,0 (-8,5)	-4,6 (-7,9)
	B (ref.)	0,0	0,0	0,0	0,0
	C	7,5 (12,8)	6,8 (11,6)	2,6 (4,4)	2,4 (4,2)
	D	12,4 (21,1)	11,1 (18,8)	4,3 (7,3)	4,0 (6,9)

Taulukon 8.2.2 tulokset osoittavat, että nykyisissä ilmasto-oloissa tutkitun pientalon vuotuista ostoenergiankulutusta on mahdollista vähentää 5,5–17,3 kWh/(m²a) käytetystä lämmitys- ja jäähtytystavasta riippuen parantamalla vaipan lämmöneristystä tasosta B tasolle D. Tulokset osoittavat, että lämmitysjärjestelmän suorituskyky vaikuttaa merkittävästi vaipan lisälämmöneristämällä saavutettavaan energiansäästöön. Tutkituissa maalämpöpumpulla varustetuissa tapauksissa lisäeristämisen tuoma ostoenergiensäästö on keskimäärin 65 % pienempi kuin vesikiertoisella sähkölämmityksellä varustetuissa tapauksissa.

Vaipan lisälämmöneristämällä saavutettava ostoenergiensäästö pienenee hieman nykyisestä tasosta, mikäli A2-kasvihuonekaasuskenaario toteutuu. Vuonna 2050 lisäeristäminen tasosta B tasolle D tuottaa 0,7–2,2 kWh/(m²a) vähemmän ostoenergiensäästöä käytetystä lämmitys- ja jäähdytystavasta riippuen nykyisiin ilmasto-oloihin verrattuna tai vastaavasti vuonna 2100 saavutettava ostoenergiensäästö on 1,5–4,9 kWh/(m²a) nykyistä pienempi.

Mikäli pientalon jäähdytystarve katetaan ensisijaisesti passiivisilla jäähdytysratkaisuilla, on vaipan lisäeristämisen tuoma ostoenergiensäästö tutkituissa tapauksissa hieman suurempi (max. 1,8 kWh/(m²a) kuin tapauksissa, joissa jäähdytystarve katetaan pelkästään koneellisella jäähdytyksellä.

Pientalon lisäeristämällä saavutettava kokonaisenergiensäästö on 1,7-kertainen ostoenergiensäästöön verrattuna, koska tutkitun rakennuksen lämmityksen, koneellisen jäähdytyksen sekä vapaajäähdytyksen ostoenergia on pelkästään sähköä. Vertailukelpoisuuden vuoksi kaikkien laskentatapausten kokonaisenergiensäästö (myös vuodet 2050 ja 2100) on laskettu RakMK D3 (2012) mukaisilla energiamuotojen kertoimilla.

Taulukko 8.2.3 Kerrostalon vaipan lämmöneristystasojen A–E (ks. taulukko 8.2.1) vaikutus tilojen lämmityksen ja jäähdytyksen ostoenergiankulutukseen sekä rakennuksen E-lukuun. Vaikutus E-lukuun on esitetty sulkeissa.

Vuosi	Lämmöneristystaso	Energiensäästö RakMK C3 (2010) normitasoon (B) verrattuna, kWh/(m ² a)			
		Kaukolämpö Jäähdytystavat		MLP-lämmitys Jäähdytystavat	
		I Passiivinen- ja kon. jäähdytys	II Kon. jäähdytys	I Passiivinen- ja MLP- vapaajäähdytys	II MLP-vapaajäähdytys
2012	A	-3,7 (-2,5)	-3,2 (-1,6)	-1,3 (-2,2)	-1,2 (-2,1)
	B (ref.)	0,0	0,0	0,0	0,0
	C	1,2 (0,8)	1,1 (0,5)	0,4 (0,7)	0,4 (0,7)
	D	1,9 (1,3)	1,6 (0,8)	0,7 (1,1)	0,6 (1,1)
	E	3,0 (2,0)	2,4 (1,0)	1,0 (1,8)	1,0 (1,7)
2050	A	-2,9 (-1,9)	-2,4 (-1,1)	-1,0 (-1,7)	-1,0 (-1,6)
	B (ref.)	0,0	0,0	0,0	0,0
	C	0,9 (0,6)	0,8 (0,4)	0,3 (0,6)	0,3 (0,5)
	D	1,4 (0,9)	1,2 (0,5)	0,5 (0,9)	0,5 (0,8)
	E	2,2 (1,4)	1,7 (0,6)	0,8 (1,3)	0,7 (1,2)
2100	A	-1,9 (-1,2)	-1,5 (-0,5)	-0,7 (-1,2)	-0,6 (-1,1)
	B (ref.)	0,0	0,0	0,0	0,0
	C	0,6 (0,3)	0,4 (0,1)	0,2 (0,4)	0,2 (0,3)
	D	0,9 (0,5)	0,6 (0,1)	0,3 (0,5)	0,3 (0,5)
	E	1,2 (0,7)	0,8 (0,0)	0,5 (0,8)	0,4 (0,7)

Taulukon 8.2.3 tulokset osoittavat, että nykyisissä ilmasto-oloissa tutkitun kerrostalon vuotuista ostoenergiankulutusta on mahdollista vähentää 0,6–1,9 kWh/(m²a) käytetystä lämmitys- ja jäähdytystavasta riippuen parantamalla vaipan lämmöneristystä tasosta B tasolle D. Mikäli tutkittuja vaipan osia lisäeristetään pientalon passiivitasoa vastaavalle tasolle E,

ostoenergiankulutus vähenee enimmillään 3 kWh/(m²a). Kerrostalon lisäeristämällä tasolle D asti saavutettava kokonaisenergiänsäästö on enimmillään 2 kWh/(m²a).

Tutkituissa maalämpöpumpulla varustetuissa tapauksissa lisäeristämisen tuoma ostoenergiänsäästö on keskimäärin 61 % pienempi kuin kaukolämmöllä varustetuissa tapauksissa.

Mikäli A2-kasvihuonekaasuskenaario toteutuu, vuonna 2050 lisäeristäminen tasosta B tasolle D tuottaa 0,2–0,5 kWh/(m²a) vähemmän ostoenergiänsäästöä käytetystä lämmitys- ja jäähdytystavasta riippuen nykyisiin ilmasto-oloihin verrattuna tai vastaavasti vuonna 2100 saavutettava ostoenergiänsäästö on 0,3–1,1 kWh/(m²a) nykyistä pienempi.

Taulukon 8.2.3 tulosten perusteella voidaan todeta, että vaipan lisäeristäminen tasoa B paremmaksi vaikuttaa kerrostalon osto- ja kokonaisenergiänsäästöön erittäin vähän käytetyistä lämmitys- ja jäähdytystavoista riippumatta sekä nykyisessä että ennustetussa tulevaisuuden ilmastossa.

Taulukko 8.2.4 Toimistorakennuksen vaipan lämmöneristystasojen A–E (ks. taulukko 8.2.1) vaikutus tilojen lämmityksen ja jäähdytyksen ostoenergiänsäästöön sekä rakennuksen E-lukuun. Vaikutus E-lukuun on esitetty sulkeissa.

Vuosi	Lämmöneristystaso	Energiänsäästö RakMK C3 (2010) normitasoon (B) verrattuna, kWh/(m ² a)					
		Kaukolämpö Jäähdytystavat		MLP-lämmitys Jäähdytystavat		Kaukolämpö Jäähdytystavat	
		I Passiivinen- ja kon. jäähdytys	II Kon. jäähdytys	I Passiivinen- ja MLP- vapaa- jäähdytys	II MLP- vapaa- jäähdytys	III Passiivinen- ja kauko- jäähdytys	IV Kauko- jäähdytys
2012	A	-6,7 (-4,6)	-6,2 (-4,0)	-2,2 (-3,8)	-2,1 (-3,6)	-6,5 (-4,7)	-5,6 (-4,2)
	B (ref.)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	C	1,9 (1,3)	1,7 (1,1)	0,6 (1,1)	0,6 (1,0)	1,8 (1,3)	1,5 (1,2)
	D	2,7 (1,8)	2,5 (1,5)	0,9 (1,5)	0,8 (1,4)	2,6 (1,9)	2,2 (1,7)
	E	4,9 (3,3)	4,4 (2,7)	1,6 (2,7)	1,5 (2,6)	4,7 (3,4)	3,9 (3,0)
2050	A	-5,9 (-4,0)	-5,4 (-3,4)	-1,9 (-3,3)	-1,8 (-3,1)	-5,7 (-4,1)	-4,9 (-3,7)
	B (ref.)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	C	1,7 (1,1)	1,5 (0,9)	0,5 (0,9)	0,5 (0,9)	1,6 (1,1)	1,3 (1,0)
	D	2,3 (1,6)	2,1 (1,3)	0,8 (1,3)	0,7 (1,2)	2,2 (1,6)	1,9 (1,4)
	E	4,2 (2,8)	3,8 (2,3)	1,4 (2,4)	1,3 (2,2)	4,0 (2,9)	3,3 (2,5)
2100	A	-4,7 (-3,2)	-4,3 (-2,7)	-1,6 (-2,6)	-1,5 (-2,5)	-4,6 (-3,3)	-3,9 (-3,0)
	B (ref.)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	C	1,3 (0,8)	1,2 (0,8)	0,4 (0,7)	0,4 (0,7)	1,2 (0,9)	1,1 (0,8)
	D	1,9 (1,2)	1,7 (1,1)	0,6 (1,1)	0,6 (1,0)	1,8 (1,3)	1,5 (1,2)
	E	3,4 (2,2)	3,1 (1,9)	1,1 (1,9)	1,1 (1,8)	3,1 (2,3)	2,7 (2,1)

Taulukon 8.2.4 tulokset osoittavat, että nykyisissä ilmasto-oloissa tutkitun toimistorakennuksen vuotuista ostoenergiänsäästöä on mahdollista vähentää 0,8–2,7 kWh/(m²a) käytetystä lämmitys- ja jäähdytystavasta riippuen parantamalla vaipan

lämmöneristystä tasosta B tasolle D. Mikäli tutkittuja vaipan osia lisäeristetään pientalon passiivitasoa vastaavalle tasolle E, ostoenergiankulutus vähenee enimmillään 4,9 kWh/(m²a). Toimistorakennuksen lisäeristämällä tasolle D asti saavutettava kokonaisenergiesäästö on enimmillään 1,9 kWh/(m²a).

Tutkituissa maalämpöpumpulla varustetuissa tapauksissa lisäeristämisen tuoma ostoenergiesäästö on keskimäärin 67 % pienempi kuin kaukolämmöllä varustetuissa tapauksissa.

Mikäli A2-kasvihuonenkaasuskenaario toteutuu, vuonna 2050 lisäeristäminen tasosta B tasolle D tuottaa 0,1–0,4 kWh/(m²a) vähemmän ostoenergiesäästöä käytetystä lämmitys- ja jäähdytystavasta riippuen nykyisiin ilmasto-oloihin verrattuna tai vastaavasti vuonna 2100 saavutettava ostoenergiesäästö on 0,2–0,8 kWh/(m²a) nykyistä pienempi.

Taulukon 8.2.4 tulosten perusteella voidaan todeta, että vaipan lisäeristäminen tasoa B paremmaksi vaikuttaa toimistorakennuksen osto- ja kokonaisenergiankulutukseen erittäin vähän käytetyistä lämmitys- ja jäähdytystavoista riippumatta sekä nykyisessä että ennustetussa tulevaisuuden ilmastossa.

8.2.3 Yhteenveto

Tässä tutkimusosiossa selvitettiin vaipan lisäeristämisen sekä A2-kasvihuonekaasuskenaarion vaikutuksia pientalon, kerrostalon ja toimistorakennuksen lämmitys- ja jäähdytysenergian nettotarpeeseen, ostoenergiankulutukseen sekä D3 (2012) mukaiseen kokonaisenergiankulutukseen.

Tulokset osoittavat, että simuloituissa rakennuksissa tilojen ja ilmanvaihdon lämmityksen nettotarve vähenee 15–25 % vuoteen 2050 mennessä ja 30–50 % vuoteen 2100 mennessä ilmastonmuutosennusteen toteutuessa. Vastaavasti jäähdytyksen nettotarve kasvaa 10–30 % vuoteen 2050 mennessä ja 20–75 % vuoteen 2100 mennessä.

Tutkittujen vaipan osien (US, YP ja AP) lisäeristäminen RakMK C3 (2007) normitasoa paremmaksi lisää hieman tilojen jäähdytystarvetta. Rakennuksen jäähdytystarve tulee kattaa ensisijaisesti passiivisilla jäähdytysratkaisuilla, kuten parantamalla auringon varjostusta ja vasta tarvittaessa koneellisilla jäähdytysratkaisuilla.

On myös huomattava, että jäähdytyksen asetusarvon alentaminen kesäaikana tutkimuksesta käytetyistä arvoista (asuinrakennukset 27 °C ja toimistot 25 °C) lisää koneellisen jäähdytyksen tarvetta sitä enemmän, mitä matalampaa jäähdytyksen asetusarvoa käytetään. Tutkimuksessa tehtiin myös simulointeja, joissa jäähdytyksen asetusarvona käytettiin eri rakennustyypeissä kesäaikana 24 °C, mutta tällä asetusarvolla koneellisen jäähdytyksen vaikutus ostoenergiaan oli vielä pieni. Toisaalta lämpöolojen ja viihtyisyyden kannalta ei ole suositeltavaa alentaa kesäaikaista lämpötilaa tämän lämpötilan alapuolelle.

Tutkittujen kerrostalon ja toimiston vaipan osien lisäeristäminen RakMK C3 (2010) normitasoa paremmaksi ei ole kannattava energiansäästökeino, koska saavutettu energiansäästö on erittäin pieni. Tutkituissa tapauksissa kerrostalon ja toimistorakennuksen lisäeristäminen esimerkiksi 2010 normitasosta passiivitasolle (D) pienentää vuotuisia energiakustannuksia enimmillään vain 0,19 €/m²a) energian hinnan ollessa tyypillinen vuoden 2012 hintatason mukainen (kaukolämpö: 0,07 €/kWh ja sähkö 0,15 €/kWh) (Tilastokeskus 2012b). On täysin selvää, ettei lisäeristäminen ole tällöin taloudellisesti kannattavaa, kun lisäeristämisen investointikustannukset otetaan huomioon. Pientalossa vaipan lisäeristämällä saavutetaan selvästi enemmän energiansäästöä ja pientalon lisäeristämistä voidaan pitää yhtenä varteenotettavana energiansäästöratkaisuna. Tutkituissa tapauksissa pientalon lisäeristäminen 2010 normitasosta passiivitasolle pienentää vuotuisia energiakustannuksia enimmillään 2,60 €/m².

On syytä kuitenkin korostaa, että taloteknisillä järjestelmillä, kuten maalämpöpumpulla, voidaan saavuttaa merkittävästi suurempi energiansäästö jopa pientalossa, kuin parantamalla tutkittujen vaipan osien lämmöneristystä RakMK C3 (2010) normitasoa paremmaksi. Saari et al. (2010) ovat laskeneet FRAME-hankkeessa tutkittujen rakennusten elinkaarikustannukset RakMK C3 (2010) mukaisen normitason sekä passiivitason suunnitteluratkaisuisissa. Tulokset osoittivat, että kerrostalon ja toimiston passiivitaso suunnitteluratkaisut eivät ole taloudellisesti kannattavia suhteessa 2010 normitasoon. Saari et al. (2010) osoittivat, että sähkölämmitteisen passiivipientalon takaisinmaksuaika suhteessa 2010 normitason mukaiseen pientaloon vaihtelee 17–27 vuoden välillä lämmitystavasta riippuen sähkön reaalihinnan ollessa 0,15 €/kWh.

Tässä tutkimuksessa selvitettiin vaipan osien (US, YP ja AP) vaikutusta rakennuksen energiankulutukseen, koska tavoitteena oli selvittää, mikä on näiden vaipan osien lämmöneristämisen merkitys rakennusten energiatehokkuuteen. On syytä korostaa, että ikkunoiden lämmöneristystasolla ja auringonsäteilyn läpäisevyydellä on merkittävä vaikutus rakennusten lämmitys- ja jäähdytystarpeeseen ikkunoiden pinta-alasta ja suuntauksesta riippuen.

Saari et al. (2010) osoittivat, että uudiskerrostalon koko vaipan lämmöneristystason parantaminen RakMK C3 (2010) mukaisesta normitasosta passiivitasolle, ilmanvaihdon lämmöntalteenoton hyötysuhteen (tuloilman lämpötilahyötysuhde) parantaminen 55 %:sta 80 %:iin sekä vaipan ilmanvuotoluvun n_{50} parantaminen 1,0 1/h:sta 0,6 1/h:een säästää ostoenergiaa kaikkiaan 30 kWh/(m²a), joten ikkunoiden lämmöneristystason ja lämmöntalteenoton hyötysuhteen ja ilmanpitävyyden parantamisella on keskeinen vaikutus rakennusten energiankulutukseen. Jokisalo et al. (2009) osoittivat myös, että tyypillisen suomalaisen pientalon tilojen ja ilmanvaihdon lämmitysenergian kulutus kasvaa tyypillisesti 4–12 % jokaista ilmanvuotoluvun n_{50} 1/h yksikön lisäystä kohden.

8.3 Rakennusten terminen massa

Tässä luvussa esitetään simulointitulokset rakennusten termisen massan vaikutuksista tutkittujen rakennustyyppien jäähdytys- ja lämmitysenergian nettotarpeeseen sekä ostoenergiankulukseen ottaen huomioon ilmastonmuutoksen, vaipan lämmöneristystason ja tehostetun yötuuletuksen vaikutukset.

8.3.1 Laskennan lähtötiedot

Taulukossa 8.3.1 on esillä simuloidun pientalon, kerrostalon sekä toimistorakennuksen (ks. luku 8.1.3) sisäpuolisen tehollisen lämpökapasiteetin $C_{b,eff}$ arvot sekä kevytrakenteisissa (LW) että raskarakenteisissa (M) tapauksissa laskettuna standardin SFS EN ISO 13786 (2008) mukaisesti. Tapauksien rakenteet on valittu siten, että tutkittujen tapauksien tehollisen lämpökapasiteetin arvot vastaavat mahdollisimman hyvin RakMK D5 (2012) mukaisia ohjearvoja.

Taulukko 8.3.1 Simuloitujen rakennusten sisäpuolinen tehollinen lämpökapasiteetti sekä RakMK D5 (2012) mukaiset ohjearvot.

Rakennus	Rakenne	Rakenteiden kuvaus	Sisäp. tehollinen lämpökapasiteetti $C_{b,eff}$, Wh/(m ² K)	
			FRAME tutkimus	D5 (2012)
Pientalo	LW (kevyt)	US, VS, YP ja AP kevyitä rankarakenteita - US ja YP sisäpinnalla 2-k. kipsilevy - Kantavissa VS:ssä 2-k. kipsilevy	33	40
	M (raskas)	US, VS, YP, AP betonirakenteisia	194	200
Kerrostalo	LW (kevyt)	US, VS, YP ja AP kevyitä rankarakenteita - US ja YP sisäpinnalla 2-k. kipsilevy - Huoneistojen välisissä VS:ssä 2-k. kipsilevy VP (50mm lattiatasoite) + alapinnalla 2-k. kipsilevy	40	40
	M (raskas)	US, VS, YP, VP ja AP betonirakenteisia	200	220
Toimisto ¹	LW (kevyt)	US, VS, YP kevyitä rankarakenteita - US ja YP sisäp. 2-k. kipsilevy - VS 2-k. kipsilevy VP ontelolaatta + alapinnalla 2-k. kipsilevy	67	70
	M (raskas)	US, VS, YP, VP betonirakenteisia	158	160

¹ Toimistossa vain US:n ja YP:n lämmöneristys on otettu huomioon.

Taulukossa 8.3.2 on esillä luvussa 8.3.2 esitettävien laskentatapausten ulkoseinien, yläpohjan, alapohjan sekä ikkunoiden lämmöneristystasot sekä ikkunoiden auringonsäteilyn läpäisyominaisuudet. Tapaukset laskettiin RakMK C3 (2007) mukaisella lämmöneristystason normitasolla sekä RIL 249 (2009) määrittämällä pientalon ja kerrostalon passiivirakenteiden lämmöneristystasolla. Vaipan ilmanvuotoluku n_{50} on kaikissa tapauksissa 0,6 1/h.

Taulukko 8.3.2 Laskentatapausten lämmöneristystaso ja ikkunoiden auringonsäteilyn läpäisyominaisuudet.

Lämmöneristystaso	U-arvo, W/(m ² K)				Lämmöneristystason valintaperuste
	US	YP	AP	IKK	
<i>Pientalo</i>					
A	0,24	0,15	0,19	1,4 ¹	RakMK C3 (2007) normitaso
D	0,08	0,07	0,08	0,8 ²	Passiivipientalo (RIL 249 2009)
<i>Kerrostalo ja toimisto</i>					
A	0,24	0,15	0,19	1,4 ¹	RakMK C3 (2007) normitaso
D	0,12	0,08	0,10	0,8 ²	Passiivikerrostalo (RIL 249 2009)

Ikkunoiden auringonsäteilyn läpäisyominaisuudet: ¹(g=0,63 ja ST=0,52) ja ²(g=0,56 ja ST=0,44)

Simuloitujen tapauksien lämmitysvaihtoehtoina käytetään kaikkia taulukossa 8.2.2 esitettyjä lämmitystapoja ja jäähdytysvaihtoehtoina taulukossa nimettyjä jäähdytystapoja II. Käytettyjen lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien suorituskyky on sama kuin luvussa 8.2.1 esitetyillä järjestelmillä. Tutkituissa tapauksissa ei käytetä mitään passiivisia jäähdytysratkaisuja, kuten sälekaihtimia.

Tutkittujen tapauksien perusilmanvaihtoratkaisuina käytettiin luvussa 8.1.3 esitettyjä ratkaisuja, joiden yhteydessä ei käytetä ikkunatuuletusta tai tehostettua tarpeenmukaista koneellista ilmanvaihtoa. Tehostetun yötuuletuksen vaikutusta rakenteiden termisen massan energiatekniseen toimintaan tutkittiin erillisissä tapauksissa, joissa pientalo ja kerrostalo varustettiin tarpeenmukaisella yöaikaisella ikkunatuuletuksella ja toimistorakennus tarpeenmukaisella tehostetulla koneellisella yötuuletuksella. Asuinrakennuksissa tuuletusikkunoita pidettiin auki klo 21–07 välisenä aikana, mikäli tilojen sisälämpötila oli yli 24 °C ja ulkoilman lämpötila oli matalampi kuin sisälämpötila. Toimistorakennuksessa sisätiloihin puhallettiin IV-järjestelmän kautta suodatettua ulkoilmaa 2-kertaisilla ilmavirroilla kevästä syksyyn (1.4–15.10) arkisin klo 22–5:50 välisenä aikana, mikäli sisäilman lämpötila oli yli 24 °C ja ulkoilman lämpötila oli yli 12 °C ja 2 °C kylmempää kuin sisäilma. Toimistorakennuksen ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähköteho (SFP-luku) on RakMK D3 (2012) määräyksen mukainen (1,9 kW/(m³·s)).

8.3.2 Tulokset

Taulukoissa 8.3.1–8.3.3 on esillä rakenteiden termisen massan vaikutus pientalon, kerrostalon ja toimistorakennuksen tilojen lämmitys- ja jäähdytysenergian nettotarpeeseen sekä ostoenergiankulutukseen eri vaihtoehtoisilla lämmitys- ja jäädytysratkaisuilla. Taulukoissa on esitetty, kuinka ilmastonmuutos, vaipan lämmöneristystaso sekä tehostettu yötuuletus vaikuttavat termisen massan vaikutukseen. Termisen massan vaikutuksella tarkoitetaan kevyt- ja raskasrakenteisen tapauksen välistä eroa, kun vertailutasona ovat kevytrakenteisen rakennuksen tulokset.

Taulukko 8.3.1 Termisen massan vaikutus pientalossa tilojen lämmitys- ja jäähdytysenergian nettotarpeeseen sekä ostoenergiankulutukseen.

Vuosi	Tehostettu yötuuletus (K/E)	Termisen massan (LW vs. M) vaikutus							
		Muutos, %		Ostoenergian säästö, kWh/(m ² a)					
		Tilojen lämmitys tarve	Tilojen jäähdytys tarve	Vesik. sähkölämmitys + kon. jäähdytys			MLP-lämmitys + vapaajäähdytys (MLP)		
				Tilojen lämmitys	Tilojen jäähdytys	Yht.	Tilojen lämmitys	Tilojen jäähdytys	Yht.
<i>Lämmöneristys: RakMK C3 (2007) (A)</i>									
2012	E	-3,0	-21,2	2,6	1,3	3,9	0,9	0,1	1,0
2050	E	-3,0	-15,6	2,2	1,2	3,4	0,8	0,1	0,9
2100	E	-2,8	-9,3	1,7	0,9	2,6	0,6	0,1	0,7
<i>Lämmöneristys: Passiivi (RIL 249 2009) (D)</i>									
2012	E	-2,5	-9,2	1,1	0,6	1,6	0,4	0,1	0,4
2050	E	-2,8	-6,7	1,0	0,5	1,5	0,3	0,0	0,4
2100	E	-3,2	-3,6	0,9	0,3	1,3	0,3	0,0	0,4
<i>Lämmöneristys: Passiivi (RIL 249 2009) (D)</i>									
2012	K	-2,5	-42,3	1,0	1,7	2,7	0,4	0,2	0,5
2050	K	-2,8	-38,7	1,0	1,8	2,8	0,3	0,2	0,5
2100	K	-3,2	-33,6	0,9	2,0	3,0	0,3	0,2	0,5

Taulukon 8.3.1 tulokset osoittavat, että tutkitun raskarakenteisen pientalon tilojen lämmityksen nettotarve on nykyisissä ilmasto-oloissa parhaimmillaan 3 % pienempi ja tilojen jäähdytyksen nettotarve vastaavasti 9–42 % pienempi kuin kevytrakenteisella rakennuksella riippuen vaipan lämmöneristystasosta sekä siitä, käytetäänkö tehostettua yötuuletusta.

Raskarakenteisen pientalon tilojen lämmityksen ja jäähdytyksen yhteenlaskettu vuotuinen ostoenergiankulutus on enimmillään 3,9 kWh/(m²a) pienempi kuin kevytrakenteisen rakennuksen, kun käytetään vesikiertoista sähkölämmitystä. Maalämpöpumppulämmityksellä sekä maapiirillä toteutetulla vapaajäähdytyksellä voidaan tutkituissa tapauksissa säästää ostoenergiaa enimmillään 1 kWh/(m²a). Termisen massan aiheuttama ostoenergiesäästö tulee ilmastonmuutoksen vaikutuksesta hieman pienemmään, ellei rakennuksessa hyödynnetä tehostettua yötuuletusta. Mikäli tehostettua yötuuletusta käytetään, termisen massan tuoma ostoenergiesäästö tulee ilmastonmuutoksen myötä hieman kasvamaan ja termisen massan vaikutus on enimmillään 1,7–2,3 kertaa suurempi kuin tapauksissa, joissa tehostettua yötuuletusta ei käytetä.

Kaikkiaan raskarakenteisen pientalon kokonaisostoenergiankulutus on tutkituissa tapauksissa 0,6–3 % pienempi kuin kevytrakenteisen pientalon. Kokonaisostoenergiankulutus sisältää kaikki rakennuksen lämmitykseen (tilat, ilmanvaihto, käyttövesi) ja jäähdytykseen kuluvan ostoenergian sekä LVI-apulaitteiden, huonelaitteiden ja valaistuksen sähkönkulutuksen.

Taulukko 8.3.2 Termisen massan vaikutus kerrostalossa tilojen lämmitys- ja jäähdytysenergian nettotarpeeseen sekä ostoenergiankulutukseen.

Vuosi	Tehostettu yötuuletus (K/E)	Termisen massan (LW vs. M) vaikutus							
		Muutos, %		Ostoenergian säästö, kWh/(m ² a)					
		Tilojen lämmitys tarve	Tilojen jäähdytys tarve	Kaukolämpö + kon. jäähdytys		Yht.	MLP-lämmitys + vapaajäähdytys (MLP)		Yht.
		Tilojen lämmitys	Tilojen jäähdytys	Tilojen lämmitys	Tilojen jäähdytys				
<i>Lämmöneristys: RakMK C3 (2007) (A)</i>									
2012	E	-4,8	-6,1	0,87	0,72	1,6	0,30	0,07	0,4
2050	E	-5,3	-5,0	0,76	0,64	1,4	0,26	0,06	0,3
2100	E	-6,5	-3,6	0,66	0,51	1,2	0,22	0,05	0,3
<i>Lämmöneristys: Passiivi (RIL 249 2009) (D)</i>									
2012	E	-10,2	-4,9	0,76	0,54	1,3	0,26	0,05	0,3
2050	E	-11,0	-4,3	0,68	0,50	1,2	0,23	0,05	0,3
2100	E	-11,6	-3,6	0,57	0,47	1,0	0,20	0,05	0,2
<i>Lämmöneristys: Passiivi (RIL 249 2009) (D)</i>									
2012	K	-10,1	-30,5	0,75	2,23	3,0	0,25	0,22	0,5
2050	K	-10,8	-29,0	0,67	2,34	3,0	0,23	0,23	0,5
2100	K	-11,6	-26,0	0,58	2,42	3,0	0,20	0,24	0,4

Taulukon 8.3.2 tulokset osoittavat, että tutkitun raskarakenteisen kerrostalon tilojen lämmityksen nettotarve on nykyisissä ilmasto-oloissa parhaimmillaan 10 % pienempi ja tilojen jäähdytyksen nettotarve vastaavasti 5–31 % pienempi kuin kevytrakenteisella rakennuksella riippuen vaipan lämmöneristystasosta sekä siitä, käytetäänkö tehostettua yötuuletusta.

Raskarakenteisen kerrostalon tilojen lämmityksen ja jäähdytyksen yhteenlaskettu vuotuinen ostoenergiankulutus on enimmillään 3 kWh/(m²a) pienempi kuin kevytrakenteisen rakennuksen, kun käytetään kaukolämmitystä. Maalämpöpumppulämmityksellä sekä maapiirillä toteutetulla vapaajäähdytyksellä voidaan tutkituissa tapauksissa säästää ostoenergiaa enimmillään 0,5 kWh/(m²a). Termisen massan aiheuttama ostoenergiensäästö tulee ilmastonmuutoksen vaikutuksesta hieman pienemmään, ellei rakennuksessa hyödynnetä tehostettua yötuuletusta. Mikäli tehostettua yötuuletusta käytetään, termisen massan tuoma ostoenergiensäästö tulee ilmastonmuutoksen myötä hieman kasvamaan ja termisen massan vaikutus on enimmillään 2,3–3 kertaa suurempi kuin tapauksissa, joissa tehostettua yötuuletusta ei käytetä.

Kaikkiaan raskarakenteisen kerrostalon kokonaisostoenergiankulutus on tutkituissa tapauksissa 0,5–3,5 % pienempi kuin kevytrakenteisen kerrostalon.

Taulukko 8.3.3 Termisen massan vaikutus toimistorakennuksessa tilojen lämmitys- ja jäähdytysenergian nettotarpeeseen sekä ostoenergiankulutukseen.

Vuosi	Tehostettu yötuuletus (K/E)	Termisen massan (LW vs. M) vaikutus							
		Muutos, %		Ostoenergian säästö, kWh/(m ² a)					
		Tilojen lämmitys tarve	Tilojen jäähdytys tarve	Kaukolämpö + kon. jäähdytys			MLP-lämmitys + vapaajäähdytys (MLP)		
				Tilojen lämmitys	Tilojen jäähdytys	Yht.	Tilojen lämmitys	Tilojen jäähdytys	Yht.
<i>Lämmöneristys: RakMK C3 (2007) (A)</i>									
2012	E	-3,0	-2,2	1,58	0,24	1,8	0,54	0,02	0,6
2050	E	-3,2	-1,4	1,45	0,17	1,6	0,49	0,01	0,5
2100	E	-3,5	-0,5	1,29	0,07	1,4	0,44	0,01	0,4
<i>Lämmöneristys: Passiivi (RIL 249 2009) (D)</i>									
2012	E	-3,9	-2,6	1,29	0,20	1,5	0,44	0,02	0,5
2050	E	-4,4	-2,0	1,23	0,17	1,4	0,42	0,01	0,4
2100	E	-5,2	-1,0	1,17	0,09	1,3	0,40	0,01	0,4
<i>Lämmöneristys: Passiivi (RIL 249 2009) (D)</i>									
2012	K	-3,9	-14,9	1,27	0,85	2,1	0,44	0,07	0,5
2050	K	-4,3	-15,2	1,22	0,91	2,1	0,42	0,08	0,5
2100	K	-5,4	-14,4	1,20	0,91	2,1	0,41	0,08	0,5

Taulukon 8.3.3 tulokset osoittavat, että tutkitun raskarakenteisen toimistorakennuksen tilojen lämmityksen nettotarve on nykyisissä ilmasto-oloissa enimmillään noin 4 % pienempi ja tilojen jäähdytyksen nettotarve vastaavasti noin 2–15 % pienempi kuin kevytrakenteisella rakennuksella riippuen vaipan lämmöneristystasosta sekä siitä, käytetäänkö tehostettua yötuuletusta.

Raskarakenteisen toimistorakennuksen tilojen lämmityksen ja jäähdytyksen yhteenlaskettu vuotuinen ostoenergiankulutus on enimmillään noin 2 kWh/(m²a) pienempi kuin kevytrakenteisen rakennuksen, kun käytetään kaukolämmitystä. Maalämpöpumppulämmityksellä sekä maapiirillä toteutetulla vapaajäähdytyksellä voidaan tutkituissa tapauksissa säästää ostoenergiaa enimmillään 0,6 kWh/(m²a). Termisen massan aiheuttama ostoenergiesäästö tulee ilmastonmuutoksen vaikutuksesta hieman pienemmään, ellei rakennuksessa hyödynnetä tehostettua yötuuletusta. Mikäli tehostettua yötuuletusta käytetään, termisen massan tuoma ostoenergiesäästö tulee ilmastonmuutoksen myötä hieman kasvamaan ja termisen massan vaikutus on enimmillään noin 1,5 kertaa suurempi kuin tapauksissa, joissa tehostettua yötuuletusta ei käytetä.

Raskarakenteisen toimistorakennuksen kokonaisostoenergiankulutus on tutkituissa tapauksissa 0,6–1,4 % pienempi kuin kevytrakenteisen rakennuksen, mikäli tehostettua yötuuletusta ei käytetä. Tehostetun koneellisen yötuuletuksen käyttö pienentää tilojen jäähdytystarvetta ja tehostaa termisen massan vaikutusta, mutta samalla IV-koneen puhaltimien sähkönkulutus kasvaa. Tällöin toimistorakennuksen kokonaisostoenergiankulutus kasvaa kuitenkin kaikkiaan 4–10 kWh/m², joten puhaltimien kasvanut sähkönkulutus on suurempi kuin massiivisuuden ja pienemmän jäähdytystarpeen vaikutus.

8.3.3 Yhteenveto

Tässä tutkimusosiossa selvitettiin rakennusten termisen massan passiivisen hyödyntämisen vaikutuksia pientalon, kerrostalon ja toimistorakennuksen lämmitys- ja jäähdytysenergian nettotarpeeseen sekä ostoenergiankulukseen ottaen huomioon ilmastonmuutoksen, vaipan lämmöneristystason ja tehostetun yötuuletuksen vaikutukset.

Tulokset osoittavat, että nykyisissä ilmasto-oloissa tutkittujen raskaiden betonirakenteisen rakennusten tilojen lämmityksen nettotarve on tapauksesta riippuen 2,5–10 % ja tilojen jäähdytyksen nettotarve 2–42 % pienempi kuin kevyillä rankarakenteilla rakennettujen rakennusten. Rakenteiden termisen massan passiivisen hyödyntämisen prosentuaalinen vaikutus rakennusten lämmitys- ja jäähdytystarpeeseen vaihtelee varsin paljon ja on tapauskohtainen, koska sen vaikutus riippuu rakenteiden lisäksi mm. rakennusten lämpökuormien ja häviöiden suhteesta (Jokisalo & Kurnitski 2007).

Termisen massan tuoma energiansäästö tulee ilmastonmuutoksen myötä hieman pieneneväksi, mikäli A2-kasvihuonekaasuskenaario toteutuu, ellei termisen massan energiateknistä toimintaa tehosteta esimerkiksi tehostetulla yötuuletuksella. Termisen massan tuomaa ostoenergiesäästöä voidaan kasvattaa tutkituissa tapauksissa parhaimmillaan jopa 3-kertaiseksi tehostettua yötuuletusta hyödyntämällä. On kuitenkin syytä huomata, ettei termisen massan aktivoimiseen kannata käyttää enempää energiaa, kuin mitä sen hyödyntämisellä voidaan säästää.

Rakenteiden termisen massan hyödyntämisen vaikutukset lämmityksen ja jäähdytyksen ostoenergiankulutukseen riippuvat merkittävästi järjestelmien suorituskyvystä. Mitä energiatehokkaampia lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmät ovat, sitä pienempi termisen massan vaikutus ostoenergiankulutukseen on. Termisen massan tuoma ostoenergiesäästö on tutkituissa tapauksissa suurimmillaan noin 2–4 kWh/(m²a), kun käytetään vesikiertoista sähkölämmitystä tai kaukolämmitystä ja perinteistä koneellista jäähdytystä. Maalämpöpumppulämmitystä ja maapiirillä toteutettua vapaajäähdytystä käytettäessä termisellä massalla säästettiin ostoenergiaa suurimmillaan 0,5–1 kWh/(m²a). Mikäli rakennusten jäähdytystarve katettaisiin kokonaan passiivisilla jäähdytysratkaisuilla, kuten auringon varjostusta lisäämällä, eikä koneellista jäähdytystä tarvita sisäilman tavoitelämpötilojen saavuttamiseksi, määräytyy termisen massan tuottama ostoenergiesäästö pelkästään lämmityksen ostoenergiankulutuksen perusteella. Tällöin termisen massan tuoma ostoenergiesäästö olisi suurimmillaan 2,6 kWh/(m²a) tutkituissa tapauksissa. Tulosten perusteella voidaan todeta, että termisen massan hyödyntämisen merkitys yksittäisenä energiansäästökeinona on melko pieni riippumatta siitä, käytetäänkö rakennuksessa koneellista jäähdytystä.

On myös syytä kuitenkin huomata, että rakenteiden termisen massan määrä vaikuttaa rakennuksen lämpöoloihin. Esimerkiksi Jokisalo & Kurnitski (2005) osoittivat, että betonirakenteisessa kerrostalossa vuotuinen yli 25 °C ylittävien astetuntien summa oli 545 Kh

pienempi kuin kevytrakenteisessa kerrostalossa, joten rakenteiden massaa on mahdollista hyödyntää yksittäisenä passiivisena jäähdytyskeinona.

8.4 Vaihtoehtoiset jäähdytysratkaisut

Tässä luvussa esitetään simulointitulokset sekä koneellisen että vaihtoehtoisten jäähdytysratkaisujen ja ilmastonmuutoksen vaikutuksista pientalon, kerrostalon ja toimistorakennuksen kesäaikaisiin (1.6–31.8) lämpöoloihin.

8.4.1 Laskennan lähtötiedot

Taulukossa 8.4.1 on esitetty tutkitut jäähdytysvaihtoehdot. Tapaukset simuloitiin ensin vertailutapauksessa ilman minkäänlaisia jäähdytysratkaisuja ja tämän jälkeen tapaukset simuloitiin taulukossa esitettävillä jäähdytysratkaisuilla. Taulukossa esitettäviä rakenteellisia, lasitukseen ja auringon varjostukseen liittyviä ratkaisuja kutsutaan passiivisiksi jäähdytysratkaisuiksi ja tarpeenmukaista ilmanvaihtoa sekä ikkunatuuletusta vapaajäähdytysratkaisuiksi.

Taulukko 8.4.1 Tutkitut yksittäiset jäähdytysvaihtoehdot.

Tapaus	Kuvaus
Ei jäähdytystä	Vertailutapaus, jossa ei ole koneellista tai mitään muuta tässä taulukossa esitettyä jäähdytysratkaisua
Sisäpuoliset kaihtimet	Ikkunoissa auringonsäteilyn mukaan ohjatut sisäpuoliset kaihtimet
Ikkuna-ala 30 % pienempi	Ikkunoiden pinta-ala 30 % alkuperäistä pienempi
Auringonsuojaikkunat	Auringonsuojaikkunat (g=0,3 ja ST=0,21) käytössä
Tarpeenmukainen ilmanvaihto	Lämpötilaohjattu tarpeenmukainen koneellinen ilmanvaihto (maksimi-ilmavirrat 2-kertaiset)
Markiisi	Ikkunoissa tuulen nopeuden ja auringonsäteilyn mukaan ohjatut markiisit
Ulkoiset kaihtimet	Ikkunoissa auringonsäteilyn mukaan ohjatut ulkoiset kaihtimet
Ikkunatuuletus	Ikkunatuuletus käytössä, kun sisälämpötila > 24 °C
Koneellinen jäähdytys	Koneellinen jäähdytys käytössä

Kaikkien tutkittujen rakennusten vaipan lämmöneristystasona käytetään taulukossa 8.2.1 esitettyä pientalon passiivitasoa (D). Rakennusten ikkunoiden U-arvo on kaikissa tapauksissa 0,8 W/(m²K), perustasolla auringonsäteilyn kokonaisläpäisykerroin (g) on 0,46 ja suoran auringonsäteilyn läpäisykerroin (ST) on 0,34. Tapausten sisäisinä lämpökuormina käytetään luvussa 8.1.3 esitettyjä lämpökuormia.

8.4.2 Tulokset

Taulukossa 8.4.2 on esitetty luvussa 8.4.1 esitettyjen jäähdytysvaihtoehtojen sekä ilmastonmuutoksen vaikutus pientalon asuintilojen 27 °C ylittävien astetuntien määrään kesäkuukausien ajalta nykyilmastossa sekä tulevaisuuden ilmasto-oloissa. Taulukossa 8.4.3 on esitetty vastaavat tulokset kerrostalon lämpimimmän asunnon osalta ja taulukossa 8.4.4 on esitetty toimistorakennuksen avokonttorin 25 °C ylittävät astetunnit rakennuksen käyttöaikana (ark. klo 7–18) kesäkuukausien (1.6–31.8) ajan. Taulukoissa on esitetty kukin vaihtoehtoinen jäähdytystapa 1–8 sekä tapaus 9, joka osoittaa 30 % pienemmän ikkuna-alan, auringonsuojaikkunoiden, ulkoisten sälekaihtimien sekä lämpötilaohjatun tarpeenmukaisen ilmanvaihdon yhteisvaikutuksen tutkittujen rakennusten lämpöoloihin

Taulukko 8.4.2 Pientalon 27 °C ylittävät astetunnit 1.6–31.8 välisenä aikana eri jäähdytystavoilla laskettuna.

Nro	Tapaus	Astetunnit (> 27 °C), Kh		
		2012	2050	2100
Yksittäiset tekijät				
ref.	Ei jäähdytystä	9344	11367	14234
1	Sisäpuoliset kaihtimet	6242	8143	10935
2	Ikkuna-ala 30 % pienempi	5401	7218	9935
3	Auringonsuojaikkunat	3854	5503	8243
4	Tarpeenmukainen ilmanvaihto	2900	4241	6598
5	Markiisi	2195	3695	6005
6	Ulkoiset kaihtimet	1463	2698	5302
7	Ikkunatuuletus	70	166	438
8	Koneellinen jäähdytys	6	7	8
Yhdistelmä				
9	Tekijät: 2+3+4+6	106	282	876

Taulukko 8.4.3 Kerrostalon 27 °C ylittävät astetunnit 1.6–31.8 välisenä aikana eri jäähdytystavoilla laskettuna.

Nro	Tapaus	Astetunnit (> 27 °C), Kh		
		2012	2050	2100
Yksittäiset tekijät				
ref.	Ei jäähdytystä	24406	26040	28189
1	Sisäpuoliset kaihtimet	19622	21079	23361
2	Ikkuna-ala 30 % pienempi	18680	20163	22318
3	Auringonsuojaikkunat	15938	17499	19706
4	Tarpeenmukainen ilmanvaihto	12599	14223	16568
5	Markiisi	11094	12613	14908
6	Ulkoiset kaihtimet	10669	12206	14560
7	Ikkunatuuletus	157	328	744
8	Koneellinen jäähdytys	11	11	11
Yhdistelmä				
9	Tekijät: 2+3+4+6	698	1648	3896

Taulukko 8.4.4 Toimistorakennuksen 25 °C ylittävät astetunnit rakennuksen käyttöaikana (ark klo 7–18) 1.6–31.8 välisenä aikana eri jäähdystavoilla laskettuna.

Nro	Tapaus	Astetunnit (> 25 °C), Kh		
		2012	2050	2100
Yksittäiset tekijät				
ref.	Ei jäähdystystä	2745	3455	4481
1	Sisäpuoliset kaihtimet	2206	2909	3940
2	Ikkuna-ala 30 % pienempi	1744	2424	3421
3	Markiisi	1342	2008	3001
4	Auringonsuojaikkunat	1287	1947	2932
5	Ulkoiset kaihtimet	1283	1950	2960
6	Tarpeenmukainen ilmanvaihto	606	1079	1933
7	Ikkunatuuletus	216	410	838
8	Koneellinen jäähdystys	1	1	1
Yhdistelmä				
9	Tekijät: 2+4+5+6	131	294	784

8.4.3 Yhteenveto

Tulokset osoittavat, että A2-kasvihuonekaasuskenaariolla on toteutuessaan merkittävä vaikutus tutkittujen rakennusten kesäaikaisiin lämpöoloihin, mikäli rakennuksissa ei käytetä koneellista jäähdystystä. Tutkituissa tapauksissa astetuntien määrä kasvoi nykyisestä suurimmillaan 3-kertaiseksi vuoteen 2050 mennessä tai jopa 8-kertaiseksi vuoteen 2100 mennessä (ks. taulukko 8.4.2, tapaus 9). Tämän vuoksi rakennusten passiivisiin sekä vapaajäähdystysratkaisuihin on kiinnitettävä tulevaisuudessa entistä enemmän huomiota.

Tutkituilla passiivisilla sekä vapaajäähdystysratkaisuilla voidaan vaikuttaa merkittävästi rakennusten kesäaikaisiin lämpöoloihin. Tutkituista yksittäisistä jäähdystysratkaisuista tehokkain lämpöoloihin vaikuttava ratkaisu on ikkunatuuletus, mutta on syytä korostaa, että sen käyttö voi heikentää sisäilman laatua ulkoilman epäpuhtauspitoisuudesta riippuen. Ikkunatuuletus ei myöskään sovellu käytettäväksi meluisassa ympäristössä. Ikkunatuuletusta ei voida käyttää rakennusten sisälämpötilojen määräystenmukaisuutta (RakMK D2 2012 ja RakMK D3 2012) osoitettaessa. Koska ikkunatuuletus on kuitenkin erittäin tehokas jäähdystysratkaisu, on suositeltavaa, että asuinrakennukset varustetaan tuuletusikkunoilla myös jatkossa.

Ikkunoiden pinta-alalla ja niiden suuntauksella voidaan vaikuttaa merkittävästi rakennusten kesäaikaisiin lämpöoloihin. Tutkituissa rakennuksissa 30 % alkuperäistä pienemmät ikkunat vähensivät astetuntien määrää nykyilmastossa noin 1000–5700 Kh rakennustyyppistä riippuen. Kaikissa tutkituissa tapauksissa rakennukset oli suunnattu siten, että ikkunoiden kautta tulevat auringon säteilykuormat ovat suurimmillaan (ks. luku 8.1.3), joten ikkunoiden pinta-alan vaikutus lämpöoloihin on tutkituissa tapauksissa myös suurimmillaan. Rakennusten suunnitteluvaiheessa ikkunoiden pinta-alaan ja suuntaukseen tulisi kiinnittää nykyistä selvästi enemmän huomiota rakennusten yllälämpenemisen estämiseksi.

Ikkunoiden ulkopuoliset sälekaihtimet ovat tutkituista auringonsuojausratkaisuista tehokkaimmat. Tätä ratkaisua käytetään jo melko yleisesti toimistorakennuksissa ja sen käyttö olisi suositeltavaa myös asuinrakennuksissa. Ikkunoiden sisäpuoliset sälekaihtimet ovat sen sijaan tutkituista jäähdytysratkaisuista heikoimmat. Mikäli mahdollista, sälekaihtimet tulisi asentaa mieluummin ikkunoiden väliin kuin sisätilaan, koska sisätilassa olevat sälekaihtimet eivät estä tehokkaasti auringon lämpökuormien pääsyä huonetilaan.

Lämpötilaohjattu tarpeenmukainen ilmanvaihto vähensivät asetuntien määrää nykyilmastossa noin 2100–11800 Kh rakennustyyppistä riippuen, kun käytössä oli 2-kertaiset maksimiilmavirrat. On syytä huomata, että ilmavirtojen lisääminen kasvattaa myös ilmanvaihdon puhallinsähkön kulutusta ja ilmanvaihdon tehostusmahdollisuus on otettava huomioon jo ilmanvaihtojärjestelmän suunnittelussa ja mitoituksessa.

Auringonsuojaikkunoiden käyttö vähensi puolestaan asetuntien määrää nykyilmastossa noin 1500–8500 rakennustyyppistä riippuen. Toisin kuin muut tutkitut auringon varjostusratkaisut, auringonsuojaikkunat lisäävät hieman rakennuksen lämmitystarvetta, koska ne vähentävät ikkunoiden kautta tulevaa auringonsäteilyä myös lämmityskaudella.

Rakennusten kesäaikainen lämpöolojen hallinta tulee tehdä ensisijaisesti passiivisia ja vapaajäähdytysratkaisuja käyttäen ja koneellista jäähdytystä tulee käyttää vasta tarvittaessa.

8.5 Sisäilman kosteus

Luvussa 8.5 esitetään simulointitulokset ilmastonmuutoksen sekä taloteknisten järjestelmien vaikutuksista rakennusten sisäilman kosteuteen.

8.5.1 Laskennan lähtötiedot

Luvussa 8.1.3 esitetyn pientalon ja toimistorakennuksen sisäilman kosteus simuloitiin käyttäen IDA-ICE 4 simulointiohjelmaa ja energialaskennan testivuotia. Pientalon tilojen kosteustuotona käytettiin tutkimuksessa Vinha et al. (2009) kokeellisesti määritettyä maksimikosteustuoton keskiarvoa, joka on 15,3 kg/vrk pientalossa. Toimistorakennuksen kosteustuotona käytettiin pelkästään RakMK D3 (2012) mukaisella henkilötiheydellä (1/17 hlö/m²) simuloitua kosteustuottoa. Kerrostalon sisäilman kosteutta ei simuloitu, koska maksimikosteustuotto on pientaloissa asukasta kohden suurempi kuin kerrostalossa tutkimuksen Vinha et al. (2009) perusteella. Näin ollen pientalo on sisäilman kosteustarkastelun kannalta tärkeämpi kuin kerrostalo.

Tutkituissa tapauksissa käytettiin taulukossa 8.2.1 esitettyjä passiivitason vaipan lämmöneristystasoja ja vaipan ilmanvuotoluku n_{50} oli tutkituissa tapauksissa 0,6 1/h. Tapauksissa käytettiin luvussa 8.1.3 esitettyjä sisäisiä lämpökuormia sekä lämmityksen ja jäähdytyksen asetusarvoa. Poikkeuksena toimiston tilojen jäähdytyksen asetusarvona käytettiin 24 °C.

Taulukossa 8.5.1 on esillä simuloitujen rakennusten ilmanvaihtuvuudet asuinrakennusten osalta ja ilmanvaihdon tuloilmavirrat toimistorakennuksen osalta. Tapauksissa käytettiin vakioilmavirtaisia ilmanvaihtojärjestelmiä (CAV) ja tarpeenmukaisella ilmanvaihdon ohjauksella (VAV) varustettuja järjestelmiä joko lämpötila- tai CO₂-ohjauksella toteutettuna.

Taulukko 8.5.1 Rakennusten ilmanvaihdon ilmanvaihtuvuus (1/h) tai tuloilmavirrat (dm³/sm²) vakioilmavirtaisissa (CAV) ja tarpeenmukaisissa (VAV) tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmissä.

Rakennus	Ilmanvaihtuvuus (1/h) tai tuloilmavirta (dm ³ /sm ²)				
	Vakioilmavirrat (CAV)	VAV (T-ohjaus)		VAV (CO ₂ -ohjaus)	
		min.	max.	min.	max.
Pientalo	0,5 1/h	0,5 1/h	1,0 1/h	-	-
Toimisto ¹	2 dm ³ /sm ²	1,5 dm ³ /sm ²	5 dm ³ /sm ²	1,5 dm ³ /sm ²	3 dm ³ /sm ²
Toimisto ²	3 dm ³ /sm ²	3 dm ³ /sm ²	7 dm ³ /sm ²	3 dm ³ /sm ²	5 dm ³ /sm ²

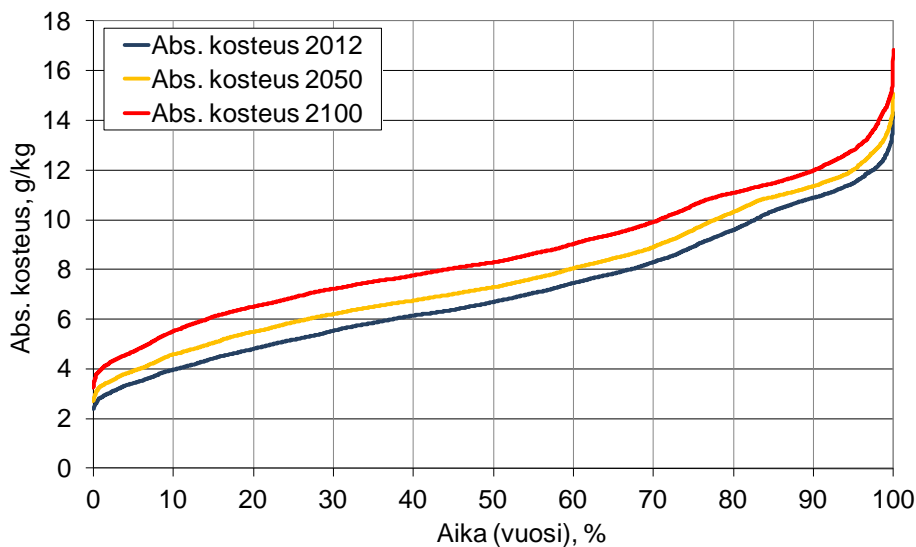
¹ Toimistohuoneet ja avokonttorit

² Neuvotteluhuoneet

Tapauksissa, joissa ilmanvaihdon tuloilmaa jäähdytetään koneellisesti (IV-jäähdytys), ilmanvaihtokoneen jäähdytyspatterin lämpötila on 5 °C. Pientaloissa, joissa tiloja jäähdytetään koneellisesti, käytetään split-laitetta, jonka jäähdytyspatterin lämpötila on 15 °C ja toimistorakennuksessa käytetään jäähdytyspalkkeja, joiden menoveden lämpötila on 15 °C.

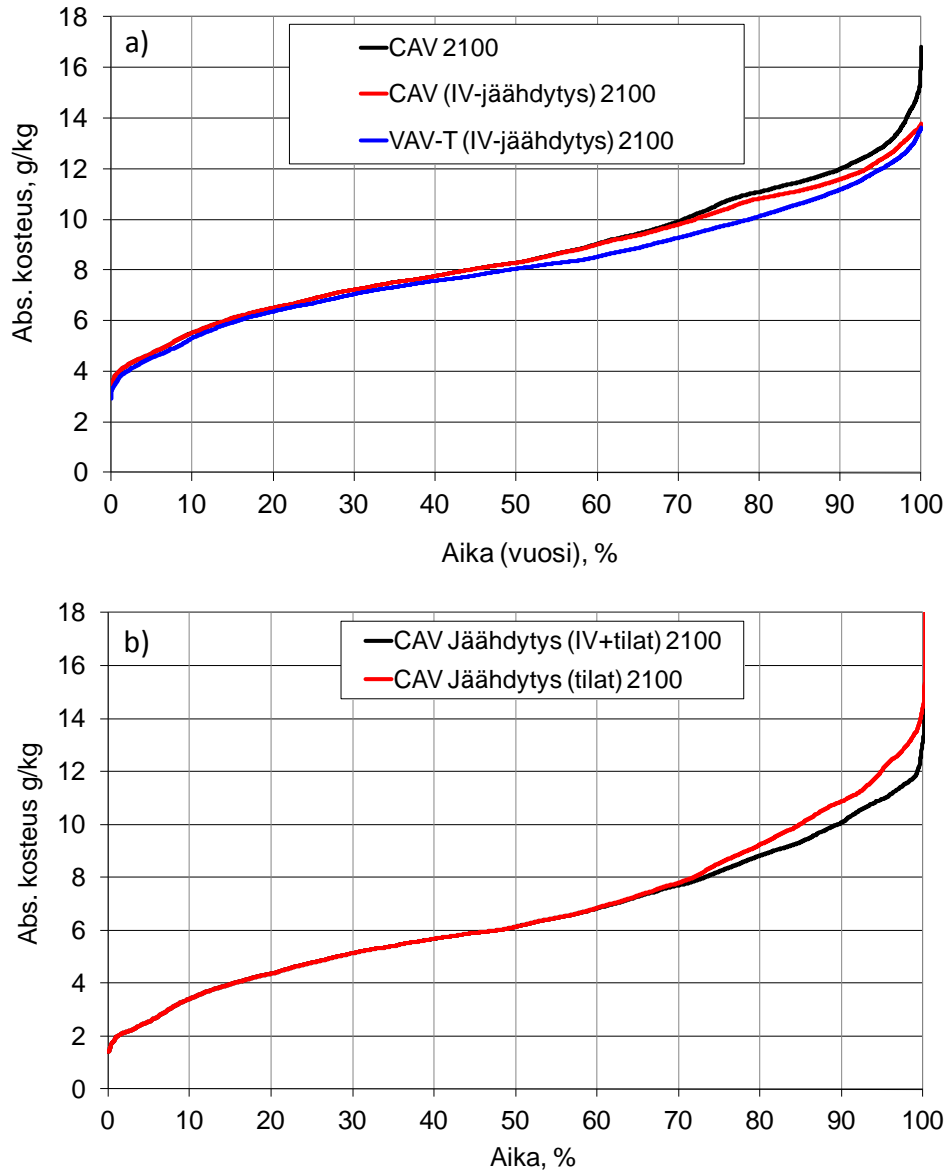
8.5.2 Tulokset

Kuvassa 8.5.1 on esillä pientalon sisäilman absoluuttisen kosteuden pysyvyyskäyrä nykyisissä sekä tulevaisuuden ilmasto-oloissa, kun ilmanvaihdon tuloilmaa tai tiloja ei jäähdytetä koneellisesti. Tulosten perustella tutkitun pientalon ja toimistorakennuksen sisäilman absoluuttinen kosteus nousee ilmanvaihto- ja jäähdytysjärjestelmästä riippuen nykyisestä 0,6–0,7 g/kg vuoteen 2050 mennessä ja noin 1,4–1,7 g/kg vuoteen 2100 mennessä.



Kuva 8.5.1 Pientalon sisäilman absoluuttinen kosteus nykyisissä ja tulevaisuuden ilmasto-oloissa

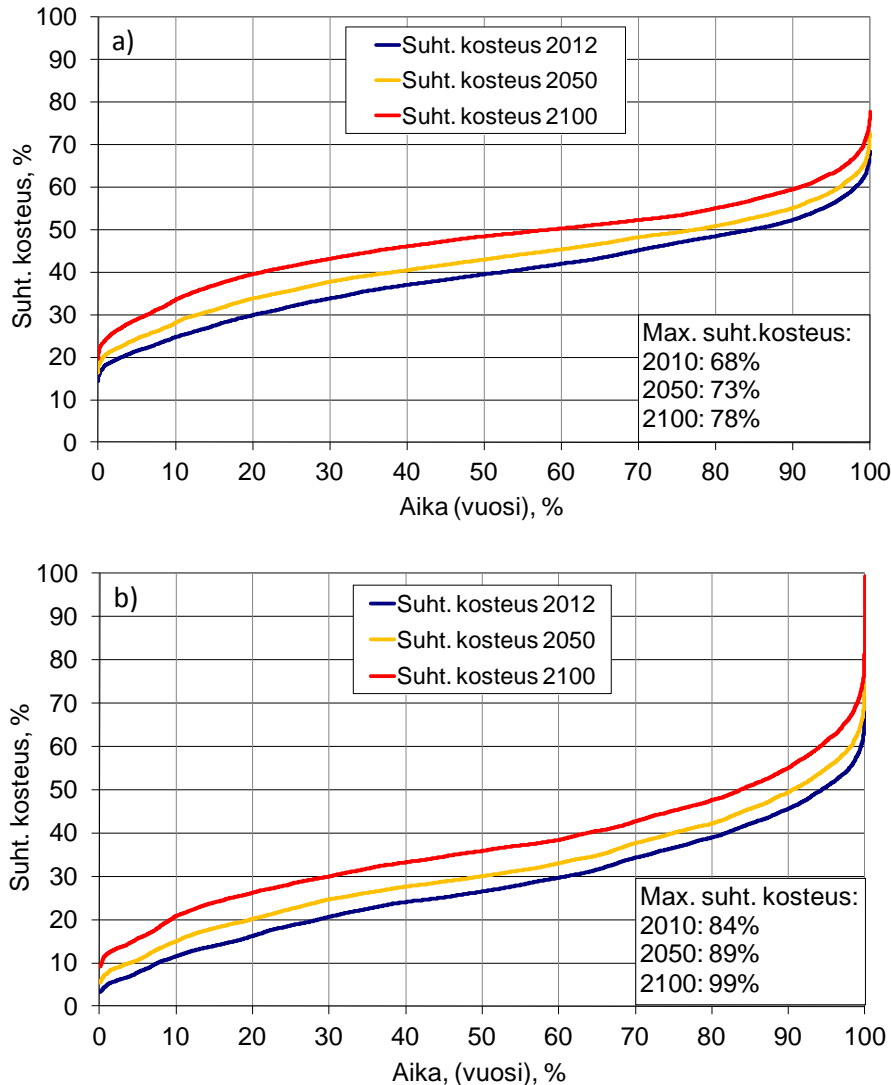
Kuvassa 8.5.2 on esillä ilmanvaihdon ohjaustavan sekä koneellisen tuloilman esijähdytyksen vaikutus pientalon sisäilman kosteuteen sekä pelkän tuloilman esijähdytyksen vaikutus toimiston sisäilman kosteuteen vuonna 2100. Kuvan perusteella voidaan todeta, että tutkituilla tekijöillä on suhteellisen pieni vaikutus sisäilman absoluuttiseen kosteuteen.



Kuva 8.5.2 Pientalon (a) ja toimistorakennuksen (b) sisäilman absoluuttisen kosteuden pysyvyysskäyrä vuoden 2100 aikana eri ilmanvaihto ja jäähdytystavoilla simuloituna. Ilmanvaihdon tuloilman jäähdytys on käytössä tapauksissa (IV-jähdytys) tai pelkästään tiloissa tapauksissa (tilat).

Kuvassa 8.5.3 on esillä pientalon ja toimiston sisäilman simuloitu suhteellinen kosteus, jos ilmanvaihdon tuloilmaa ei jäähdytetä koneellisesti, mutta tiloja jäähdytetään koneellisesti. Tällöin sisätilojen suhteellinen kosteus on suurimmillaan, koska tuloilman esijähdytys ei kuivata tuloilmaa. Tulokset osoittavat, että pientalon suhteellisen kosteuden maksimiarvo nousee 10 % RH nykyisestä vuoteen 2100 mennessä ja toimistorakennuksessa vastaavasti 15 % RH. Vuonna 2100 suhteellisen kosteuden maksimiarvo on pientalossa 78 % RH ja

toimistossa jopa 99 % RH. Mikäli toimistossa käytetään tuloilman esijähdytystä, laskee sisäilman suhteellinen kosteus merkittävästi ja vuonna 2100 sisäilman suhteellisen kosteuden maksimiarvo olisi toimistossa 67 % RH.



Kuva 8.5.3 Pientalon (a) ja toimistorakennuksen (b) sisäilman suhteellisen kosteuden pysyvyysskäyrä vuoden aikana, kun ilmanvaihdon tuloilmaa ei jähdytetä koneellisesti, mutta tiloissa käytetään koneellista jähdytystä.

8.5.3 Yhteenveto

Tutkittujen rakennusten sisäilman absoluuttinen kosteus tulee nousemaan nykyisestä 0,6–0,7 g/kg vuoteen 2050 mennessä ja noin 1,4–1,7 g/kg vuoteen 2100 mennessä, mikäli A2-kasvihuonekaasuskenaario toteutuu. Ilmastonmuutoksen myötä kasvava sisäilman kosteus tulee ottaa huomioon kondensoimattomien jähdytysjärjestelmien suunnittelussa ja mitoituksessa erityisesti silloin, kun ilmanvaihdon tuloilmaa ei kuivateta esim. kondensoivalla jähdytysjärjestelmällä.

9 Työmaan rakennusaikainen kosteudenhallinta

9.1 Yleistä

Kosteus ja rakenteiden vaurioituminen sekä niihin liittyvät rakennusvirheet ovat iso riski rakennusvaiheessa. Rakennustyömaan olosuhteet ovat aina vaativat ja pohjoisen ilmaston muutokset tekevät rakennustöiden toteutuksesta entistä haasteellisempaa. Tyypillisiä virheitä ovat mm. riittämätön materiaalin suojaus sekä vääränlainen materiaalien käyttö rakennusvaiheessa, minkä seurauksena rakenteisiin käytetään kastuneita ja pilaantuneita materiaaleja. Virheitä aiheutuu myös puutteellisesta valmiiden ja keskeneräisten rakenteiden suojaamisesta, lämmityksen ja ilmanvaihdon suunnittelemattomuudesta sekä töiden yhteensovittamisesta ja kokonaishallinnasta.

Oman mausteensa keitokseen tuo määräysten ja vaatimusten muutokset. Rakennuksen lämmöneristyksen sekä ilmatiiviuden parantuessa rakenteiden fysikaalinen toiminta muuttuu, kuivumisajat pitenevät ja rakenteiden kyky sietää puutteita tai vikoja alenee. Nämä muutokset edellyttävät vaikutuksien tarkastelua myös rakennustyömaan toimintaan. Rakennusprosessin aikaisella rakennusfysikaalisella toiminnalla tarkoitetaan mm. rakenteiden kosteuden hallintaa, rakennuksen lämpöliikkeitä sekä liiallisen kuivauksen tai lämmityksen aiheuttamia ongelmia ja rakennushankkeen tuotannon aikaisen ilmanvaihdon tarpeen muutoksia.

Kosteusteknisesti hallittu rakennustuotanto edellyttää teollisuuden, suunnittelijoiden ja työmaiden välistä yhteistyötä ja uusien kosteusteknisesti turvallisten rakenneratkaisujen kehittämistä sekä käytännössä toimivia suojausmenetelmiä. Kosteuden hallintaan on olemassa menetelmiä ja ratkaisuja, mutta niiden käyttöönotto ja asiallinen käyttö vaatii asennemuutoksen rakennushankkeen kaikilta osapuolilta:

- Rakennusvalvontaviranomainen voi edellyttää kosteudenhallinnan suunnittelua rakennuslupaehdoissa.
- Rakennuttajan on osattava vaatia kuivaa, rakenteita pilaamatonta rakentamistapaa ja varattava siihen riittävät resurssit, eli otettava se huomioon hankkeen kustannusarviossa.
- Suunnittelijoiden on otettava rakenteiden rakentamisaikainen kosteus huomioon ja mahdollistettava rakenteiden suojaus esimerkiksi lisäämällä rakenteisiin suojakatosten kiinnityspisteitä tai muuttamalla tartuntarautoja niin, että suojaus voidaan hoitaa suojapeitteillä.
- Suunnitelmat tarkistutetaan suunnitteluryhmän ulkopuolisella rakennusfysiikan asiantuntijalla kosteusteknisen toiminnan osalta vaativissa kohteissa. Muidenkin kohteiden tarkistaminen on suositeltavaa ja voi tuoda säästöjä vuosikorjauskustannuksissa.
- Urakoitsija noudattaa sopimuksia, suunnittelijoiden ohjeita ja suunnittelee työmaan kosteudenhallinnan osana koko työmaan tuotannon suunnittelua. Erillistä suunnitelmaa ei tarvita.

- Kosteudenhallinnan toteutusta valvotaan jatkuvasti ja siihen liittyvät asiat otetaan mukaan työmaa- ja urakoitsijakokouksiin.

9.2 Hankesuunnittelu

9.2.1 Yleistä

Rakennushankkeeseen ryhtyvän tulee määrittää rakennustuotannon kosteudenhallinnan taso suunnitteluohjeissa ja sopimusasiakirjoissa. Keskeisiä rakentamisen kosteuden hallinnan tasoon vaikuttavia tekijöitä ovat rakentamisen ajankohta, aikataulu, rakenneratkaisut, materiaalivalinnat ja sääsuojauksen toteutustavat. Suunnittelu- ja urakkasopimuksilla määritetään reunaehdot kosteuden hallinnalle. Mikäli asiakirjoissa ei määritetä kosteudenhallinnan tasoa, on urakoitsijoilla vapaus valita käytettävät tuotanto- ja sääsuojausmenetelmät. Rakennuskosteus voi aiheuttaa kuitenkin merkittäviä haittoja tilaajalle ja käyttäjille erilaisina vahinkoina ja häiriöinä.

Kosteuden hallinnan tasoa määritettäessä on otettava huomioon monitahoisia kysymyksiä:

- Milloin rakennetaan?
- Kuinka nopeasti rakennetaan?
- Kuinka paljon rakenteet sietävät kosteutta?
- Millaiset olosuhteet vaaditaan rakentamisajalle?
- Kustannukset ja toteutuneiden riskien kustannukset?

Yleispätevää ohjetta, joka sopii kaikkiin tilanteisiin, on mahdotonta esittää. Kuitenkin on selvää, että tilaajan tulee vaatia suunnittelijoilta ja urakoitsijoilta vastauksia ja ratkaisuja edellisiin kysymyksiin, kuten työturvallisuuden ja aikataulun osalta jo tehdään. Tilaajan tulee sisällyttää kosteuden hallinnan tasosta ja mahdollisesti siinä käytettävistä menetelmistä selkeät ohjeet jo suunnittelu- ja urakkatarjouspyyntöasiakirjoihin, jotta rakentaminen voi olla laadukasta ja kustannustehokasta. Tällöin tarjoajat ovat yhdenvertaisia menetelmien valinnan suhteen ja hallittu rakentaminen on mahdollista. Rakennusteknisten töiden valvojan tehtävä on valvoa sopimusten noudattamista, millä luodaan edellytys rakennustuotannossa tapahtuvalle laatuhyppylle.

Taulukko 9.2.1 Rakentamisen kosteudenhallinnan ja kuivanapidon keskeiset toimenpiteet hankkeen eri vaiheissa.

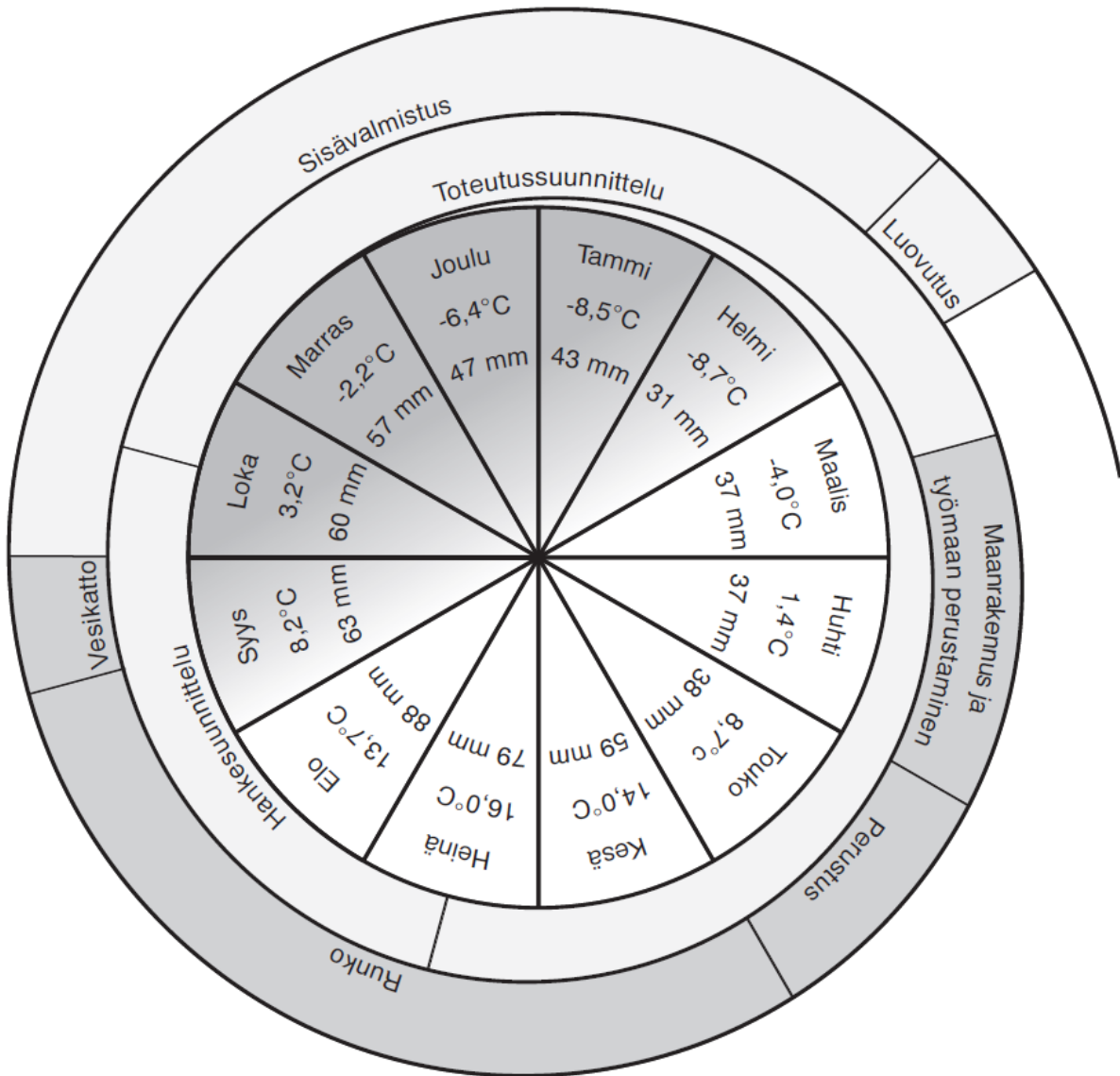
Hankkeen vaihe	Hankesuunnittelu	Suunnittelu	Työvaihe-suunnittelu	Viikkosuunnittelu, rakentaminen
Toimenpide	<p>Päätös vaaditusta kosteudenhallinnan laatutasosta</p> <p>Budjettivaraus toteutukselle</p> <p>Rakentamisen aikataulu</p>	<p>Rakenteiden rakentamis- ja käytönaikaisen toimivuuden suunnittelu</p> <p>Kosteudenhallinnan ohjeet suunnitelmiin</p> <p>Riskien arviointi</p> <p>Kosteustekninen suunnitelmien tarkastus ulkopuolisella asiantuntijalla</p>	<p>Kosteuden hallinnan suunnittelu osana koko työmaan toteutus-suunnittelua</p> <p>Tehtävä-suunnitelmat Yleisaikataulu</p>	<p>Kuivanapidon toteutus, tarkastukset ja huolto</p> <p>Kuivanapidon käsittely kokouksissa ja palavereissa</p> <p>Olosuhteiden seuranta</p>
Tekijä	Rakennushankkeeseen ryhtyvä, rakennuttaja	Suunnittelijat, päärakennesuunnittelija koordinoi	Päätoteuttaja, päärakennesuunnittelija avustaa	Päätoteuttaja ja urakoitsijat

9.2.2 Hankeaikataulu

Rakentamisen suunnittelun ja rakennustyön aloitusajankohta vaikuttaa rakentamisen aikaiseen kosteusrasitukseen. Hankkeen laajuudesta ja toteutusmuodosta riippuu, kuinka kauan suunnitteluvaiheet ja esimerkiksi rakennusluvan saanti kestää. Rakennusaika vaihtelee työmaan olosuhteiden ja valittujen toteutus- ja runkovaihtoehtojen mukaan (kuva 9.2.1).

Rakennus on koko runkovaiheen altis kastumiselle ennen kuin vesikatto ja julkisivut valmistuvat. Tämän takia perustus- ja runkovaihe olisi syytä ajoittaa mahdollisimman kuivaan vuodenaikaan. Rakentamisen suhdanteet ja rakennuksen haluttu käyttöönotto eivät tätä aina mahdollista, jolloin runkovaiheessa on käytettävä hyviksi havaittuja suojaus-, kuivaus- ja lämmitysmenetelmiä. Aikataulusuunnittelussa otetaan huomioon mahdolliset säävaraukset ja suojausten tekeminen.

Hankeaikataulun laadinnassa ja varsinkin sen noudattamisessa on suunniteltava ne keinot, joilla estetään hankkeen siirtyminen epäedullisempaan vuodenaikaan tai otetaan muuten huomioon, että rakentamisen menetelmät ovat hyvin erilaisia eri vuodenaikoina. Esimerkiksi työmaan aloitusajankohdan siirtyminen elokuulta lokakuulle hidastaa vääjäämättä rakennuksen runkotöiden aikataulua ja aiheuttaa lukuisia lisätöitä työmaalle.



Kuva 9.2.1 Hankkeen aloitusajankohta ja rakentamisen toteutustapa määrittävät kosteudelle alttiiden rakennusvaiheiden ajoittumisen.

9.2.3 Suunnittelu-aikataulu

Suunnittelulle on varattava riittävä aika, jotta hankinnat ja tuotannon suunnittelu voidaan tehdä kustannustehokkaasti ja laadukkaasti. Suunnittelijoiden tulee yhteisissä palavereissaan käsitellä tilaajan esittämät kosteuden hallinnan vaatimukset ja sopia yhteisesti käytettävät menetelmät.

Suunnitelma-aikatauluun eli piirustusaikatauluun tarkennetaan eri työvaiheiden ja hankintojen eri suunnitteluosapuolilta tarvittavat piirustukset ja niiden valmistuspäivämäärät. Piirustusten valmius tarkoittaa rakennusvalvonnan, muiden suunnittelijoiden, pääsuunnittelijan, tilaajan ja ulkopuolisen asiantuntijan hyväksymien piirustusten toimittamista työmaalle tai tilaajalle.

9.3 Toteutussuunnittelu

9.3.1 Suunnitteluohjeet

Tilaja antaa suunnittelijoille suunnitteluohjeet. Suunnitteluohjeissa tulee esittää kosteudenhallinnan vaatimukset tuotteelle ja toteutuksen reunaehdot, mitä nykyisin hyvin harvoin tapahtuu. Vallitseva käytäntö on ollut vapaiden käsien antaminen rakennusurakoitsijoille. Rakennusurakan yleiset sopimusehdot (YSE), RYL tai muut normit eivät määritä rakennusaikaisia olosuhteita, joten ne on kirjattava kohteen sopimukseen ja suunnitelmiin.

Pahimmillaan suunnittelu tuottaa sellaisia rakennuskosteuden poistoon tai tuuletukseen liittyviä ratkaisuja, jotka ovat mahdottomia valmistaa teollisuudessa tai asentaa työmaalla. Esimerkiksi sandwich-elementin tuuletusurat eivät ole avoimia, vaan ne ovat limittäin tai tukkeutuneet betonimurusista. Tekijöiltä voi puuttua ymmärrys rakenteiden toimintaperiaatteista tai rakenne on liian vaikea toteuttaa suunnitelmien mukaisesti, jolloin lopputulos ei vastaa lainkaan suunnittelijan tavoitetta. Suunnitelmissa tulisi esittää yksityiskohtaisesti tuotteiden valmistajille ja asentajille vaatimus rakentamisen aikaisen kosteusrasituksen huomioon ottamisesta. Esimerkiksi tiettyjen rakenteiden asennuksessa on noudatettava ”kuivan rakentamisen periaatetta”.

9.3.2 Kosteusteknisesti turvalliset rakenneratkaisut

Suunnittelijoiden on suunniteltava runko- ja eristysrakenteet kestäväksi myös rakentamisen aikainen kosteusrasitus, koska täysin kuivaan rakentamisen periaatteeseen ei vielä nykyisillä menetelmillä ole taloudellisesti mahdollista päästä. Rakenteiden tuuletusratkaisujen on sovellettava sekä valmistukseen, asennukseen että lopulliseen käyttöön. Lisäksi suunnitelmiin on kirjattava lähtötiedot työmaan kuivanapidon suunnitteluun kuten sallitut olosuhteet ja tarvittaessa suojaus-, lämmitys- ja kuivausmenetelmät.

Rakenteen kosteustekninen toimivuus rakentamisen ja elinkaaren aikana lähtee suunnittelupöydältä. Suunnittelussa on varmistettava muun muassa

- rakenteiden ja rakennusmateriaalien kestävyys rakennusaikaisissa olosuhteissa
- rakennuskosteuden poisto rakenteista, kuten julkisivun eristeisiin kerääntyvä vesi
- tuuletusratkaisujen toimivuus odotettavissa olevissa olosuhteissa
- perus- ja pintavesien vaatimat pihan muotoilut sekä perusmuurin korkeus
- pintamateriaalien toimivuus rakenteiden osana
- rakenteiden ja niiden liitosten ilmatiiviys
- suunnitteluratkaisujen yhteensovitus.

9.4 Rakennusvaihe

9.4.1 Kosteudenhallinnasta kuivana pitoon

Rakennushankkeet ovat aina yksilöitä, joiden toteutus suunnitellaan hankekohtaisesti. Tuotannon suunnittelu sisältää tuotantotavat, aikataulun, työturvallisuuden ja kosteuden hallinnan. Rakennustyömaan kosteuden hallinnan tarpeet, vaatimukset ja keinot vaihtelevat rakennusvaiheesta ja rakentamisen ajoituksesta sekä rakenteista riippuen. Kosteuden hallintaan ei ole yhtä oikeaa ratkaisumallia, jollei sellaiseksi lasketa aina pätevää: ”Pidetään rakenteet kuivina”.

Rakentajien on suunniteltava työmaiden kuivanapitoratkaisut ja kuivanapidon suunnitelman toteuttamiseen on nimettävä tietty työnjohtaja koko hankkeen ajaksi tai rakennusvaiheittain kuivanapidosta vastaavat työnjohtajat. Ennen työmaan aloitusta selvitetään työmaan kuivanapidon vaatimukset, suunnitellaan menetelmät ja tapa, kuinka niiden toteuttamista valvotaan. Suunnitelmassa esitetään työmaakohtaiset kosteusriskit, vaatimukset alihankkijoille, materiaalien ja rakenteiden suojaus, lämmitysmenetelmät rakentamisen eri vaiheissa ja rakenteiden kuivatus sekä mittaus ja valvontamenettelyt. Suunnitelmaa käytetään aliurakoiden sopimusliitteenä ja muutenkin työmaan viestinnässä hyväksi kuten työohjeena sääsuojauksesta ja työmaalämmityksestä vastaaville työntekijöille.

Työmaan kuivanapito sisältää seuraavat asiat:

- valumavesien pääsyn estäminen rakenteisiin ja materiaaleihin
 - pintavesien ohjaus, pihan kallistukset
 - salaojat, pumppaamot
 - perustusten ja muiden maanalaisten rakenteiden vesieristykset
- materiaalien suojaus sadevesiltä
 - tehtaalla
 - kuljetuksessa
 - varastoinnissa
 - asennuksen aikana
 - asennuksen jälkeen
- suojausmenetelmät
 - lopulliset rakenteet
 - sääsuojat, peitteet, teltat
 - väliaikaiset rakenteet: suojaseinät, ovet, ikkunat
- rakennekosteuden poistaminen
 - kuivumisaika-arviot, olosuhteiden luonti kuivumiselle
 - lämmitys
 - tuuletus / ilmanvaihto
 - koneellinen kuivatus
- olosuhteiden valvonta

- lämpö, kosteus, suojausten vedenpitävyys
- kosteus- ja tiiveysmittaukset.

Rakennustyömailla tulee siirtyä vallitsevana käytäntönä olevasta kosteudenhallinnasta pikemminkin työmaan kuivanapitoon. Kuivassa rakentamisessa rakenteita ei päästetä kastumaan ja materiaalit suojataan kastumiselta tehtaalla, kuljetetaan suojattuna, välivarastoidaan sääsuojissa tai muuten suojattuna, suojataan asennuksen aikana ja sen jälkeen kunnes lopullinen vesikate ja rakennuksen vaippa on valmis. Rakentamisen menetelmistä johtuva kosteusrasitus pitää myös ottaa haltuun (betonointi, muuraus, rappaus sekä tasoite- ja maalaustyöt). Lisäksi rakenteet on pidettävä suunnitellussa lämpötilassa ja ilmankosteudessa asentamisen jälkeen. Tähän liittyen on esimerkiksi otettava huomioon nestekaasulämmityksen aiheuttama kosteusrasitus, koska 1 kg kaasua tuottaa 1,6 kg vettä palaessaan.

Kuivassa rakentamisessa:

1. vesikatto ja rakennuksen vaippa ovat vedenpitävät tai rakentamista tehdään sääsuojassa.
2. lämpötila on yli 15 °C (lämmitys on päällä)
3. ilman suhteellinen kosteus on vähemmän kuin 70 % RH ja tavoitearvo on 50 % RH.

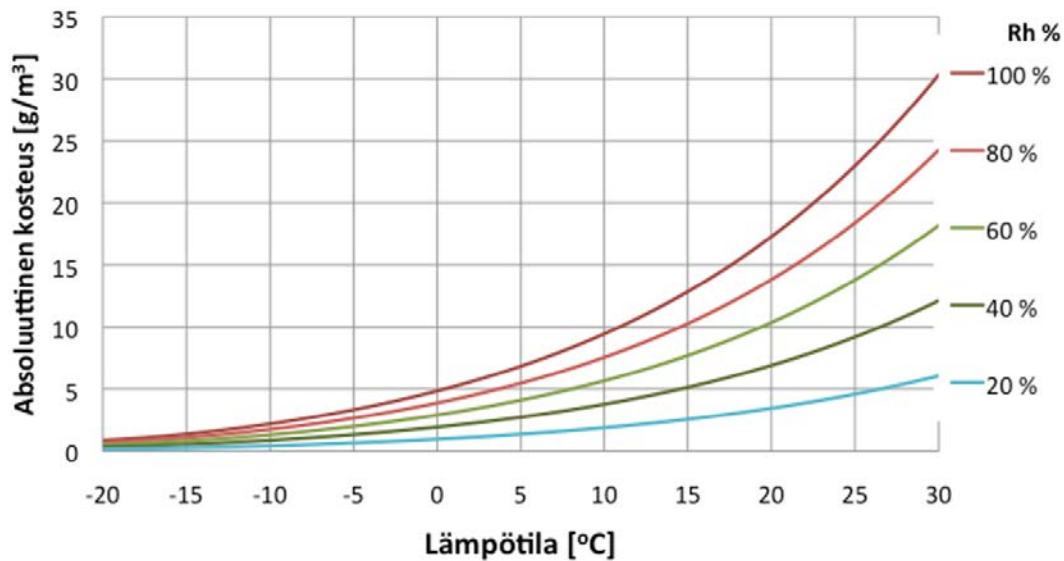
Kuivaa rakentamistapaa on noudatettava ainakin korjausrakentamisessa, puurakentamisessa ja sisävalmistustöissä kuten väliseinien levytyksissä ja eristeiden asennuksissa. Rakennuttajan on määritettävä kuivan rakentamisen tarve ja kohteet suunnitteluohjeilla ja sopimusasiakirjoilla. Rakennuttajan tulee varata myös riittävä aika rakentamiseen.

9.4.2 Rakennustyömaan kosteus- ja lämpöolosuhteet

Työmaa on alttiina säärasitukselle, työmenetelmät synnyttävät kosteutta ja kosteutta tuodaan rakennukseen myös rakennusmateriaalien mukana. Keskikokoisella asuinkerrostalotyömaalla poistettavan veden määrä on tuhansia, ellei kymmeniä tuhansia litroja. Sopiva ilmanvaihto rakennustyömaalla on yleensä 1–2 kertaa tunnissa. Riittävällä ilmanvaihdolla varmistetaan työntekijöille hyvät työskentelyolosuhteet ja poistetaan haitallisia ja jopa vaarallisia aineita pois hengitysilmaasta. Erityisesti rakennuspöly sekä liuottimien ja rakennustarvikkeiden haitalliset emissiot tulee ottaa huomioon työmaan ilmanvaihtoa suunniteltaessa. Ilmanvaihto on syksyä lukuun ottamatta myös tehokas keino poistaa rakennekosteutta.

Kosteuden hallinnalta vaadittava taso vaihtelee eri vuodenaikoina. Kevättalvella ja alkukesällä ulkoilma on kuivaa. Tällöin rakenteiden kuivattaminen on helppoa ja edullista, vaikka rakennuskosteutta esiintyisi paljonkin. Syyskesä on rakenteiden kuivattamisen kannalta haasteellisinta, koska ulkoilma on hyvin kostea. Tällöin tuuletuksella ei juurikaan saada kuivumista aikaan. Veden ja kosteuden kulkeutumista rakenteisiin on pyrittävä rajaamaan ja varmistettava rakenteiden kuivuminen joko riittävän pitkällä kuivumisajoilla tai koneellisella kuivatuksella. Talvella lämmitys ja tuuletus ovat tehokkaita rakennekosteuden

poistajia. Päähuomio tulee silloin kiinnittää valittavien menetelmien energiatehokkuuteen ja olosuhteiden hallintaan eli lämpötilan ja kosteuden säätöön (kuva 9.4.1).



Kuva 9.4.1 Mollierin diagrammi. Kun ulkoilman lämpötila on alle 0 °C, on ilmakehässä korkeintaan 5 grammaa vesihöyryä. Jos työmaan sisällä lämpötila on 15 °C ja ilman suhteellinen kosteus 80 % RH, on ilmakehässä vesihöyryä 10 grammaa. Kun 10 000 m³ työmaalla vaihdetaan ilma kerran tunnissa, poistuu sisältä 50 litraa vesihöyryä tunnissa.

9.4.3 Lämmitä työmaata – älä ulkoilmaa

Kylmänä vuodenaikana pääperiaatteena on pitää lumi ja jää pois työmaalta ja kuivattaa rakenteet tuulettamalla, kuitenkin energiaa tuhlaamatta. Tämä onnistuu sulkemalla työmaan isot aukot väliaikaisilla ovilla ja pressutuksilla. Porrashuoneisiin, ajoramppeihin ja muihin erityisiin isoihin aukkoihin ja kulkureitteinä käytettäviin aukkoihin on usein perusteltua tehdä väliaikaisilla seinillä ns. tuulikaappeja. Ikkunat asennetaan ulkoseinien nousun mukana tai ikkuna-aukot suojataan muovein. Asennetut ikkunat eivät vaurioidu, kun holvin suojaus hoidetaan asiallisesti eikä sadevesi pääse seinärakenteita pitkin kastelemaan ikkunoita.

Tuuletus järjestetään useiden pienten aukkojen kautta, kuten väliaikaisten ovien, karmien ja rungon väliin jäävien rakojen avulla. Yleensä ”tuuman rako riittää tuuletukseen”. Lämmitys ohjataan talon kulmiin ja vetoa rajoitetaan hissikuiluissa ja porrashuoneissa. Jokaisessa tilassa on oltava ilmanvaihto, jotta rakenteet kuivuvat tasaisesti. Kylmänä vuodenaikana varotaan tuulettamasta liikaa, koska kylmän ilman lämmittäminen kuluttaa huomattavasti energiaa. Kosteat pinnat on pidettävä puhtaina, koska pöly ja roskat sekä varastoitavat materiaalit lattialla hidastavat kuivumista.

9.5 Tuotannon suunnittelu ja ohjaus

9.5.1 Aikataulut

Rakennushankkeen toteutusajankohta vaikuttaa valittaviin kosteudenhallintamenetelmiin sekä ajalliseen suunnitteluun. Aikataulussa on varauduttava sateiden ja pakkasten aiheuttamiin töiden viivästyksiin. Toisaalta aikataulun pitää ottaa huomioon eri työvaiheiden järjestys ja limitykset. Kosteudelle alttiita työvaiheita ei voida aloittaa ennen kuin olosuhteet rakennuksessa ovat suunnitelmien mukaiset (kuva 9.5.1). Rakennuksen vaipan tulee mahdollisesti olla ummessa ja rakenteiden riittävän kuivia ennen seuraavan työvaiheen aloitusta. Projektin aikataulun viivästyessä on seuraavien työvaiheiden aloitusta siirrettävä tai haluttuun laatuun ei päästä.



Kuva 9.5.1 Väliseinätyöt on aloitettu ennen vesikaton valmistumista ja ikkunoiden asennusta. Valumavedet ovat kasteleet levytykset.

”Tiivis holvi”-periaate luo kuivat ja muutenkin hyvät olosuhteet alempiin kerroksiin. Se toimii hyvin myös työmaan lämmitysenergian säästökeinona. Syksyllä ja talvella vesikaton nopea toteutus on varmistettava tuotantoon sopivilla rakenneratkaisuilla ja esimerkiksi tehtäväsuunnittelun avulla.

9.5.2 Sopimukset

Toteutusta varten tehtävien aliurakkasopimusten ja suunnitelmien tulee sisältää myös kuivanapidon ja kosteudenhallinnan kannalta keskeiset asiat. Valvonta ja ohjaaminen on mahdollista, mikäli asioiden kirjaaminen ja läpikäynti laiminlyödään urakoista ja kaupoista sovittaessa. Kuivanapitoon ja kosteudenhallintaan liittyvät asiat tulee ottaa huomioon mm. seuraavia asioita sovittaessa ja suunniteltaessa:

- hankinnat
- kuljetus
- aliurakkasopimukset
- työkaupat
- vaihesuunnittelu
- tehtäväsuunnittelu
- viikkosuunnittelu

9.5.3 Riskien hallinta

Rakenteen kosteudensieto on otettava huomioon suojauksissa ja kuivattamisessa (kuva 9.5.2). Kaikkiin rakenteisiin tulee mikrobikasvustoa, jos kosteutta on riittävästi ja riittävän pitkään. Puhdas uusi betoni ei ole mikrobeille hyvä kasvualusta, mutta esimerkiksi rakenteeseen päässyt sahanpuru tai siitepöly voivat aiheuttaa mikrobikasvustoa. Puurakenteissa ja erityisesti levyrakenteissa kastuminen aiheuttaa esteettisiä ongelmia, lujuuden ja kestävyys heikentymistä sekä mikrobikasvustoa.

Rakennustuotannossa on runsaasti rakenteiden ja materiaalien kastumiseen liittyviä riskejä. Kosteusriskejä, joihin rakennustyömaalla tulee erityisesti kiinnittää huomiota, ovat:

- rakenteiden ja materiaalien kastuminen vesisateen tai lumen sulamisen takia
- suojauksen rikkoutuminen, puutteellisuus tai unohtaminen päivän päätteeksi
- putkivuodot, laiterikot ja työvirheet LVI-asennuksissa
- työvirheet vesikaton läpimenoissa sekä jiirien ja vesieristeiden seinille nostoissa
- perusvesien ja valumavesien rasitus rakenteille sekä maanalaisten rakenteiden vesieristykset
- vesieristeiden ja pinnoitustöiden teko epäpuhtaille tai kosteille alustoille
- suunnitteluratkaisut, jotka eivät ota huomioon rakennusaikaisia ja käytön aikaisia kosteusrasituksia

Betonirakentamisessa kosteusriskejä aiheuttavat:

- eristeisiin valuva ja jäätyvä sadevesi
- ontelolaattavälipohjien vesipesät (parvekekannakkeet, s-pisteet)
- sandwich-elementin ja perusmuurin välinen liitos
- betonipintojen kosteus pinnoitusvaiheessa

Puurakentamisessa kosteudesta johtuvia ongelmia:

- kastuneeseen ja muiden rakenteiden tai olosuhteiden takia hitaasti kuivuvaan puuhun voi kehittyä mikrobivaurio
- lämpötilasta ja kosteudesta riippuen mikrobivaurio voi kehittyä hyvin nopeasti
- puun kuivumiskutistuma aiheuttaa halkeamia valmiissa pinnoissa, jos pinnoitustöiden ja käytön aikaiset olosuhteet eroavat liikaa toisistaan
- kastuminen aiheuttaa ulkonäkövirheitä, kuten puun sinistymistä
- höyrynsulun vuodot aiheuttavat kosteuden tiivistymistä rakenteisiin

Riskien haltuunotto vaatii työmaaorganisaatiolta selkeää vastuunjakoa ja kokonaisuuden ymmärrystä. Kriittisiissä töissä on työntekijöiden ammattitaito varmistettava. Rakennustyömaiden kosteusriskit on arvioitava tapauskohtaisesti ja merkittävimpien riskien poistaminen tai haltuunotto on tehtävä yhteistyössä eri alojen suunnittelijoiden kanssa. Eräs usein esiintyvä haaste on puutteellisesta suunnittelusta aiheutuvat virheelliset rakenneratkaisut. Työmaalle pitää siten vaatia riittävän yksityiskohtaiset suunnitelmat ja erityisesti muutostöiden yhteydessä on tarkasteltava muutoksen vaikutukset myös kosteuskulmasta.



Kuva 9.1.4 Puukerrostalon rakentamista sääsuojassa.

9.6 Laadunvarmistus

Hyvin suunniteltu on rakentamisessa hyvä alku – ei puoliksi tehty kuten vanha sanonta toteaa. Hyväkin suunnitelma voidaan valitettavasti tuhota toteutuksessa monin eri tavoin. Hyvä toteutus edellyttää useimmiten myös valvontaa – oikeammin laadunvarmistusta, joka toteuttajien osalta alkaa siitä, että he tietävät mitä ovat tekemässä ja mitä työltä edellytetään. Tähän kuuluu osaltaan myös rakenteiden ja rakennuksen kuivanapitoa edesauttavat toimet kuten suojuukset, mutta myös oikeat menetelmät.

Hyvä rakennustapa edellyttää, että suunnittelussa ja toteutuksessa

- esitetään rakenne- ja tuotantoratkaisut, jotka tuovat mahdollisimman vähän vettä työmaalle
- rakenteet on suunniteltu kestämään rakentamisaikaiset kosteusrasitukset
- on määritetty rakenteille sallitut olosuhteet ja menetelmät siihen pääsemiseksi
- otetaan huomioon rakennuksen varsinainen lämmitysjärjestelmän hyödyntäminen rakentamisen aikana
- otetaan huomioon työmaan olosuhteet ja käytetään rakenneratkaisuja, jotka mahdollistavat tehokkaan sääsuojuuksen, rakenteiden kuivana pidon ja rakennekosteuden poiston
- esitetään vaatimukset ja tarvittaessa ohjeet sääsuojuukselle

Rakennustuotannon kosteusteknisessä laadunvarmistuksessa on erityisesti:

- varmistettava kuivaketjun toimivuus: valmistus–kuljetus–varastointi–asennus–käyttö
- arvioitava suunnittelu- ja tuotantovalintojen riskit
- varmistettava suunniteltujen suojaus, lämmitys ja kuivatusmenetelmien käyttö ja huolto päivittäin, myös viikonloppujen ja lomien aikana
- varmistettava, että teollisuus toimittaa tuotteensa työmaalle kuivana ja että niiden välivarastointi on asiallinen
- tarkastettava vesieristeiden pohjien puhtaus (sementtiliiman poisto) sekä riittävä kuivuus. Myös muiden lattiapäällysteiden pohjien kuivuus on varmistettava mittaamalla.
- valvottava maakosteuden eristäminen rakenteista (kapillaarikatkot)
- tarkastettava höyrynsulun tiiviys ja mitattava vaipan ilmanpitävyys
- tarkastettava vesikaton läpimenojen kaulukset, nostot seinille sekä räystäiden myrskypellit ja lumen tuiskuamisen estäminen yläpohjiin
- varmistettava julkisivun tuuletusratkaisujen toimivuus ja huolellinen toteutus
- testattava märkätilojen kallistukset ja salaojien sekä mahdollisten perusvesipumppaamojen toiminta.

Jotta rakennustuotannossa kosteudenhallinnassa onnistuttaisiin tekemään laatuhyppy, on tehtävä uudenlaisia sopimuksia ja valvottava, että niistä pidetään kiinni. Osapuolten on yhteistyössä etsittävä uusia kuivan rakentamisen menetelmiä.

10 Yhteenveto

FRAME-tutkimuksen keskeisenä tavoitteena on ollut selvittää ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutuksia vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa Suomen ilmastossa. Tavoitteena on ollut myös selvittää millä rakenteellisilla tai muilla teknisillä ratkaisuilla vaipparakenteiden kosteusteknistä toimintaa voidaan parhaiten parantaa. Tutkimuksen muina tavoitteina on ollut selvittää ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutuksia vaipparakenteiden lämpöteknisessä toiminnassa, sisäilman olosuhteissa ja LVI-järjestelmien käytössä sekä laatia uusia ohjeistuksia rakennustyömaan kosteudenhallintaa varten. Tutkimuksessa on keskitytty tavanomaisten tai riskialttiiksi tiedettyjen rakenteiden toiminnan tarkasteluun.

Tutkimuksen yhteydessä Tampereen teknillisessä yliopistossa on saatu valmiiksi uusi rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmä, jolla voidaan aiempaa luotettavammin tarkastella rakenteissa ilmeneviä kosteusriskejä sekä nykyisessä että tulevaisuuden ilmastossa. Suurin osa tämän tutkimuksen tuloksista perustuu tällä menetelmällä tehtyihin laskentatarkasteluihin. Menetelmällä saatujen tulosten avulla rakenteet voidaan suunnitella jatkossa siten, että ne kestävät myös poikkeuksellisen rasittavien sääolojen vaikutukset muuttuvassa ilmastossa.

Tärkeä osa uutta analysointimenetelmää ovat ulkoilman rakennusfysikaaliset testivuodet Suomen ilmastossa. Nämä testivuodet määritettiin TTY:llä Ilmatieteen laitoksen mittaaman ja määrittämän säädatan avulla sekä nykyilmastossa että tulevaisuuden ilmastoissa (vuosien 2050 ja 2100 ilmastot). Jokaisesta ilmastosta määritettiin kaksi testivuotta, joiden avulla voidaan tarkastella lähes kaikkien vaipparakenteiden kosteusteknistä toimintaa kriittisissä kosteusolosuhteissa. Tulevaisuuden ilmastoista määritetyt testivuodet perustuvat A2-kasvihuonekaasuskenaarioon, jonka perusteella Ilmatieteen laitos on laatinut ennusteen ulkoilman olosuhteiden muuttumisesta.

Energiankulutustarkasteluissa käytettiin puolestaan energiankulutuksen testivuosia, joita on myös määritetty aikaisemmassa tutkimuksessa sekä nykyilmastossa että vuosien 2030, 2050 ja 2100 ilmastoissa (Jylhä et al. 2011a; Kalamees et al. 2012).

10.1 Vaipparakenteiden kosteustekninen toiminta

10.1.1 Betonirakenteet

Betonirakennuksissa julkisivut ja parvekkeet ovat alttiina ympäristön aiheuttamalle säärasitukselle ja tätä kautta rasitusten aiheuttamille erilaisille vaurioitumisilmiöille. Betonielementtirakennuksissa näitä rakenneosia ovat tyypillisesti sandwich-seinäelementtien betoniset ulkokuoret sekä parvekkeiden kaide-, laatta- ja pieliementit, joiden vaurioitumista

tarkasteltiin kuntotutkimusaineistosta koostuvan BeKo-tietokannan 1990 ja sitä uudempien kohteiden näytetiedoista.

Raudoitteiden näkyviin korroosioaurioihin kuluva aika koostuu karbonatisoitumisvaiheesta ja aktiivisen korroosion vaiheesta. Karbonatisoitumisen kannalta keskeisiä ovat rakenteen materiaaliominaisuudet sekä rakenteen saama kosteusrasitus. Alttiimpia karbonatisoitumiselle ovat betoniset parvekelaattojen alapinnat. Eroja esiintyy myös julkisivupinnoissa eri pintamateriaalien mukaan. Korroosion käynnistymiseen vaaditaan riittävän korkea betonin kosteus sekä hapen läsnäoloa. Ilmastonmuutoksen aiheuttaman sateisuuden kasvun havaittiin lisäävän vain jonkin verran raudoitteiden aktiivisen korroosion nopeutta. Raudoitteiden peitepaksuuden ollessa betoninormien vaatimalla tasolla (25 mm) näkyvät korroosioauriot ovat julkisivu- ja parvekerakenteissa harvinaisia. Liian lähelle (< 15 mm) ulkopintaa jääneissä betoniteräksissä korroosioaurioita tulee esiintymään tulevaisuudessa ennen kuin suunnitteluvaiheessa tavoiteltu käyttöikä on saavutettu.

Betonin pakkasrapautumiseen vaikuttavat ensisijaisesti valmistusvaiheessa betonin lisähuokostuksen onnistuminen sekä rakenteen käytön aikana vallitseva rasiustaso. Betonin lisähuokostuksen onnistuminen vaihtelee tutkimusaineistossa suuresti. Ilmastonmuutoksen seurauksen betonin märkänä tapahtuvan pakkasrasituksen suhteen olosuhteet helpottuvat rannikolla merkittävästi jo 2030. Sen sijaan sisämaassa olosuhteet pysyvät nykytasolla ja sateisuuden lisääntyessä vielä ankarampana lähes vuosisadan loppuun saakka. Betonin lisähuokostuksen epäonnistuminen johtaa pakkasrapautumiseen ennen tavoitellun käyttöiän päättymistä.

Valmistusvaiheessa raudoitteiden riittävät peitepaksuudet tulee varmistaa välikkein ja huolellisella asennustyöllä. Julkisivuissa on jo pitkään käytetty ruostumattomia raudoitteita ja niiden käyttöä tulee harkita myös kohteisiin, joissa vaadittavien peitepaksuuksien aikaansaaminen välikkeiden avulla on epävarmaa. Sadevettä hylkivillä mutta vesihöyryä läpäisevillä pinnoitteilla on mahdollista estää tai ainakin hidastaa merkittävästi raudoitteiden korroosiota karbonatisoituneessa betonissa. Vain ehjä pinnoite suojaa alla olevaa betonirakennetta, joten pinnoitetta on aktiivisesti huollettava. Betonin pakkasenkestävyyden suhteen nykyinen vaatimustaso on riittävä myös tulevaisuudessa. On kuitenkin huolehdittava siitä, että betonin lisähuokostus onnistuu aina. Parvekkeiden vedenpoiston toimivuuteen on kiinnitettävä huomiota sekä suunnittelussa, toteutuksessa että rakennuksen huoltamisessa. Esimerkiksi parvekelasitus vähentää tehokkaasti parvekkeelle tulevan viistosateen määrää. Betonin karbonatisoitumisen seurauksena raudoitteiden korroosio on ensimmäisenä mahdollista laatan alapinnan teräksissä. Korroosio ei kuitenkaan etene, mikäli rakenne pysyy kuivana.

Betonirakenteiden kosteusteknistä toimintaa tutkittiin lisäksi mallintamalla. Tarkasteluun valittiin betonisandwich-rakenne sekä eristerappaus betonirakenteen päällä. Mallinnusta tehtiin eri lämmöneristyspaksuuksilla nykyilmastossa sekä tulevaisuuden ilmastossa.

Normaalin käyttötilanteen lisäksi tutkittiin myös rakennusaikaisten olosuhteiden vaikutusta rakenteiden kosteustekniseen toimintaan.

Perinteinen betonisandwich-rakenne on normaaleissa käyttötilanteen olosuhteissa kosteusteknisesti toimiva niin nykyilmastossa kuin tulevaisuuden ilmastossakin. Rakennusaikainen kosteus voi kuitenkin nostaa rakenteessa vallitsevat olosuhteet kosteuden tiivistymisen sekä homehtumisen kannalta kriittiseen pisteeseen. Rakenteen kosteustekniseen toimintaan vaikuttaa erityisesti sandwich-elementissä käytetty lämmöneristetyyppi. Hyvin vesihöyryä läpäisevää mineraalivillaa käytettäessä suhteellinen kosteus on rakennusaikaisen kosteuden vaikutuksesta lämmöneristeen ulkopinnassa muutaman ensimmäisen tarkasteluvuoden aikana kosteuden kondensoitumisen ja homeen kasvun kannalta kriittisellä tasolla. Lämmöneristeen lisäys viilentää rakenteen ulko-osia, jolloin erityisesti kosteuden kondensoituminen lisääntyy. Mineraalivillaeristettä käytettäessä eristeen sisäpinnan olosuhteet eivät nouse kriittiselle tasolle lämmöneristeen suuresta vesihöyrynläpäisevyydestä johtuen. Solumuovilla eristetyissä rakenteissa kriittisin kohta on sen sijaan juuri lämmöneristeen ja sisäkuoren rajapinta. Vesihöyryä heikommin läpäisevä lämmöneriste rajoittaa kosteuden siirtymistä ulospäin, jolloin sisäkuoren kuivuminen hidastuu merkittävästi. Lämmöneristekerroksen paksuntaminen heikentää tilannetta, koska lämmöneristekerroksen vesihöyrynvastus kasvaa. Kaikissa tapauksissa rakenne kuitenkin kuivuu toimivaksi ja kun rakennusaikaisesta kosteudenhallinnasta huolehditaan, on rakenteen kosteustekninen toiminta riittävää niin nykyilmastossa kuin tulevaisuuden ilmastossakin.

Eristerappaus betonirakenteen päällä toimii kosteusteknisesti hyvin riippumatta käytetystä lämmöneristeestä tai rappausjärjestelmästä. Lämmöneristeen lisääminen ja/tai ilmastonmuutos eivät vaikuta merkittävästi rakenteen toimintaan. Rakennusaikaisen kosteuden kuivumisessa ero eri eristelaatujen välillä on käyttötilannetta merkittävämpi. EPS-eristettä käytettäessä rakenne kuivuu suurelta osin huoneilmaan, jonka takia rakenteen sisäpuolen pinnoitteen tulisikin olla hyvin vesihöyryä läpäisevä. Mineraalivillaa käytettäessä rakennekosteuden poistuminen on nopeampaa, koska avohuokoisessa eristeessä kosteus voi poistua tehokkaasti myös ulospäin. Sateisena kautena betonisen sisäkuoren ulkopinnassa ilmenee mineraalivillaeristeellä lievää kosteuden kondensoitumista, mutta siitä ei ole haittaa rakenteen toiminnalle. Betonilaadulla voidaan vaikuttaa kosteuden tasaantumiseen sisäkuoressa.

10.1.2 Rankarakenteiset puuseinät

Lämmöneristykseen lisääminen viilentää vaipparakenteiden ulko-osia, jolloin homeen kasvu ja kosteuden kondensoituminen niissä lisääntyvät. Ilmastonmuutos lisää tätä vaikutusta entisestään. Tuulensuojan lämmönvastusta lisäämällä voidaan parantaa rakenteen kosteusteknistä toimintaa. Laskelmien mukaisesti puuverhotussa puurunkoisissa seinärakenteissa käytetyn tuulensuojan tulisi olla pääsääntöisesti vähintään $0,2 \text{ m}^2\text{K/W}$, jotta rakenne toimisi kosteusteknisesti hyvin myös tulevaisuuden ilmastoissa.

Tiiliverhouksen suuri vedenimukyky, lämpökapasiteetti ja tuuletusvälissä virtaavan ilman pieni ilmanvaihtuvuus muodostavat tuuletusvälin sisäpuolelle homeen kasvulle otolliset olosuhteet jo nykyilmaston olosuhteissa. Matalan tiiliverhotun rankaseinän toimintaa voidaan parantaa käyttämällä seinärakenteessa tuulensuojana lämpöä eristävää tuulensuojaa, homeelle kestävämpää runkomateriaalia tai puurungon ulkopinnassa teräsrankaa. Hygrokalvo tiiliverhotun rankaseinän sisäpinnassa estää parhaiten kesäkondenssin aiheuttamaa homehtumisriskiä vuoden 2100 ilmastossa. Yli 10 metriä korkeissa tiiliverhotuissa seinissä homeen kasvu voidaan puolestaan estää vain käyttämällä tiiliverhouksen takana tiivistä vettä ja vesihöyryä pidättävää rakennekerrosta. Tällaisen rakennekerroksen ulko- ja sisäpuolelle on muodostettava tuulettuva ilmaväli, joka on päistään avoinna ulkoilmaan. Tällaisessa ratkaisussa ulkopuolelta diffuusiolla siirtyvän kosteuden liike estyy seinän sisempään osaan, jolloin rakenteen kosteustekninen toiminta paranee.

Puurunkoista rapattua seinärakennetta ei ole syytä tehdä Suomen ilmasto-olosuhteissa ilman tuuletusväliä. Eristerapatussa ohutrappauslaasteilla päällystetyssä seinässä rakenteen sisään voi kulkeutua suuriakin määriä kosteutta halkeamien ja liitosten kautta. Perinteinen kalkkisementtirappaus on taas voimakkaasti vettä imevä. Kosteus aiheuttaa eristerapatun seinän sisäosissa homeen kasvua rappausjärjestelmästä riippumatta. Levyrapattu, tuuletusvälillä varustettu seinärakenne toimii Suomen ilmasto-olosuhteissa selvästi paremmin. Levyrapatussa ulkoseinässä sateenpitävän vaipan muodostaa erillinen ulkoverhous, joka suojaa sisempää seinän osaa kastumiselta. Kosteusvaurioriski on tällä rakenteella selvästi pienempi, koska levyrappauksen takana oleva tuuletusväli riittää poistamaan ylimääräisen tuuletusväliin siirtyvän kosteuden.

10.1.3 Massiiviset rakenteet

Massiivirakenteet tulisi lämmöneristää aina ulkopuolelta hyvin vesihöyryä läpäisevällä lämmöneristeellä. Jos kuitenkin käytetään sisäpuolista lämmöneristettä, on massiivirakenteen sisäpuolelle laitettava riittävän tiivis höyrynsulku estämään sisäilmasta tuleva haitallinen diffuusio. Tähän sopii esimerkiksi riittävän vesihöyrytiivis lämmöneriste tai erillinen höyrynsulkukalvo.

Hirsirakenteita lisälämmöneristettäessä mineraalivillalla tai puukuitueristeellä lämmöneristeen paksuus vaikuttaa ratkaisevasti rakenteen kosteustekniseen toimintaan. Eristepaksuuden kasvaessa sisäilmasta diffuusiolla siirtyvän kosteuden merkitys kasvaa nopeasti niin suureksi, että rakenteen sisäpintaan tarvitaan tiivis höyrynsulkukalvo, joka vastaa vesihöyrynläpäisevyydeltään vähintään muovitiivistyspaperia. Ongelman suuruus korostuu hirsipaksuutta pienennettäessä tai tulevaisuuden ilmastoja tarkasteltaessa. Lämmöneristeen ulkopintaan asetetut ulkoilmaan avoimet tuuletusurat parantavat sen sijaan rakenteen kosteusteknistä toimintaa. Tärkeimpänä kriteerinä, jotta rakenteeseen ei muodostu homeen kasvua, on kuitenkin varmistuminen siitä, että hirsi on riittävän kuivaa ennen lämmöneristeen asentamista.

Kevytbetonirakenteissa ei käyttötilassa muodostu homeen kasvua eikä kosteuden kondenssia, kun sisäpuolisena lämmöneristeenä käytetään EPS-, XPS- tai kalsiumsilikaattieristeitä. Kevytbetonin harkkopaksuuden kasvaessa yli 100 mm homeindeksin maksimiarvot laskevat entisestään. Rakenteen kosteustekniseen toimintaan vaaditaan kevytbetonin ulkopintaan tiivis kerros, joka estää sadeveden tunkeutumisen rakenteeseen. Tällainen kerros on esimerkiksi sementtirappaus. Ennen lisälämmöneristeen asentamista kevytbetonirakenteen on annettava kuivua selvästi alle 97 % RH:ta vastaavaan kosteuteen, jos lämmöneristeenä käytetään solumuovieristeitä ja kevytbetonikerroksen paksuus on yli 100 mm.

10.1.4 Tuulettuva yläpohja ja ryömintätilainen alapohja

Tuulettuvan kattoristikkoylepohjan ja ryömintätilaisen alapohjan lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa selvitettiin kenttämittausten ja laskennallisten tarkastelujen avulla. Laskentamallien luotettavuutta arvioitiin mallintamalla kenttämittaustapauksissa esiintyneitä lämpö- ja kosteusolosuhteita sekä aikaisemmissa tutkimushankkeissa tehtyjä seinärakenteiden laboratoriotestejä. Laskentatulosten luotettavuuden kannalta vertailulaskelmien tekeminen oli erittäin hyödyllistä. Laskentamalleilla saadaan kuvattua rakenteiden kosteusteknistä toimintaa yleensä kohtuullisen hyvin, mutta toisaalta yksityiskohtaisten tulosten tarkkuudessa on vielä parannettavaa. Mallien toiminta arvioitiin kuitenkin sellaiseksi, että niitä voidaan käyttää rakenteiden kosteusteknisen toiminnan tarkasteluissa.

U-arvojen kiristäminen sekä ilmastonmuutos lisäsivät homeen kasvulle suotuisien olosuhteiden määrää ja siten myös heikensivät ylä- ja alapohjarakenteiden kosteusteknistä toimintaa. Ilmastonmuutoksen vaikutus kokonaisuutena oli suurempi kuin rakenteen U-arvon kiristämisen. U-arvon kiristämisen vaikutus oli tuulettuvissa yläpohjissa samaa suuruusluokkaa kuin siirtyminen nykyilmastosta vuoden 2050 ilmastoon. Rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa saadaan kuitenkin olennaisesti parannettua varmistamalla rakenteen ilmatiiviys, sisäpinnan riittävä vesihöyrynvastus sekä ulkopinnan lämmönvastus.

Rakenteiden ilmatilojen ilmanvaihtuvuuden merkitys oli suuri. Liian pieni tai suuri ilmanvaihtuvuus ei ollut tarkastelluille rakenteille hyväksi, vaan maltillinen ilmanvaihto (~0,5–1 1/h) oli useimmissa tapauksissa sopiva. Optimaalisen ilmanvaihdon määrittäminen rakenteiden suunnittelua varten tarvitsisi kuitenkin vielä jatkotutkimusta. Lisäksi on tärkeää muistaa, että kaikki laskentatarkastelut on tehty ideaalisille rakenteille. Rakenteiden suurempi kosteuskuormitus ilma- tai vesivuotojen seurauksena kasvattaa useimmissa tapauksissa optimaalisen ilmanvaihdon määrää.

Lämpöä eristävällä aluskatteella pystyttiin parantamaan tuulettuvan yläpohjan olosuhteita kaikissa tarkastelluissa tapauksissa. Aluskatteen lämmönvastuksen tulisi olla vähintään noin 0,4–0,6 m²K/W materiaalivalinnoista ja yläpohjan ilmanvaihtuvuudesta riippuen.

Maan vaikutus ryömintätilan olosuhteisiin on suuri. Maamassa rakennuksen alla viilentää ryömintätilaa kesällä, jolloin olosuhteet muuttuvat kriittisemmiksi. Alapohjan ilmatilan

olosuhteiden parantaminen asetettujen kriteerien mukaiselle tasolle edellyttäisi lämpimän alapohjan rakentamista. Kuitenkin jo pieni maanpinnan lämmöneristys auttaa vähentämään kaikkein kriittisimpien olosuhteiden esiintymistä ryömintätilaisessa alapohjassa, joten maanpinta olisi suositeltavaa lämmöneristää vähintään noin $1,4 \text{ m}^2\text{K/W}$ lämmönvastuksella. Puurakenteisen alapohjan kantavien rakenneosien alapuolelle tulisi asettaa hyvin lämpöä eristävä ($R \geq 0,4 \text{ m}^2\text{K/W}$) ja kosteutta kestävä tuulensuoja.

Ryömintätilaisen alapohjan ilmanvaihtuvuudessa on löydettävissä kaksi ääritapausta:

1) Maanpinta on kostea ja kosteustuotto siitä ryömintätilaan on suuri. Tällöin tulee minimoida pintavesien pääsy ryömintätilaan, huolehtia kapillaarikatkosta ja kasvattaa ryömintätilan ilmanvaihtuvuutta. Tällöin myös maanpintaan asennettu muovi vähentää maasta haihtuvan veden määrää ja parantaa alapohjarakenteen kosteusolosuhteita. Toisaalta muovin alle syntyy homeen kasvulle erittäin otolliset olosuhteet.

2) Maanpinta on riittävän kuiva tai se on peitetty muovilla tai solumuovilla. Tällöin ulkoilma on määrävä kosteuslähde ja ryömintätilan olosuhteet määräytyvät lämpötilan perusteella. Laskentatulosten perusteella pieni ilmanvaihdon kasvattaminen ei riitä kuitenkaan nostamaan ryömintätilan lämpötilaa riittävän korkealle, ja suurempi ilmanvaihto tuottaa ryömintätilaan samalla suuremman kosteuskuorman. Ryömintätilan olosuhteet paranevat ilmanvaihtoa pienennettäessä, kun haihtuminen maasta on estetty. Käytännössä ryömintätilaan kohdituu aina jonkin verran kosteuskuormaa, joten ilmanvaihtoa ei saa sulkea, vaikka maanpinta olisi lämpöeristetty ja kosteudentuottoa maasta ryömintätilaan olisi merkittävästi rajoitettu.

Pilariperusteisen tuulettuvan alapohjan kosteustekninen toiminta on lähellä ulkoseinän kosteusteknistä toimintaa. Pilarien välejä ei saa sulkea, vaan ilman tulee päästä virtaamaan vapaasti rakennuksen alle. Vettä ei saa valua rakennuksen alle. Vaikka pilariperusteista tuulettuvaa alapohjaa ei ole tässä tutkimuksessa tutkittu, niin todennäköisesti alapohjan ilmatilan korottaminen parantaa sen toimintaa.

Materiaalien homehtumisherkkyyden vaikutus tuloksiin on suuri. Homeen suhteen kestävien materiaalien olosuhteet voivat olla hyvinkin rankat, mutta silti laskennan tuloksena saatava homeindeksi on pieni. Tulee kuitenkin muistaa, että homeindeksi on kehitetty materiaalin pinnalla näkyvän homeen kasvulle, eikä se ota huomioon eri homelajeja tai niiden vaikutuksia sisäilman laatuun. Tästä syystä rakenteet on syytä suunnitella huolella kaikkia materiaaleja käytettäessä. Kosteusteknisesti hyvin toimivat rakenteet ovat olennainen osa laadukasta rakentamista ja hyvää rakennusten sisäilmaa.

10.1.5 Ikkunat

Ikkunan lämmöneristävyuden parantaminen lisää riskiä ikkunan ulkopinnan kondenssiin. Lämmöneristävyuden parantaminen vähentää sisätiloista ulos kulkeutuvan lämpövirran määrää ja alentaa tätä kautta ikkunan ulkopinnan lämpötilaa. Lisäksi ikkunan ulkopinnasta

taivaalle lähtevä pitkäaaltoinen lämpösäteily jäädyttää ulkopintaa, jolloin sen lämpötila voi laskea myös ulkoilmaa kylmemmäksi.

Ulkopinnan kondensoituminen ei vahingoita rakenteita, mutta haittaa näkyvyyttä ulos. Kondensoitumisriski kasvaa ikkunan U-arvon pienentyessä. Pienennettäessä U-arvoa arvosta 1,0 W/(m²K) arvoon 0,8 W/(m²K) vuosittaisten kondenssituntien määrä kasvoi laskentatarkastelussa hieman yli 50 tunnista hieman alle 200 tuntiin. Pienennettäessä U-arvoa edelleen arvoon 0,6 W/(m²K) kasvoi kondenssituntien määrää lähes 400 tuntiin vuodessa. Tutkittaessa kondensoitumisajankohtia havaittiin kondensoitumista eniten elo–lokakuun välisenä aikana pääasiassa keskiyön molemmin puolin.

Ikkunan edessä olevat esteet vaikuttavat ulkopinnasta lähtevän pitkäaaltoisen lämpösäteilyn määrään. Esteet rajoittavat ikkunan näkyvyyttä taivaalle ja näin ikkunan ulkopinta ei jäädy yhtä paljoa, kuin jos ikkunan edusta olisi täysin avoin. Esteiden vaikutusta tutkittiin muuttamalla ikkunan näkyvyyskerrointa taivaalle. Näkyvyyskerroimen muuttaminen arvosta 0,5 arvoon 0,4 vähensi kondenssitunteja yli puolella. Toinen kondensoitumisriskiä pienentävä tekijä on ulkopinnan alhainen emissiviteetti. Ulkopinnan emissiviteetin ollessa alle 0,4 ei kondensoitumisriskiä muodostu. Ulkopinnan selektiivipinnoitteen on kuitenkin havaittu heikentävän huomattavasti radiosignaalien läpäisyä, joten esimerkiksi matkapuhelimet ovat kärsineet kuuluvuusongelmista.

Laskentatarkastelu tehtiin nykyilmastolle, sillä ilmastonmuutoksen vaikutusten arviointi pitkäaaltoisen säteilyn muuttumiseen olisi ollut hankalaa. Ilmastonmuutoksen yhteydessä kuitenkin pilvisyyden ennustetaan lisääntyvän, jolloin ikkunoiden kondensoitumisriski pienenee ilmastonmuutoksen myötä.

10.2 Sisäinen konvektio vaipparakenteissa

Tehtyjen kokeiden perusteella sisäistä konvektiota tapahtuu paksuissa avojuoksisilla lämmöneristeillä toteutetuissa yläpohja- ja ulkoseinärakenteissa. Yläpohjarakenteissa sisäinen konvektio heikentää paksujen puhalluseristeillä toteutettujen rakenteiden lämmöneristystä merkittävästi. 600 mm paksussa eristekerroksessa sisäinen konvektio voi lisätä lämpövirtaa yläpohjan läpi jopa 30–50 %. Ulkoseinärakenteissa sisäisen konvektion vaikutus on selvästi vähäisempi, esimerkiksi 300 mm paksussa eristekerroksessa se on tyypillisesti n. 10 %. Yläpohjarakenteiden osalta on kuitenkin huomattava, että sisäisen konvektion mittausjärjestelyjen toteuttaminen todellisuutta vastaavalla tavalla on haasteellista ja siksi niiden osalta on tarpeellista tehdä lisätutkimusta, jotta koetulosten tarkkuutta voitaisiin parantaa.

Tehtyjen kokeiden perusteella nykyinen RakMK C4 (2012):n laskentaohje ei ota sisäisen konvektion vaikutusta riittävästi huomioon yläpohjarakenteissa. Myöskään RIL 225 (2005):ssä annettu sisäisen konvektion huomioon ottava lisäysterimi ei ota konvektion

vaikutusta kaikissa tapauksissa riittävästi huomioon. Kokeiden perusteella RakMK C4 (2012):ssa esitetyn modifioidun Rayleighin luvun raja-arvon tulisi olla sekä tuulensuojatulla että suojaamattomalla yläpohjarakenteella enintään 5, jotta sisäinen konvektio ei heikentäisi merkittävästi puhalluseristeiden lämmönvastusta. Ulkoseinärakenteiden osalta RakMK C4 (2012):n laskentaohjeen raja-arvot ovat riittävät.

Paras tapa vähentää puhalluseristeissä tapahtuvaa sisäistä konvektiota on pienentää eristeen ilmanläpäisevyyttä. Tämä voidaan tehdä kasvattamalla eristeen tiheyttä ja/tai lisäämällä eristeen joukkoon sideainetta. Yläpohjarakenteissa sisäisen konvektion vaikutusta voidaan vähentää myös asettamalla puhalluseristeen alle rakenteen sisäpintaan 100 mm paksuinen levyeriste tai korvaamalla puhalluseriste kokonaan levyeristeellä. Sen sijaan tuulensuojan laitto paksun, hyvin ilmaa läpäisevän eristekerroksen päälle ei pienennä sisäisen konvektion vaikutusta merkittävästi. Sisäisen konvektion kompensoiminen lämmöneristettä lisäämällä ei ole puolestaan taloudellisesti järkevää, koska eristekerroksen paksuntaminen lisää konvektion vaikutusta entisestään. Tällöin myös lisäkerroksen eristyskyky heikkenee merkittävästi.

Ulkoseinärakenteissa sisäisen konvektion rajoittaminen rakenteellisilla ratkaisuilla ei ole tarpeellista tavanomaisilla eristemateriaaleilla ja rakennepaksuuksilla. Puhalluseristeet tulisi kuitenkin puhaltaa riittävän suureen tiheyteen, jotta eristeessä ei tapahtuisi merkittävää painumaa ajan kuluessa. Lisäksi puhalluseristeitä käytettäessä seinän yläosaan olisi suositeltavaa jättää mahdollisuus myöhemmin tehtävää lisätäyttöä varten.

10.3 Rakennusten energiankulutus ja sisäilmasto

Rakennusten termisen mallinnusohjelman IDA-ICE 4 avulla tutkittiin rakennusten vaipan lämmöneristystason sekä termisen massan vaikutuksia tyypillisen suomalaisen pientalon, kerrostalon ja toimistorakennuksen energiatehokkuuteen nykyisissä ilmasto-oloissa sekä A2-kasvihuonekaasuskenaarion mukaisissa vuosien 2050 ja 2100 ilmastoissa. Tutkimuksessa selvitettiin myös ilmastonmuutoksen vaikutuksia rakennusten kesäaikaisiin lämpöoloihin, ja kuinka tehokkaasti lämpöoloja pystytään hallitsemaan erilaisten passiivisten jäähdytysratkaisujen sekä vapaajäähdytysratkaisujen avulla nykyisissä ja tulevaisuuden ilmasto-oloissa. Tutkimuksessa selvitettiin lisäksi, kuinka ilmastonmuutos sekä talotekniset järjestelmät vaikuttavat rakennusten sisäilman kosteuteen.

Rakennusten lämmitystarve vähenee tuntuvasti ja jäähdytystarve kasvaa merkittävästi kuluvan vuosisadan aikana Etelä-Suomessa, mikäli A2-kasvihuonekaasuskenaario toteutuu. Rakennusten ulkoseinien, yläpohjan ja alapohjan lämmöneristäminen RakMK C3 (2010) normitasoa paremmaksi parantaa kerrostalon ja toimistorakennuksen energiatehokkuutta niin vähän, ettei sitä voida pitää kannattavana energiansäästöratkaisuna. Pientalossa vaipan lämmöneristämällä RakMK C3 (2010) normitasoa paremmaksi saavutetaan selvästi enemmän energiansäästöä ja sitä voidaan pitää yhtenä varteenotettavana energiansäästöratkaisuna käytetystä lämmitysjärjestelmästä riippuen. Lämmöneristykseen

vaikutus rakennusten ostoenergiankulutukseen on sitä pienempi, mitä energiatehokkaampaa lämmitysjärjestelmää rakennuksessa käytetään.

Tutkittujen vaipan osien lämmöneristystason lisäämisellä saavutettava energiansäästö tulee ilmastonmuutoksen myötä pienenevään, koska erityisesti talvien ennustetaan lämpenevän voimakkaammin kuin muiden vuodenaikojen. Tutkittujen vaipan osien lisäeristäminen RakMK C3 (2007) normitasoa paremmaksi lisää tilojen jäähdystarvetta. Rakennuksen jäähdystarve tulee kuitenkin kattaa ensisijaisesti muilla kuin koneellisilla jäähdystyratkaisuilla, esimerkiksi auringon varjostusratkaisuilla.

Rakennusten lämmitys- ja jäähdystarvetta voidaan vähentää hyödyntämällä rakenteiden termistä massaa. Rakenteiden termisen massan prosentuaalinen vaikutus rakennusten lämmitys- ja jäähdystarpeeseen vaihtelee varsin paljon ja on tapauskohtainen, koska sen vaikutus riippuu rakenteiden lisäksi mm. rakennusten lämpökuormien ja häviöiden suhteesta. Termisen massan tuoma energiansäästö tulee ilmastonmuutoksen myötä hieman pienenevään, mikäli A2-kasvihuonekaasuskenaario toteutuu, ellei termisen massan energiateknistä toimintaa tehosteta esimerkiksi tehostetulla yötuuletuksella. Kaikkiaan termisen massan hyödyntämisen merkitys yksittäisenä energiansäästökeinona on melko pieni tutkituissa rakennuksissa riippumatta siitä, käytetäänkö rakennuksissa tehostettua yötuuletusta tai koneellista jäähdystystä.

Rakennusten kesäaikainen yllälämpeneminen lisääntyy ilmastonmuutoksen myötä, ellei rakennusten jäähdystyratkaisuihin kiinnitetä nykyistä enemmän huomiota jo rakennusten suunnitteluvaiheessa. Tällöin ikkunoiden pinta-alaan, suuntaukseen ja varjostusratkaisuihin tulisi kiinnittää erityistä huomiota. Kesäaikainen lämpöolojen hallinta tulee tehdä ensisijaisesti rakenteellisia ratkaisuja, passiivisia jäähdystyratkaisuja tai vapaajähdystyratkaisuja käyttäen ja koneellista jäähdystystä tulee käyttää vasta tarvittaessa.

Rakennusten sisäilman kosteus tulee hieman kasvamaan ilmastonmuutoksen myötä ja se tulee ottaa huomioon kondensoimattomien jäähdystyratkaisujen suunnittelussa ja mitoituksessa erityisesti silloin, kun ilmanvaihdon tuloilmaa ei kuivateta esim. kondensoivalla jäähdystyratkaisumallilla.

10.4 Rakennusaikainen kosteudenhallinta

Rakennustyömaan kosteuden hallinnan tarpeet, vaatimukset ja keinot vaihtelevat rakennusvaiheesta ja rakentamisen ajoituksesta sekä rakenteista riippuen. Kosteuden hallintaan ei ole yhtä oikeaa ratkaisumallia, jollei sellaiseksi lasketa aina pätevää: ”Pidetään rakenteet kuivina”.

Kosteusteknisesti hallittu rakennustuotanto edellyttää teollisuuden, suunnittelijoiden ja työmaiden välistä yhteistyötä ja uusien kosteusteknisesti turvallisten rakenneratkaisujen kehittämistä sekä käytännössä toimivia suojausmenetelmiä. Kosteuden hallintaan on olemassa

menetelmiä ja ratkaisuja, mutta niiden käyttöönotto ja asiallinen käyttö vaativat asennemuutoksen rakennushankkeen kaikilta osapuolilta.

Rakennushankkeeseen ryhtyvän tulee määrittää rakennustuotannon kosteudenhallinnan taso suunnitteluohjeissa ja sopimusasiakirjoissa. Jo hankeaikataulun laadinnassa ja varsinkin sen noudattamisessa on suunniteltava ne keinot, joilla estetään hankkeen siirtyminen epädullisempaan vuodenaikaan. Vaihtoehtoisesti on otettava huomioon, että rakentamisen menetelmät ovat hyvin erilaisia eri vuodenaikoina. Keskeisiä rakentamisen kosteuden hallinnan tasoon vaikuttavia tekijöitä ovat rakentamisen ajankohta, aikataulu, rakenneratkaisut, materiaalivalinnat ja sääsuojauksen toteutustavat.

Suunnittelu- ja urakkasopimuksilla määritetään reunaehdot kosteuden hallinnalle. Tilaaja antaa suunnittelijoille suunnitteluohjeet. Suunnitteluohjeissa tulee esittää kosteudenhallinnan vaatimukset tuotteelle ja toteutuksen reunaehdot, mitä nykyisin hyvin harvoin tapahtuu. Suunnittelijoiden tulee yhteisissä palavereissaan käsitellä tilaajan esittämät kosteuden hallinnan vaatimukset ja sopia yhteisesti käytettävät menetelmät. Suunnittelijoiden on suunniteltava runko- ja eristysrakenteet kestäväksi myös rakentamisen aikainen kosteusrasitus.

Rakennustuotannossa on runsaasti rakenteiden ja materiaalien kastumiseen liittyviä riskejä. Rakennustyömailla tulee siirtyä vallitsevana käytäntönä olevasta kosteudenhallinnasta työmaan kuivanapitoon. Työmaan kuivanapito sisältää valumavesien pääsyn estämisen rakenteisiin ja materiaaleihin, materiaalien suojauksen sadevesiltä, suojausmenetelmät, rakennekosteuden poistamisen sekä olosuhteiden valvonnan. Nämä ratkaisut on suunniteltava ja kuivanapidon suunnitelman toteuttaminen on vastuutettava. Aikataulujen sekä toteutusta varten tehtävien aliurakkasopimusten ja suunnitelmien tulee sisältää myös kuivanapidon ja kosteudenhallinnan kannalta keskeiset asiat.

Jotta rakennustuotannossa kosteudenhallinnassa onnistuttaisiin tekemään laatuhyppy, on tehtävä uudenlaisia sopimuksia ja valvottava, että niistä pidetään kiinni. Osapuolten on yhteistyössä etsittävä uusia kuivan rakentamisen menetelmiä.

Lähteet

- Achermann, M. & Zweifel, G. 2003. RADTEST – Radiant heating and cooling test cases, Subtask C, A report of IEA Task 22, Building Energy Analysis Tools.
- Adelard, L., Pignolet-Tardan, T., Mara, T., Lauret, P., Garde, H. & Boyer, H. 1998. Sky temperature modelisation and applications in building simulation. *Renewable Energy*, Vol. 15, pp. 418-430.
- Aho, H., Korpi, M. (toim.), Vinha, J., Lindberg, R., Mattila, J., Lahdensivu, J., Hietala, J., Suonketo, J., Salminen, K. & Lähdesmäki, K. 2009. Ilmanpitävien rakenteiden ja liitosten toteutus asuinrakennuksissa. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Rakennetekniikka, Tutkimusraportti 141. 100 s.
- Alakulju, A., Kehityspäällikkö. Saint-Gobain Weber Oy. Puhelinkeskustelu 6.8.2012.
- Alonso, C., Andrade, C., Rodriguez, J. & Diez, J. M. 1998. Factors controlling cracking of concrete affected by reinforcement corrosion. *Materials and Structures*. Vol. 31, pp. 435-441.
- Andrade, C. 2002. Measurement of R_p on-site, In Weydert, R., (ed.) Corrosion of steel in reinforced concrete structures. Final reports of single projects 1997-2002. Luxembourg University of Applied Sciences. Pp. 88-104.
- Arfvidsson, J. 1998. Moisture transport in porous media. modelling based on kirchhoff potentials. PhD thesis, Lund University.
- Arfvidsson, J., & Harderup, L. 2008. Fuktsäkerhet i kalla vindsutrymmen. slutrapport. No. TVBH-3050. Lund University.
- Arvela, H., Mäkeläinen, I., Holmgren, O. & Reisbacka, H. 2010. Radon uudisrakentamisessa. Otantatutkimus 2009. Säteilyturvakeskus STUK. Raportti STUK-A244. ISBN 978-952-478-532-7. 63 s. + 31 liites.
- Arvela, H., Holmgren, O. & Reisbacka, H. 2012. Asuntojen radonkorjaaminen. Säteilyturvakeskus STUK. Raportti STUK-A252. ISBN 978-952-478-701-7. 138 s. + 3 liites.
- ASHRAE 160. 2009. Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings. American society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 14 p.
- Asumisterveysohje 2003. Sosiaali- ja terveysministeriö. Helsinki. 88 s.
- Bakker, R. 1988. Initiation period. In Schiessl, P. (ed.) Corrosion of steel in concrete. London. Chapman and Hall. Pp. 22-55.

BBR 19. 2011. Boverkets föreskrifter om ändring i verkets byggregler 2011:6 – föreskrifter och allmänna råd. Boverket. 158 s.

Bergström, B. & Samuelsson, S. 1985. Kryprumsgrundläggning i trähus. Träteknikrapport 65. Trätek, Stockholm.

Best, A. C. 1950. The size distribution of raindrops, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 76 (327), pp. 16-36.

Blocken, B. & Carmeliet, J. 2002. Spatial and temporal distribution of driving rain on a low-rise building. Pre-print. *Wind and structures*, Vol. 5 (5), pp. 441-462.

Blocken, B. & Carmeliet, J. 2004. A review of wind-driven rain research in building science. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, Vol. 92, pp. 1079-1130.

Blocken, B. & Carmeliet, J. 2006a. On the validity of the cosine projection in wind-driven rain calculations on buildings. *Building and Environment*, Vol. 41, pp. 1182-1189.

Blocken, B. & Carmeliet, J. 2006b. The influence of the wind-blocking effect by a building on its wind-driven rain exposure. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, Vol. 94, pp. 101-127.

Blocken, B. & Carmeliet, J. 2007. On the errors associated with the use of hourly data in wind-driven rain calculations on building facades. *Atmospheric Environment*. Vol. 41 (11), pp. 2335-2343.

Blocken, B. & Carmeliet, J. 2010. Overview of three state-of-the-art wind-driven rain assessment models and comparison based on model theory. *Building and Environment* Vol. 45, pp. 691-703.

Blom, P. 2001. Venting of attics and pitched, insulated roofs. *Journal of Building Physics*, Vol. 25, pp. 32-50.

Boverket 2009. Så mår våra hus. Redovisning av regeringsuppdrag beträffande byggnaders tekniska utformning m.m. Boverket. 125 s.

Boverket 2010a. God bebyggd miljö – förslag till nytt delmål för fukt och mögel. Resultat om byggnaders fuktskador från projektet BETSI. Boverket. 133 s.

Boverket 2010b. Teknisk status i den svenska bebyggelsen – resultat från projektet BETSI. Boverket. 167 s.

Bring, A., Sahlin, P. & Vuolle, M. 1999. Models for Building Indoor Climate and Energy Simulation. A Report of IEA SHC Task 22. Building Energy Analysis Tools, Subtask B, Model Documentation. KTH Royal Institute of Technology, Building Sciences, Sweden.

Brutsaert, W. 1982. Evaporation into the atmosphere, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 299 p.

BY 50. 2012. Betoninormit. 4. tarkistettu painos. Suomen Betoniyhdistys ry. 251 s.

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

BY 201. 1999. Betonitekniikan oppikirja. 4. tarkistettu painos. Helsinki, Suomen Betoniyhdistys ry. 556 s.

Choi, E. C. C. 1991. Numerical simulation of wind-driven rain falling onto a 2-D building. Proceedings of Asia Pacific Conference on Computational Mechanics, Hong Kong, pp. 1721-1728.

Choi, E. C. C. 1993. Simulation of wind-driven rain around building. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics 46 & 47, pp. 721-729.

Choi, E. C. C. 1994. Determination of wind-driven rain intensity on building faces. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics. Vol. 51, pp. 55-69.

Ciucasu, C., Gilles, J., Montoya, E. & Arquís, E. 2005. Convection phenomena in Loose-fill Attics. Saint-Gobain Insulation. Ranska. 8 s. http://web.byv.kth.se/bphys/reykjavik/pdf/art_080.pdf [viitattu 2.8.2012].

Clementz, C., Nore, K., Steiner, Y., Glasö, G., Eide, S., Bysheim, K. & Brunsell, J. T. 2011. ENTRÉ – energieffektive trekonstruksjoner. Delrapport 2 – Yttervegger I tre som kan tilfredsstillere passivhuskrav. Norsk Treteknisk Institutt. 132 s.

Concerted Action EPBD (Energy Performance of Buildings Directive). <http://www.epbd-ca.eu/country-information> [viitattu 20.8.2012].

Comark Instruments. Diligence EV data loggers datasheet. Hertfordshire, UK. <http://www.comarkltd.com/pdf/n2000-datalogger-datasheet.pdf> [viitattu 28.5.2013].

Datenbank für Passivhaus Projekte. Passivhaus Dienstleistung GmbH, IG Passivhaus Deutschland und iPHA International Passive House Association. <http://www.passivhausprojekte.de/projekte.php> [viitattu 20.8.2012].

Delmas, A. & Arquís, K. E. 1995. Early initiation of natural convection in an open porous layer due to the presence of solid conductive inclusions. Journal of Heat Transfer, Vol. 117, pp. 733-739.

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

Ding, A. N. & Lee, Y. 1972. Terminal fall speeds of raindrops. *Journal of applied meteorology* 1972, Vol. 11, pp. 877-879.

Djebbar, R., Van Reenen, D. & Kumaran, M.K. 2001. Environmental Boundary Conditions for Long-term Hygrothermal Calculations. *Proceedings of the Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings VIII: Integration of Building Envelopes, Clearwater Beach, Florida, USA, December 2–7. Session IIA, 13 p.*

Elmroth, A. 1975. *Kryprumsgrundläggning, Rapport R12:1975, Institutionen för byggnadsteknik, KTH, Stockholm. 170 s.*

Equa Simulation. <http://www.equa-solutions.co.uk/> [viitattu 5.6.2013].

Erkkilä, J., Laatu-päällikkö, Parma Oy. Forssa. Puhelinkeskustelu 24.10.2012.

Essah, E. A. 2009. Modelling and measurements of airflow and ventilation within domestic pitched roofs. PhD thesis, Glasgow Caledonian University.

EURIMA. 2007. U-values in Europe, Sustainable buildings. European Insulation Manufacturers Association. <http://www.eurima.org/u-values-in-europe/> [viitattu 20.8.2012].

Fagerlund, G. 1977. The critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete. Tentative RILEM recommendation. Prepared on behalf of RILEM Committee 4 CDC. *Materiaux et Constructions*, no 58, pp. 217-229.

Geving, S. 1997. Moisture design of building constructions: Hygrothermal analysis using simulation models, Part I and Part II. PhD thesis. Trondheim, Norwegian University of Science and Technology, Department of Building and Construction Engineering. 138 p. + papers and reports.

Gjørsv, O. E. 2009. Durability design of concrete structures in severe environments. Taylor & Francis. 220 p.

Grunewald, J. 1997. Diffusiver und konvektiver Stoff- und Energitransport in kapillarporösen Baustoffen. Doktor-Ingenieur Dissertation. Dresden, Technischen Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwissen, Institut für bauklimatik, Dresdner Bauklimatische Hefte, Heft 3. 177 p. + app. 17 p.

Grunewald, J. & Nicolai, A. 2006. Delphin 5 User manual and program reference. TU Dresden. 113 p.

Gunn, R. & Kinzer, G. D. 1949. The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air. *Journal of meteorology*, Vol. 6, pp. 243-248.

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

Hagentoft, C-E. 2010. Probabilistic analysis of hygrothermal conditions and mould growth potential in cold attics. impact of weather parameters, building systems and construction design characteristics. working paper to IEA annex 55 copenhagen meeting. Chalmers University of Technology.

Harderup, E. 1998. Metoder att välja korrektioner vid fuktberäkningar med variabelt utomhusklimat. PhD thesis. Lund, Lund University, Department of Building Physics. Report TVBH-1011. 242 s.

Harderup, L-E. & Arfvidsson, J. 2008. Fuktsäkerhet i kalla vindutsrymmen. Rapport TVBH-3050 Lund. Avdelningen för Byggnadsfysik, Lund Tekniska Högskolan. 49 s.

Hemmilä, K. & Heimonen, I. 1997. Kondenssi ikkunoiden ulkopintaan. Lasirakentaja 1/97.

Hoppestad, S. 1955. Slagregn i Norge (in Norwegian). Norwegian Building Research Institute, rapport Nr. 13, Oslo.

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

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

Hägerstedt, S. O. 2012. Fuktsäkra träkonstruktioner. Vägledning för utformning av träbaserade väggar. Rapport TVBH-3052. Avdelningen för Byggnadsfysik, Lund Tekniska Högskolan. 75 s.

Ilmatieteen laitos, Ilmasto-opas, Kartat, kuvaajat ja datat. <http://ilmasto-opas.fi/fi/datat/mennyt-ja-tuleva-ilmasto> [viitattu 23.7.2012].

Ilmatieteen laitos. 2007. Maailmanlaajuisiin ilmastomalleihin perustuvia lämpötila- ja sademääräskenaarioita. ACCLIM-hankkeen verkkojulkaisu. 20 s. http://cdn.fmi.fi/legacy-fmi-fi-content/documents/acclim_ltila_sadeskenaariot_verkko.pdf [viitattu 10.6.2013]

Incropera, F. P. & DeWitt, D. P. 2002. Fundamentals of heat and mass transfer. 5th ed. John Wiley and Sons. 981 p.

International Passive House Association. <http://www.passivehouse-international.org/> [viitattu 20.8.2012].

ISO 8301. 1991. Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Heat flow meter apparatus. International Organization for Standardization. 37 p.

ISO 9053. 1991. Acoustics - Materials for acoustical applications - Determination of airflow resistance. International Organization for Standardization. 9 p.

Janssen, H., Blocken, B., Roels, S. & Carmeliet, J. 2007. Wind-driven rain as a boundary condition for HAM-simulations: Analysis of simplified modelling approaches. *Building and Environment*, Vol. 42, 1555-1567

Jansson, A. 2011. Putsade regelväggar 2011. Erfarenheter från undersökningar som SP har utfört. SP Rapport 2011:61, Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Borås. 79 s.

Johansson, P. 2009. Roof constructions with controlled and natural ventilation. MSc Thesis, Chalmers University of Technology.

Jokisalo, J. & Kurnitski, J. 2005. Effect of the thermal inertia and other building and HVAC factors on energy performance and thermal comfort in Finnish apartment buildings. Report B79. LVI-tekniikan laboratorio. Espoo 2005. 59 s.

Jokisalo, J. & Kurnitski, J. 2007. Performance of EN ISO 13790 Utilisation Factor Heat Demand Calculation Method in a Cold Climate, *Energy and Buildings*, Vol. 39 (2), pp. 236-247.

Jokisalo, J., Kurnitski, J., Korpi, M., Kalamees, T. & Vinha, J. 2009. Building leakage, infiltration, and energy performance analyses for Finnish detached houses. *Building and Environment*, Vol. 44 (2), pp. 377-387.

Jonsson, B. 1999. Calculating the occurrence of external condensation on high-performance windows. Borås, SP Technical Research Institute of Sweden. *Building Physics*, SP AR 1999:40. 16 p.

Jylhä, K., Ruosteenoja, K., Räisänen, J., Venäläinen, A., Tuomenvirta, H., Ruokolainen, L., Saku, S. & Seitola, T. 2009. Arvioita Suomen muuttuvasta ilmastosta sopeutumistutkimuksia varten. ACCLIM-hankkeen raportti 2009. Ilmatieteen laitos. Raportteja 2009:4. 102 s.

Jylhä K., Kalamees T., Tietäväinen H., Ruosteenoja K., Jokisalo J., Hyvönen R., Ilomets S., Saku S. & Huttila A. 2011a. Rakennusten energialaskennan testivuosi 2012 ja arviot ilmastonmuutoksen vaikutuksista, Ilmatieteen laitos, Raportteja No. 2011:6, Helsinki.

Jylhä, K., Ruosteenoja, K. & Tietäväinen, H. 2011b. Rakennusfysiikan ilmastollisten testivuosien sääaineistot nykyisessä ilmastossa ja arviot tulevaisuuden muutoksista. Väliraportti. Helsinki. Ilmatieteen laitos. 6 s. + 21 liites.

Kalamees, T., Jylhä, K., Tietäväinen, H., Jokisalo, J., Ilomets, S., Hyvönen, R. & Saku, S. 2012. Development of weighting factors for climate variables for selecting the energy reference year according to the EN ISO 15927-4 standard. *Energy and Buildings*, Vol. 47, pp. 53-60.

Kalamees, T. & Vinha, J. 2003. Hygrothermal calculations and laboratory tests on timber-framed wall structures. *Building and Environment*, Vol. 38, pp. 689-697.

Kangas, M., Hippi, M., Ruotsalainen, J., Näsman, S., Ruuhela, R., Venäläinen, A. & Heikinheimo, M. 2006. The FMI Road Weather Model. HIRLAM All Staff Meeting, Sofia, Bulgaria, 15-18 May 2006. HIRLAM Newsletter no. 51, October 2006.

Karagiozis, A. 2005. Hygrothermal performance study (experimental & modeling) phase 2. Oak Ridge, Tennessee: BTC/ORNL.

Knauf Aquapanel Outdoor, Asennus ja saumaus. <http://www.knauf.fi/asennus/aquapanel/aquapanel-outdoor> [viitattu 24.5.2013].

Kohonen, R., Kokko, E., Ojanen, T. & Virtanen, M. 1985. Thermal effects of air flows in building structures. Research reports 367. Technical Research Centre of Finland, Laboratory of Heating and Ventilating. 81 p.

Kokko, E., Ojanen, T. & Salonvaara, M. 1997. Uudet vaipparakenteet. energian säästö ja kosteustekniikka No. VTT Tiedotteita 1869. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus.

Kurnitski, J., Pasanen, P., Matilainen, M., Hyttinen, M. & Asikainen, V. 1999. Ryömintätilan kosteus ja mikrobit. Kevytsora-, sepeli- ja kuivauskoneratkaisu. Mikrobit ryömintätilassa ja asuinnoissa. Raportti B62. Teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto, LVI-tekniikan laboratorio, Espoo.

Künzel, H. 1995. Simultaneous heat and moisture transport in building components. one- and two-calculation using simple parameters.

Laamanen, P. 2012. Liiketoiminta-alueen johtaja, Vahanen-yhtiöt. Puhelinkeskustelu 2.11.2012.

Lacy, R. E. 1965. Driving-rain maps and the onslaught of rain on buildings. RILEM/CIB Symposium on Moisture problems in Buildings, Rain Penetration. Vol. 3, paper 3-4, Helsinki. August 16-19.

Lacy, R. E. 1977. Climate and building in Britain, Her Majesty's Stationery Office, London.

Lahdensivu, J. 2012. Durability properties and actual deterioration of Finnish concrete facades and balconies. DSc thesis. Tampere, Tampere University of Technology. Publication 1028. 117 p. + app. 37 p.

Lahdensivu, J., Suonketo, J., Vinha, J., Lindberg, R., Manelius, E., Kuhno, V., Saastamoinen, K., Salminen, K. & Lähdesmäki, K. 2012. Matala- ja passiivitalojen rakenteiden ja liitosten suunnittelu- ja toteutusohjeita. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, tutkimusraportti 160. 121 s. + 1 liites.

- Lahdensivu, J., Tietäväinen, H. & Pirinen, P. 2011. Durability properties and deterioration of concrete facades made of insufficient frost resistant concrete. *Nordic Concrete Research*. 2/11, Publication no. 44, pp. 175-188.
- Lahdensivu, J, Varjonen, S. & Köliö, A. 2010. BeKo – Betonijulkisivujen ja -parvekkeiden korjausstrategiat. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, tutkimusraportti 148. 79 s.
- Langlais, C., Arquis, E. & McCaa, D. J. 1990. A Theoretical and Experimental Study of Convective Effects in Loose-Fill Thermal Insulation, *Insulation materials: Testing and Applications*, ASTM STP 1030, Philadelphia, pp. 290-318.
- Laukkarinen, A. 2012. Comparison of calculated and measured values of wall assembly tests using delphin 5. BSc thesis, Tampere University of Technology.
- Laukkarinen, A. 2013. Tuulettuvan yläpohjan lämpö- ja kosteustekninen toiminta nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Diplomityö. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. (julkaistaan 2013)
- Laukkarinen, A. & Vinha, J. 2011. Comparison of measured and calculated values of wall assembly tests using delphin 5. *Proceedings of the 9th Nordic Symposium on Building Physics*, Tampere.
- Litvan, G. 1972. Phase transitions of adsorbates IV – Mechanism of frost action in hardened cement paste. *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 55 (1), pp. 38-42.
- Lylykangas, K. & Nieminen, J., 2009. Passiivitalon määritelmä. Ohjeita passiivitalon arkkitehtisuunnitteluun. http://www.passiivi.info/download/passiivitalon_maaritelma.pdf [viitattu 20.8.2012].
- Matala, S. 1991. Betonin rakenne ja vaurioituminen. RIL K145-1991. Betonirakenteiden säilyvyys, vauriot ja korjaaminen. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL, s. 13-38.
- Mattila, J. 2003. On the durability of cement-based patch repairs on Finnish concrete facades and balconies. Tampere, Tampere University of Technology. Publication 450. 111 p.
- Moinard, S. & Guyon, G. editors. 1999. Empirical validation of EDF ETNA and GENEC test-cell models, Subtask A.3, A Report of IEA Task 22, Building Energy Analysis Tools.
- Mäkitalo, M. 2012. Puurunkoisten ulkoseinien kosteustekninen toimivuus nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Diplomityö. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto. 134 s. + 37 liites.
- Nield, D. A. & Bejan, A. 2006. *Convection in porous media*. 3rd edition. Springer Science + Business Media Inc. 233 Spring Street, New York, NY-10013, USA. 640 p.

- Niemelä, J., Asp, A. & Sydorov, Y. 2012. Radiosignaalin vaimennusmittauksia nykyaikaisissa asuintaloissa. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto. Tietotekniikan laitos, Tutkimusraportti 2012:1. 65 s.
- Nik, V. M. 2012. Assessment of hygrothermal performance and mould growth risk in ventilated attics in respect to possible climate changes in Sweden. *Building and Environment*, Vol. 55, pp. 96-109.
- Nilsson, L., & Harderup, L. 2002. SBUF-projekt: Fuktdimensionering - utveckling av krypgrunden, No. SBUF nr 11148.
- North Pass, Promotion of Very Low-Energy House Concept to the North European Building Market. <http://northpass.ivl.se/> [viitattu 20.8.2012].
- Nurmi, S. 2012. Massiivirakenteen sisäpuolisen lisälämmöneristämisen vaikutus rakenteen kosteustekniseen toimintaan. Diplomityö. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto. 125 s.
- Page, C. L. 1988. Basic Principles of Corrosion, In: Schiessl, P. (ed.), *Corrosion of Steel in Concrete*, London, Chapman and Hall. Pp. 3-21.
- Pakkanen, T. 2012. Yläpohjan lämmöneristeen luonnollinen konvektio ja sen vaikutus lämmönläpäisykykyyn. Kokeellinen tutkimus. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. 57 s. + 150 liites.
- Paroc Oy, rapattu ulkoseinä, ohutrappaus. <http://www.paroc.fi/ratkaisut-tuotteet/ratkaisut/ulko-ja-valiseinat/rapattu-ulkoseina-ohutrappaus> [viitattu 24.5.2013].
- Parrott, L. J. 1987. Review of carbonation in reinforced concrete. Cement and Concrete Association. Wexham Springs. 42 p.
- Pentti, M. & Hyypöläinen, T. 1999. Ulkoseinäarakenteiden kosteustekninen suunnittelu. Rakennustekniikan osasto, talonrakennustekniikka. Julkaisu 94. Tampereen teknillinen korkeakoulu. 150 s. + 40 liites.
- Pentti, M., Mattila, J. & Wahlman, J. 1998: Betonijulkisivujen ja parvekkeiden korjaus, Osa I: Rakenteet, vauriot ja kunnan tutkiminen. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Talonrakennustekniikka. Julkaisu 87. 157 s.
- PEP. Promotion of European Passive Houses. <http://erg.ucd.ie/pep> [viitattu 20.8.2012].
- Pessi, A.-M., Suonkento, J., Pentti, M. & Rantio-Lehtimäki, A. 1999. Betonielementti-julkisivujen mikrobiologinen toimivuus. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Rakennustekniikan osasto. Julkaisu 101. 88 s. + 6 liites.

Rakennusfysiikan ilmastolliset testivuodet. 2013. <http://ilmatieteenlaitos.fi/rakennusfysiikan-ilmastolliset-testivuodet> [viitattu 5.6.2013]

Rakennusten energialaskennan ilmastolliset testivuodet. 2013. <http://ilmatieteenlaitos.fi/rakennusten-energiialaskennan-testivuosi> [viitattu 5.6.2013]

RakMK C2. 1998. Kosteus, määräykset ja ohjeet 1998. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Helsinki, Ympäristöministeriö.

RakMK C3. 2003. Rakennuksen lämmöneristys, määräykset 2003. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Helsinki, Ympäristöministeriö.

RakMK C3. 2007. Rakennuksen lämmöneristys, määräykset 2007. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Helsinki, Ympäristöministeriö.

RakMK C3. 2010. Rakennuksen lämmöneristys, määräykset 2010. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Helsinki, Ympäristöministeriö.

RakMK C4. 2003. Lämmöneristys, ohjeet 2003. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Helsinki, Ympäristöministeriö.

RakMK C4. 2012. Lämmöneristys, ohjeet 2012. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Helsinki, Ympäristöministeriö. (luonnos 16.3.2012).

RakMK D3. 2012. Rakennusten energiategokkuus, määräykset ja ohjeet 2012. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Helsinki, Ympäristöministeriö.

RakMK D5. 2012. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta, ohjeet 2012. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Helsinki, Ympäristöministeriö. (luonnos 14.3.2012)

Raunama, T., 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, s. 143-148.

RIL 66. 1969. Asuinrakennusten lämmöneristysnormit. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Helsinki.

RIL 107-2012. 2012. Rakennuksen veden- ja kosteudeneristysohjeet. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Helsinki.

RIL 225-2004. 2005. Rakennusosien lämmönläpäisykertoimien laskenta, ohje standardien SFS-EN ISO 10456 ja SFS-EN ISO 6946 soveltamiseen. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Helsinki.

RIL 249-2009. 2009. Matalaenergiarakentaminen, Asuinrakennukset. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Helsinki.

RIY A43. 1962. Asuinrakennusten lämmöneristysnormit. Rakennusinsinööriyhdistys, Helsinki. 29 s.

Rose, W. B. & TenWolde, A. 2002. Venting of attics & cathedral ceilings. ASHRAE Journal, pp. 26-33.

RT 38099. 2011. Fenestra-ikkunat, Polaris, Primus, Plano, Fenix ja Primus Kiinteä. Fenestra Oy.

RT 81-11099. 2012. Radonin torjunta. Rakennustieto Oy.

Rode, C. 1993. Reference years for moisture calculations. Denmark. Internal Report T2-DK-93/02, International Energy Agency, Energy Conservation in Buildings and Community Systems Program, Annex 24 Heat, Air and Moisture Transfer in Insulated Envelope Parts (HAMTIE).

Rotronic AG. 2009–2012a. Hygroclip 2 (HC2) humidity temperature probes: User guide.

Rotronic AG. 2009–2012b. HygroLog HL-NT data logger instruction manual (v2.12 ed.). Bassersdorf, Switzerland. <http://www.rotronic-usa.com/man/airchip3000/hl-nt/IN-E-HL-NT-V2.pdf> [viitattu 28.5.2013].

Rubel, F. & Kotteck, M. 2010. Observed and projected climate shifts 1901-2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification. Meteorologische Zeitschrift, Vol. 19, No. 2, p. 135-141.

Ruosteenoja, K., Jylhä, K., Mäkelä, H., Hyvönen, R., Pirinen, P. & Lehtonen, I. 2013. Rakennusfysiikan testivuosisien sääaineistot havaitussa ja arvioidussa tulevaisuuden ilmastossa. REFI-B-hankkeen tuloksia. Raportteja 2013:1. Helsinki, Ilmatieteen laitos. 48 s.

Saari, A., Jokisalo, J., Keto, M., Alanne, K., Niemi, R., Lund, P. & Paatero, J. 2010. Kestävä Energia - Loppuraportti. Aalto-yliopiston teknillinen korkeakoulu. TKK rakenne- ja rakennustuotantotekniikan laitoksen julkaisuja B:24, Espoo 2010.

Saint-Gobain Weber Oy, Serpomin-eristerappaus. <http://www.e-weber.fi> [viitattu 21.8.2012].

Salonvaara, M., Sedlbauer, K., Holm, A. & Pazera, M. 2010. Effect of Selected Weather Year for Hygrothermal Analyses. Proceedings of the Performance of Exterior Envelopes of Whole

Buildings XI: Integration of Building Envelopes, Clearwater Beach, Florida, USA, December 2–7. Session IIA, 13 p.

Samuelsson, I. 1998. Hygrothermal performance of attics. *Journal of Building Physics*, Vol. 22, pp. 132-146.

Samuelson, I., Mjörnell, K. & Jansson, A. 2007. Fuktskador i putsade, odränerade träregelväggar – lägesrapport oktober 2007. SP Rapport 2007:36, Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Borås. 18 s.

Samuelson, I. & Jansson, A. 2009. Putsade regelväggar. SP Rapport 2009:16, Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Borås. 100 s.

Sanders, C. H. 1982. Air movement in houses, a new approach. *Building Research and Practice*. Pp. 160-175.

Sanders, C. 1996. IEA Annex 24: Task 2: Environmental Conditions. Leuven, Acco, International Energy Agency, Energy Conservation in Buildings and Community Systems, Heat, Air and Moisture Transfer in Insulated Envelope Parts (HAMTIE), Final Report, Vol. 2. 96 p.

Sanders, C. & Haig, J. 2004. Heat, air and moisture transport through cold pitched roofs. CIB Glasgow Meeting.

Sandin, K. 1991. Skalmurskonstruktionens fukt- och temperaturbetingelser. Rapport R43:1991 Bygghälsöversynsgruppen, Stockholm, Sverige. 107 s.

Scheffler, G. A. 2008. Validation of hygrothermal material modelling under consideration of the hysteresis of moisture storage. PhD thesis, Dresden University of Technology. 236 p.

Scripps Institution of Oceanography and NOAA Earth Systems Research Laboratory. Atmospheric CO₂ at Mauna Loa Observatory. <http://www.ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/ilmio/-/artikkeli/1e92115d-8938-48f2-8687-dc4e3068bdbd/hiilidioksidi-ja-hiilen-kiertokulku.html> [viitattu 10.8.2012].

SFS-EN ISO 6946. 2008. Rakenne- ja rakennusosat. Lämmönvastus ja lämmönläpäisykerroin. Laskentamenetelmä. Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 31 s.

SFS-EN ISO 8990. 1996. Thermal insulation. Determination of steady-state thermal transmission properties. Calibrated and guarded hot box. Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 24 s.

SFS-EN ISO 10211. 2008. Thermal bridges in building construction. Heat flows and surface temperatures. Detailed calculations. Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 29 s. + 16 liites.

SFS-EN ISO 10456. 2008. Rakennusaineet ja -tuotteet. Lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet. Taulukoidut suunnitteluarvot ja menetelmät ilmoitetun lämpöteknisen arvon ja lämpöteknisen suunnitteluarvon määrittämiseksi. Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 25 s.

SFS-EN ISO 13786. 2008. Thermal performance of building components. Dynamic thermal characteristics. Calculation methods. Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN ISO 13788. 2013. Hygrothermal performance of building components and building elements. Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation. Calculation methods. Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN ISO 15148. 2002. Hygrothermal performance of building materials and products. Determination of water absorption coefficient by partial immersion. Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 12 s. + 4 liites.

SFS-EN ISO 15927-3. 2009. Hygrothermal performance of buildings. Calculation and presentation of climatic data. Part 3: Calculation of driving rain index for vertical surfaces from hourly wind and rain data. Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN ISO 15927-4. 2005. Hygrothermal performance of buildings. Calculation and presentation of climatic data. Part 4: Hourly data for assessing the annual energy use for heating and cooling. Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

Shankar, V. & Hagentoft, C-E. 2000. A Numerical study of Effect of natural convection on thermal properties on horizontal oriented porous insulation. Journal of thermal env.&bldg. sci., Vol 24, 13 p.

Sisäilmayhdistys ry, sisäilmasto, fysikaaliset tekijät. http://www.sisailmayhdistys.fi/portal/terveelliset_tilat/sisailmasto/fysikaaliset_tekijat [viitattu 18.6.2012].

Straube, J. F. 1998. Moisture control and enclosure wall systems. Ph.D. thesis, Civil Engineering, University of Waterloo, Ontario, Canada. 318 p.

Straube, J. & Burnett, E. 1997. Driving rain and masonry veneer. ASTM Symposium on water leakage through building facades, Orlando, March 17 1996. Special technical publication, ASTM STP 1314, Philadelphia 1997, pp. 73-87.

Straube, J. F. & Burnett, E. F. P. 2000. Simplified prediction of driving rain on buildings. Proc. of the international building physics conference, Eindhoven, The Netherlands, 18-21 September 2000, pp. 375-382.

Straube, J. & Finch, G. 2009. Ventilated Wall Claddings: Review, Field Performance, and Hygrothermal Modeling. Research Report – 0906. 25 p.

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.

Svensson, C. 2001. Effekter av åtgärder i utluftsventilerade krypgrunder med fukt- och mögelskador. Rapport TVBH-3038 Lund 2001 Avdelningen för Byggnadsfysik, LTH. 148 s.

Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut. <http://www.smhi.se/klimatdata> [viitattu 23.7.2012].

Thullner, K. 2010. Low-Energy Buildings in Europe – Standards, Criteria and Consequences. Lunds Universitet. http://www.ebd.lth.se/fileadmin/energi_byggnadsdesign/images/Publikationer/Katharina_Thullner.pdf [viitattu 20.8.2012].

Tilastokeskus. 2012a. Energian hankinta ja kulutus [verkkojulkaisu]. ISSN=1799-795X. Helsinki. http://www.stat.fi/til/ehk/2011/04/ehk_2011_04_2012-03-22_kuv_014_fi.html [viitattu 27.2.2013].

Tilastokeskus. 2012b. Energian hinnat 3/2012 [verkkojulkaisu]. ISSN=1799-7984. Helsinki. [viitattu 20.12.2012].

Travesi, J., Maxwell, G., Klaassen, C. & Holtz, M. 2001. Empirical validation of Iowa energy resource station building energy analysis simulation models, IEA Task 22, Subtask A.

Tuutti, K. 1982. Corrosion of steel in concrete. Stockholm. Swedish Cement and Concrete Research Institute. CBI Research 4:82. 304 p.

Uvsløkk S., Skogstad, H. B. & Grynning, S. 2010. How to prevent natural convection causing extra heat loss and moisture problems in thick insulation layers. 3rd Nordic Passive House Conference 2010 – Towards 2020 Sustainable Cities and Buildings. Aalborg University Press. 6 s.

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

Viitanen, H. 1996. Factors affecting the development of mould and brown decay in wooden material and wooden structures, Effect of humidity, temperature and exposure time. PhD Thesis. Uppsala, The Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Products. 58 p. + appendices.

Viitanen, H. & Ojanen, T. 2007. Improved model to predict mould growth in building materials. Proceedings. Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings X. Clearwater Beach, USA, 2-7 Dec. 2007. ASHRAE, DOE, ORNL. Atlanta, USA. 10 p.

Vinha, J. 1998. Rakenteiden lämmönläpäisyominaisuuksien mittauslaitteisto. Lisensiaatintutkimus. Tampere. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Rakennustekniikan osasto. 106 s. + 17 liites.

Vinha, J., Käkelä, P. & Kalamees, T. 2003. Puurunkoisten seinärakenteiden kosteusteknisen toiminnan vertailu omakotitalossa. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto. Tutkimusraportti 116.

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

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

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

Vinha, J. & Käkelä, P. 2007. Puurunkoisten ulkoseinien kosteustekninen toiminta Suomen ilmasto-olosuhteissa. Acta Universitatis Ouluensis C 264: Heikkilä, J. & Koiso-Kantila, J. (toim.), Patinoituu ja paranee – moderni puukaupunki -tutkijakoulu 2003-2006. Oulu, Oulun yliopisto, s. 100-122.

Vinha, J. & Lähdesmäki, K. 2008. Termo- ja MSE-ikkunan lämpötila- ja kosteusolosuhteiden seurantamittaus kerrostalohuoneistossa. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos, Tutkimusselostus TRT/1684/2008. 43 s.

Vinha, J., Korpi, M., Kalamees, T., Jokisalo, J., Eskola, L., Palonen, J., Kurnitski, J., Aho, H., Salminen, M., Salminen, K. & Keto, M. 2009. Asuinrakennusten ilmanpitävyys, sisäilmasto ja energiatalous. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Rakennetekniikka, Tutkimusraportti 140. 148 s. + 19 liites.

Vinha, J., Viitanen, H., Lähdesmäki, K., Peuhkuri, R., Ojanen, T., Salminen, K., Paajanen, L., Strander, T. & Iitti, H. 2013. Rakennusmateriaalien ja rakenteiden homehtumisriskin laskennallinen arviointi. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Rakennetekniikka. Tutkimusraportti 143. (julkaistaan 2013)

Wahlgren P. 2001. Convection in Loose-fill Attic Insulation. PhD thesis. Chalmers University of Technology, Department of Building Physics.

- Wahlgren, P. 2005. Variation in outset of natural convection in loose-fill attic insulation due to geometry and materials. Chalmers University of Technology. Göteborg. Article. 8 p. http://web.byv.kth.se/bphys/reykjavik/pdf/art_085.pdf
- Walker, I. S. & Forest, T. W. 1995. Field measurements of ventilation rates in attics. *Building and Environment*, Vol. 30, pp. 333-347.
- Walker, I. S., Forest, T. W. & Wilson, D. J. 2005. An attic-interior infiltration and interzone transport model of a house. *Building and Environment*, Vol. 40, pp. 701-718.
- Werner, A. 2007, External Water Condensation and Angular Solar Absorptance - Theoretical Analysis and Practical Experience of Modern Windows. Dissertation. Uppsala. Uppsala University. Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 283. 132 p.
- WHO 2009. WHO Handbook on Indoor Radon. A Public Health Perspective. World Health Organization. Edited by Hajo Zaeb and Ferid Shannoun. ISBN 978-92-4-154767-3
- Wilkes, K. E., Wendt, R. L. & Childs, P. W. 1991. Thermal performance of one loose-fill fiberglass attic insulation, *Insulation materials: Test and application*, Vol. 2, ASTM STP 1116, Philadelphia, pp. 275-291.
- Woloszyn, M. & Rode, C. 2008a. Modelling Principles and Common Exercises, Annex 41 Subtask 1, International Energy Agency. 234 p.
- Woloszyn, M. & Rode, C. 2008b. Tools for performance simulation of heat, air and moisture conditions of whole buildings. *Building Simulation*. Pp. 5-24.
- Åberg, O. 1999. Åtgärder mot fukt i krypgrunder, Fuktsäkerhet I byggnader. T9:1999, Byggeforskningsrådet. Stockholm. 40 s.

Liitteet

- Liite 1 WUFI-ohjelmassa käytetyt materiaaliominaisuudet (7 sivua)
- Liite 2 Delphin-ohjelmassa käytetyt materiaaliominaisuudet (21 sivua)
- Liite 3 Testivuosien valinnassa käytetyt rakennetyypit (3 sivua)
- Liite 4 Rakennusfysikaaliset testivuodet (10 sivua)
- Liite 5 Eri maiden U-arvotasoihin liittyvää lainsäädäntöä ja standardeja (2 sivua)

Liite 1 WUFI-ohjelmassa käytetyt materiaaliominaisuudet

(1/7)

Materiaalien perusarvot

Nro	Materiaali	Tiheys [kg/m ³]	Huokoisuus [m ³ /m ³]	Ominaislämpö- kapasiteetti [J/(kg·K)]	Lämmön- johtavuus [W/(m·K)]	Vesihöyryn diffuusio- vastuskerroin [-]
A1	Tuulensuojakipsilevy 9 mm	774	0.68	1100	0.19	7.9
A2	Huokoinen puukuitulevy 25 mm	280	0.85	1500	0.050	4.6
A3	Tuulensuojamineraalivilla	73	0.94	850	0.031	1.4
A11	Havuvaneri 9 mm	394	0.65	1500	0.11	232 ¹⁾
A13	Huokoinen puukuitulevy 12 mm	270	0.85	1500	0.048	5.5
B1	Tuulensuojalaminaatti 1 mm	360	0.001	1500	0.2	87
B2	Diffuusioavoin tuulensuojakalvo 1 mm	250	0.60	1500	0.2	35 ¹⁾
C1	Kipsilevy 13 mm	574	0.77	1100	0.19	6.9
C11	Höyrynsulkumuovi 1 mm	980	0.001	2300	0.4	89000
C13	Mänty	532	0.90	2700	0.1	84
D1	Lasivilla	22	0.98	850	0.035	1.2
D2	Kivivilla	37	0.97	850	0.034	1.2
D4	Puukuitueriste	37	0.97	2000	0.038	1.3
P1	PU	39	0.95	1500	0.024	185
P2	XPS	60	0.95	1500	0.037	150
P3	EPS 1	15	0.40	1300	0.039	30
P4	EPS 2	30	0.95	1500	0.036	60
K1	Kevytbetoni	500	0.80	1050	0.15	13.1
K2	Kalsiumsilikaatti	300	0.842	1162	0.062	4.6
K3	Betoni 1	2300	0.18	850	1.6	130
K4	Betoni 2	2220	0.18	850	1.6	248
K5	Tiili	1430	0.30	900	0.45	12
R1	Sementtilaasti	1800	0.30	850	1.2	20
R2	Jalolaasti KS 50/50/600	1600	0.24	850	1.0	12
R3	Täyttölaasti KS 35/65/500	1800	0.24	850	1.0	13
R4	Pohjalaasti KS 20/80/500	1800	0.24	850	1.0	15
R5	Oikaisu- ja täyttölaasti KS 25/75/500	1800	0.24	850	1.0	15
R6	Täyttölaasti KS 65/35/600	1600	0.24	850	1.0	10
R7	Tartuntalaasti KS 35/65/400	1700	0.24	850	1.0	18
R8	Kuituvahvisteinen KS-laasti	1500	0.24	850	1.0	16
R9	Pintalaasti KS 65/35/600	1500	0.24	850	1.0	15
R11	Ohutrappauslaasti S #0-1 mm	2000	0.30	850	1.2	20
M1	Hiertopinnoite S #0-1 mm	2000	0.30	850	1.2	17
M2	Silikonihartsipinnoite	2000	0.44	1000	0.7	90
M3	Silikonihartsimaali	2000	0.44	1000	0.7	46
E1	Sementtipohjainen rappauslevy	1150	0.67	850	0.36	66
E2	Magnesiumoksidilevy	1050	0.30	850	0.139	22
E3	Kuitusementtilevy	1450	0.30	900	0.3	99.2
F1	Hygrokalvo	83	0.111	1800	1.0	5100 ¹⁾

¹⁾ Kuivan olosuhteen arvo. Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin on suhteellisesta kosteudesta riippuva (ks. liite 1, sivu 7/7).

Liite 1 WUFI-ohjelmassa käytetyt materiaaliominaisuudet

(2/7)

Tasapainokosteuskäyrät 1/2

A1	Tuulensuojakipsilevy 9 mm	RH [%]	0	33	55	65	75	80	83	86	93	97	100						
		w [kg/m ³]	0	6.1	8.4	9.0	9.5	10.8	11.5	13.5	18.2	23.8	500						
A2	Huokoinen puukuitulevy 25 mm	RH [%]	0	33	55	65	75	80	83	86	93	97	100						
		w [kg/m ³]	0	12.3	20.0	24.1	28.2	35.7	40.2	47.6	64.8	74.8	140						
A3	Tuulensuojamineraalivilla	RH [%]	0	33	55	65	75	80	83	86	93	97	100						
		w [kg/m ³]	0	0.51	0.58	0.60	0.62	0.91	1.1	1.6	2.9	3.3	4.1						
A11	Havuvaneri 9 mm	RH [%]	0	33	55	65	75	80	83	86	93	97	100						
		w [kg/m ³]	0	22.9	31.0	43.2	55.4	67.5	74.7	86.4	114	126	590						
A13	Huokoinen puukuitulevy 12 mm	RH [%]	0	33	55	65	75	80	83	86	93	97	100						
		w [kg/m ³]	0	12.4	19.6	22.4	25.2	33.6	38.7	45.9	62.7	71.3	210						
C1	Kipsilevy 13 mm	RH [%]	0	33	55	65	75	80	83	86	93	97	100						
		w [kg/m ³]	0	4.6	6.3	6.7	7.1	8.0	8.6	10.1	13.5	17.7	371						
C13	Mänty	RH [%]	0	33	55	65	75	80	83	86	93	97	100						
		w [kg/m ³]	0	32.3	45.0	62.6	80.1	97.5	108	126	169	185	870						
D1	Lasivilla	RH [%]	0	33	55	65	75	80	83	86	93	97	100						
		w [kg/m ³]	0	0.45	0.54	0.66	0.78	0.98	1.1	1.3	1.9	2.4	45						
D2	Kivivilla	RH [%]	0	33	55	65	75	80	83	86	93	97	100						
		w [kg/m ³]	0	0.15	0.23	0.33	0.43	0.53	0.59	0.62	0.69	0.93	45						
D4	Puukuitueriste	RH [%]	0	33	55	65	75	80	83	86	93	97	100						
		w [kg/m ³]	0	1.9	3.1	4.0	4.8	6.1	6.8	8.6	12.9	15.2	440						
P1	PU	RH [%]	0	35	50	70	80	90	98	100									
		w [kg/m ³]	0	0.12	0.16	0.16	0.18	0.27	0.38	45									
P2	XPS	RH [%]	0	35	50	70	80	90	98	100									
		w [kg/m ³]	0	0.14	0.17	0.2	0.21	0.28	0.36	45									
P3	EPS 1	RH [%]	0	35	50	70	80	90	95	97	100								
		w [kg/m ³]	0	0.12	0.16	0.16	0.18	0.27	0.38	0.48	45								
P4	EPS 2	RH [%]	0	35	50	70	80	90	98	100									
		w [kg/m ³]	0	0.12	0.16	0.16	0.18	0.27	0.38	45									
K1	Kevytbetoni	RH [%]	0	20	70	88	97	100											
		w [kg/m ³]	0	17	20	50	100	200											
K2	Kalsiumsilikaatti	RH [%]	0	43.2	75.4	84.7	96	97.4	99	99.7	100								
		w [kg/m ³]	0	17.4	18.9	20.7	26.6	35.2	173	384	793								
K3	Betoni 1	RH [%]	0	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	95	100			
		w [kg/m ³]	0	27	32	34	35	37	40	48	58	72	85	100	118	150			
K4	Betoni 2	RH [%]	0	33	43	63	80	83	93	100									
		w [kg/m ³]	0	37	38	65	75	76	104	147									
K5	Tiili	RH [%]	0	11.3	22.8	32.8	43.2	57.6	75.2	84.3	90	96	96.9	99	99.3	99.7	99.8	99.9	100
		w [kg/m ³]	0	1.37	1.6	1.99	3.91	5.91	10.3	15.9	18.6	26.4	33.3	75.3	103	143	172	209	262
R1	Sementtirappaus	RH [%]	0	10	20	30	40	50	55	60	65	70	75	80	85	90	91	92	93
		w [kg/m ³]	0	1.11	2.48	4.22	6.51	9.66	11.7	14.2	17.4	21.5	27.1	35	47.1	68.1	74.3	81.5	90.1
		RH [%]	94	95	96	97	98	99	100										
		w [kg/m ³]	100	113	129	150	178	218	280										
R2	Jalolaasti KS 50/50/600	RH [%]	0	50	80	90	99	99.9	100	100	100								
		w [kg/m ³]	0	30	45	65	95	110	140	200	210								
R3	Täyttölaasti KS 35/65/500	RH [%]	0	50	80	90	99	99.9	100	100	100								
		w [kg/m ³]	0	30	45	65	95	110	140	200	210								
R4	Pohjalaasti KS 20/80/500	RH [%]	0	50	80	90	99	99.9	100	100	100								
		w [kg/m ³]	0	30	45	65	95	110	140	200	210								
R5	Oikaisu- ja täyttölaasti KS 25/75/500	RH [%]	0	50	80	90	99	99.9	100	100	100								
		w [kg/m ³]	0	30	45	65	95	110	140	200	210								
R6	Täyttölaasti KS 65/35/600	RH [%]	0	50	80	90	99	99.9	100	100	100								
		w [kg/m ³]	0	30	45	65	95	110	140	200	210								
R7	Tartuntalaasti KS 35/65/400	RH [%]	0	50	80	90	99	99.9	100	100	100								
		w [kg/m ³]	0	30	45	65	95	110	140	200	210								
R8	Kuituvahvisteinen KS-laasti	RH [%]	0	50	80	90	99	99.9	100	100	100								
		w [kg/m ³]	0	30	45	65	95	110	140	200	210								

Liite 1 WUFI-ohjelmassa käytetyt materiaaliominaisuudet

(3/7)

Tasapainokosteuskäyrät 2/2

R9	Pintalaasti KS 65/35/600	RH [%]	0	50	80	90	99	99.9	100	100	100									
		w [kg/m ³]	0	30	45	65	95	110	140	200	210									
R11	Ohutrappauslaasti S #0-1 mm	RH [%]	0	50	80	90	95	98	100											
		w [kg/m ³]	0	10	35	70	110	180	280											
M1	Hiertopinnoite	RH [%]	0	50	80	90	95	98	100											
		w [kg/m ³]	0	10	35	70	110	180	280											
M2	Silikonihartsipinnoite	RH [%]	0	10	20	30	40	50	55	60	65	70	75	80	85	90	91	92	93	
		w [kg/m ³]	0	0.08	0.18	0.31	0.49	0.73	0.89	1.09	1.35	1.7	2.18	2.9	4.09	6.45	7.22	8.19	9.42	
		RH [%]		94	95	96	97	98	99	100										
		w [kg/m ³]		11.1	13.3	16.6	21.9	32	58.4	300										
M3	Silikonihartsimaali	RH [%]	0	10	20	30	40	50	55	60	65	70	75	80	85	90	91	92	93	
		w [kg/m ³]	0	0.99	2.22	3.79	5.85	8.7	10.6	12.9	15.8	19.5	24.7	32	43.4	63.5	69.6	76.7	85.2	
		RH [%]		94	95	96	97	98	99	100										
		w [kg/m ³]		95.6	109	125	147	178	224	300										
E1	Sementtipohjajien rappauslevy	RH [%]	0	10	20	30	40	50	55	60	65	70	75	80	85	90	91	92	93	
		w [kg/m ³]	0	0.57	1.27	2.16	3.32	4.89	5.91	7.16	8.71	10.7	13.3	17	22.4	31.4	33.9	36.8	40.1	
		RH [%]		94	95	96	97	98	99	100										
		w [kg/m ³]		44.1	48.7	54.4	61.3	70.1	81.5	97										
E2	Magnesiumoksidilevy	RH [%]	0	33	55	65	75	80	83	86	93	97	1							
		w [kg/m ³]	0	27.3	44.3	56.1	67.8	126.0	161.0	180.0	222.0	271.0	280.0							
E3	Kuitusementtilevy	RH [%]	0	33	55	65	75	80	83	86	93	97	1							
		w [kg/m ³]	0	27.3	44.3	56.1	67.8	126.0	161.0	180.0	222.0	271.0	280.0							
F1	Hygrokalvo	RH [%]	0	0.1	0.3	0.5	0.65	0.8	0.9	0.93	0.95	0.99	1	1	1	1				
		w [kg/m ³]	0	1.4	1.8	2.2	2.8	3.5	4.7	5.4	6.1	11.2	24.4	30.1	45.9	110				

Liite 1 WUFI-ohjelmassa käytetyt materiaaliominaisuudet

(4/7)

Kosteusdiffusiviteetit 1/2

Nro.	Materiaali	w [kg/m ³]	DWS [m ² /s]	DWW [m ² /s]
A1	Tuulensuojakipsilevy 9 mm	0	0	0
		10.8	1.02E-10	1.02E-10
		500	8.78E-08	8.78E-09
A2	Huokoinen puukuitulevy 25 mm	0	0	0
		35.7	2.82E-12	2.82E-12
		140	4.85E-09	4.85E-10
A11	Havuvaneri 9 mm	0	0	0
		67.5	7.60E-12	7.60E-12
		590	5.28E-09	5.28E-10
A13	Huokoinen puukuitulevy 12 mm	0	0	0
		33.6	4.17E-12	4.17E-12
		210	1.38E-09	1.38E-10
C1	Kipsilevy 13 mm	0	0	0
		8	1.85E-10	1.85E-10
		371	1.59E-07	1.59E-08
C13	Mänty	0	0	0
		62.6	1.32E-13	1.32E-13
		870	8.03E-11	8.03E-12
D4	Puukuitueriste	0	0.00E+00	0.00E+00
		6.1	1.18E-10	1.18E-10
		440	1.07E-07	1.07E-08
K1	Kevytbetoni	0	0.00E+00	0.00E+00
		30	2.30E-09	2.30E-09
		200	8.00E-07	8.00E-08
K2	Kalsiumsilikaatti	0	0.00E+00	0.00E+00
		6.1	1.18E-10	1.18E-10
		440	1.07E-07	1.07E-08
K3	Betoni 1	0	0.00E+00	0.00E+00
		72	7.40E-11	7.40E-12
		85	2.50E-10	2.50E-10
		100	1.00E-09	1.00E-10
		118	1.20E-09	1.30E-10
K4	Betoni 2	0	1.00E-09	2.00E-11
		29	4.00E-09	4.00E-11
		72	1.00E-08	6.00E-11
		100	1.50E-08	4.00E-10
		116	2.00E-08	8.00E-10
		130	3.00E-08	8.00E-09
		147	3.00E-07	1.00E-07
K5	Tiili	0	0.00E+00	0.00E+00
		13	3.10E-09	2.00E-10
		262	2.20E-06	3.00E-07
R1	Sementtirappaus	0	0	0
		35	9.00E-12	9.00E-12
		280	1.20E-09	1.20E-10
R2	Jalolaasti KS 50/50/600	0	0	0
		45	4.20E-10	4.20E-10
		210	9.60E-08	9.60E-09
R3	Täyttölaasti KS 35/65/500	0	0	0
		45	4.20E-10	4.20E-10
		210	9.60E-08	9.60E-09

DWS = kapillaarivirtauksen kosteusdiffusiviteetti

DWW = kosteusdiffusiviteetti kapillaarisesti siirtyvän kosteuden uudelleenjakaantumiselle materiaalissa

Liite 1 WUFI-ohjelmassa käytetyt materiaaliominaisuudet

(5/7)

Kosteusdiffusiviteetit 2/2

Nro.	Materiaali	w [kg/m ³]	DWS [m ² /s]	DWW [m ² /s]
R4	Pohjalaasti KS 20/80/500	0	0	0
		45	4.20E-10	4.20E-10
		210	9.60E-08	9.60E-09
R5	Oikaisu- ja täyttölaasti KS 25/75/500	0	0	0
		45	9.50E-12	9.50E-12
		210	2.20E-09	2.20E-10
R6	Täyttölaasti KS 65/35/600	0	0	0
		45	8.20E-10	8.20E-10
		210	1.90E-07	1.90E-08
R7	Tartuntalaasti KS 35/65/400	0	0	0
		45	3.00E-10	3.00E-10
		210	6.90E-08	6.90E-09
R8	Kuituvahvisteinen KS-laasti	0	0	0
		45	9.50E-12	9.50E-12
		210	2.20E-09	2.20E-10
R9	Pintalaasti KS 65/35/600	0	0	0
		45	6.60E-10	6.60E-10
		210	1.50E-07	1.50E-08
R11	Ohutrappauslaasti S #0-1 mm	0	0	0
		35	2.90E-12	2.90E-12
		280	1.20E-09	1.20E-10
M1	Hiertopinnoite S #0-1 mm	0	0	0
		35	2.90E-12	2.90E-12
		280	1.20E-09	1.20E-10
M2	Silikonihartsipinnoite	0	0	0
		2.9	5.00E-13	5.00E-13
		300	4.70E-10	4.70E-11
M3	Silikonihartsimaali	0	0	0
		32	5.50E-13	5.50E-13
		300	2.60E-10	2.60E-11
E1	Sementtipohjainen rappauslevy	0	0	0
		17	4.00E-11	4.00E-11
E2	Magnesiumoksidilevy	97	6.40E-09	1.70E-07
		0	0	0
		271	2.62E-08	2.62E-08
E3	Kuitusementtilevy	280	3.28E-08	3.28E-09
		0	0	0
		271	2.62E-08	2.62E-08
		280	3.28E-08	3.28E-09

DWS = kapillaarivirtauksen kosteusdiffusiviteetti

DWW = kosteusdiffusiviteetti kapillaarisesti siirtyvän kosteuden uudelleenjakautumiselle materiaalissa

Liite 1 WUFI-ohjelmassa käytetyt materiaaliominaisuudet

(6/7)

Lämmönjohtavuudet kosteuspitoisuuden funktiona

A1	Tuulensuoja- kipsilevy 9 mm	w [kg/m ³]	0	6.1	9.0	13.5	23.8	680
		λ [W/(m·K)]	0.19	0.19	0.19	0.2	0.21	0.6
A2	Huokoinen puu- kuitulevy 25 mm	w [kg/m ³]	0	12.3	24.1	47.6	74.8	850
		λ [W/(m·K)]	0.0485	0.0514	0.0520	0.0553	0.0541	0.6
A3	Tuulensuoja- mineraalivilla	w [kg/m ³]	0	0.5	0.6	1.6	3.3	940
		λ [W/(m·K)]	0.0306	0.0305	0.0305	0.0305	0.0307	0.6
A11	Havuvaneri 9 mm	w [kg/m ³]	0	22.9	43.2	86.4	126.0	650
		λ [W/(m·K)]	0.11	0.11	0.11	0.12	0.13	0.6
A13	Huokoinen puu- kuitulevy 12 mm	w [kg/m ³]	0	12.4	22.4	45.9	71.3	850
		λ [W/(m·K)]	0.0465	0.0494	0.0512	0.0543	0.0529	0.6
C1	Kipsilevy 13 mm	w [kg/m ³]	0	4.6	6.7	10.1	17.7	770
		λ [W/(m·K)]	0.19	0.19	0.19	0.2	0.21	0.6
C13	Mänty	w [kg/m ³]	0	32	62	126	185	900
		λ [W/(m·K)]	0.1	0.11	0.12	0.1	0.15	0.6
D1	Lasivilla	w [kg/m ³]	0	0.45	0.66	1.3	2.4	980
		λ [W/(m·K)]	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.6
D2	Kivivilla	w [kg/m ³]	0	0.15	0.33	0.62	0.93	970
		λ [W/(m·K)]	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.6
D4	Puukuitueriste	w [kg/m ³]	0	1.90	4.00	8.60	15.20	970
		λ [W/(m·K)]	0.038	0.038	0.038	0.039	0.040	0.6
K3	Betoni 1	w [kg/m ³]	0	180.0				
		λ [W/(m·K)]	1.6	2.602				
K4	Betoni 2	w [kg/m ³]	0	180.0				
		λ [W/(m·K)]	1.6	2.638				
K5	Tiili	w [kg/m ³]	0	300.0				
		λ [W/(m·K)]	0.45	1.205				
E2	Magnesiumoksidilevy	w [kg/m ³]	0	300.0				
		λ [W/(m·K)]	0.139	0.6				
E3	Kuitusementtilevy	w [kg/m ³]	0	300.0				
		λ [W/(m·K)]	0.139	0.6				

Liite 1 WUFI-ohjelmassa käytetyt materiaaliominaisuudet**(7/7)**

Vesihöyryn diffusiovastuskertoimet kosteuspitoisuuden funktiona

A11	Havuvaneri 9 mm	RH [%]	0	35	45	55	65	75	85	95	100	
		μ [-]	232	232	232	216	126	73.0	42	25	19	
B2	Diffuusioavoin tuulensuojakalvo 1 mm	RH [%]	0	35	45	55	65	75	85	95	100	
		μ [-]	35	35	35	17	6.8	2.8	1.1	1.0	1.0	
F1	Hygrokalvo	RH [%]	0	30	35	40	55	60	70	80	90	100
		μ [-]	5100	5100	5100	4200	1900	1200	500	300	200	180

Merkkien selitykset

Tunnus	Yksikkö	Selitys
NAME		Nimi
FLAGS		Eriyisominaisuudet
RHO	kg/m ³	Tiheys
CE	J/(kg·K)	Ominaislämpökapasiteetti
LAMBDA	W/(m·K)	Lämmönjohtavuus
OPOR	m ³ /m ³	Huokoisuus
OEFF	m ³ /m ³	Kosteuspitoisuus vesiupotuksessa
AW	kg/(m ² s ^{0,5})	Veden imeytymiskerroin
MEW	-	Diffuusiovastuskerroin
KLEFF	s	Kosteudenjohtavuus OEFF-kosteuspitoisuuteen
OCAP	m ³ /m ³	Kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus
O80	m ³ /m ³	Kosteuspitoisuus 80 % RH suhteellisessa kosteudessa
Dv	m ² /s	Vesihöyrynläpäisevyys
pC	lg(Pa)	Veden huokosalipaineen kymmenkantainen logaritmi
OI	m ³ /m ³	Kosteuspitoisuus
lgKI	lg(s)	Kosteudenjohtavuuden kymmenkantainen logaritmi

Puuttuvia materiaalitietoja on täydennetty Delphin-laskentaohjelman materiaalikirjaston tiedoilla.

Liite 2 Delphin-ohjelmassa käytetyt materiaaliominaisuudet

(2/21)

NAME	=	A1 Gypsum board	
RHO	=	774	kg/m ³
CE	=	1100	J/(kg·K)
LAMBDA	=	0.19	W/(m·K)
OPOR	=	0.604	m ³ /m ³
OEFF	=	0.604	m ³ /m ³
AW	=	0.076	kg/(m ² s ^{0.5})
MEW	=	7.9	-
KLEFF	=	1.00E-09	s
OCAP	=	0.5	m ³ /m ³
O80	=	0.01	m ³ /m ³

NAME	=	A2 Wood fibreboard	
RHO	=	280	kg/m ³
CE	=	1500	J/(kg·K)
LAMBDA	=	0.052	W/(m·K)
OPOR	=	0.85	m ³ /m ³
OEFF	=	0.65	m ³ /m ³
AW	=	0.005	kg/(m ² s ^{0.5})
MEW	=	4.6	-
KLEFF	=	2.00E-12	s
OCAP	=	0.14	m ³ /m ³
O80	=	0.035	m ³ /m ³

Veden huokosalipaineen ja kosteudenjohtavuuden kymmenkantaiset logaritmit kosteuspitäisyyden funktiona:

A1 Gypsum board			
OI	pC	OI	IgKI
0.604	0	0	-21
0.603992088	0.01	0.00604	-20.2248549
0.603984272	0.11	0.01208	-19.33955254
0.603970881	0.21	0.01812	-18.62884123
0.603956657	0.31	0.02416	-18.01583633
0.603933252	0.41	0.0302	-17.47443549
0.603908494	0.51	0.03624	-16.99147782
0.603868902	0.61	0.04228	-16.55872349
0.603827202	0.71	0.04832	-16.17026063
0.603762398	0.81	0.05436	-15.82145258
0.603694442	0.91	0.0604	-15.50844253
0.603591817	1.01	0.06644	-15.22789446
0.603484643	1.11	0.07248	-14.97684629
0.603327386	1.21	0.07852	-14.75262116
0.60316381	1.31	0.08456	-14.55277085
0.602930654	1.41	0.0906	-14.37503796
0.602689054	1.51	0.09664	-14.21732968
0.602354529	1.61	0.10268	-14.07769878
0.602009162	1.71	0.10872	-13.95432946
0.601544571	1.81	0.11476	-13.84552638
0.60106662	1.91	0.1208	-13.749706
0.600441709	2.01	0.12684	-13.66538944
0.599800944	2.11	0.13288	-13.59119653
0.598985707	2.21	0.13892	-13.52584061
0.598152193	2.31	0.14496	-13.46812411
0.597117547	2.41	0.151	-13.41693441
0.596062015	2.51	0.15704	-13.37124023
0.594776654	2.61	0.16308	-13.33008817
0.593466687	2.71	0.16912	-13.29259957
0.591885934	2.81	0.17516	-13.25796746
0.590273719	2.91	0.1812	-13.22545372
0.588315237	3.01	0.18724	-13.19438628
0.586311872	3.11	0.19328	-13.16415649
0.583814682	3.21	0.19932	-13.13421649
0.581248129	3.31	0.20536	-13.10407672
0.577918302	3.41	0.2114	-13.07330338
0.574479258	3.51	0.21744	-13.04151607
0.569838394	3.61	0.22348	-13.00838531
0.565031653	3.71	0.22952	-12.97363025
0.558399727	3.81	0.23556	-12.93701628
0.551533153	3.91	0.2416	-12.89835272
0.542084685	4.01	0.24764	-12.85749055
0.532333503	4.11	0.25368	-12.81432012
0.51925151	4.21	0.25972	-12.76876886
0.505819039	4.31	0.26576	-12.72079908
0.488530113	4.41	0.2718	-12.67040569

A2 Wood fibreboard			
OI	pC	OI	IgKI
0.65	0	0	-20.19897
0.649985362	2.71	0.0065	-19.75126256
0.649948689	2.81	0.013	-18.98034216
0.649887661	2.91	0.0195	-18.45556782
0.649558657	3.01	0.026	-18.08254378
0.649078183	3.11	0.0325	-17.81753681
0.646931084	3.21	0.039	-17.62963764
0.644185542	3.31	0.0455	-17.49274276
0.634855143	3.41	0.052	-17.38296341
0.624089817	3.51	0.0585	-17.27757514
0.597535478	3.61	0.065	-17.15452454
0.569082072	3.71	0.0715	-16.99217241
0.519732629	3.81	0.078	-16.94713111
0.469501871	3.91	0.0845	-16.84656221
0.409573665	4.01	0.091	-16.74222081
0.350657223	4.11	0.0975	-16.64354482
0.302873591	4.21	0.104	-16.5469918
0.2569398	4.31	0.1105	-16.45233375
0.231360493	4.41	0.117	-16.35938279
0.207053633	4.51	0.1235	-16.26798245
0.196747961	4.61	0.13	-16.17800111
0.186891952	4.71	0.1365	-16.08932713
0.181983789	4.81	0.143	-16.00186498
0.177117467	4.91	0.1495	-15.91553236
0.172711598	5.01	0.156	-15.83025785
0.168241574	5.11	0.1625	-15.74597903
0.163065728	5.21	0.169	-15.66264101
0.157820637	5.31	0.1755	-15.58019519
0.151813656	5.41	0.182	-15.49859828
0.145758568	5.51	0.1885	-15.41781147
0.139174113	5.61	0.195	-15.33779972
0.132571933	5.71	0.2015	-15.17515505
0.125774701	5.81	0.208	-15.01854367
0.118992387	5.91	0.2145	-14.86783031
0.112374191	6.01	0.221	-14.72288173
0.105799441	6.11	0.2275	-14.58356632
0.099702772	6.21	0.234	-14.44975394
0.093668829	6.31	0.2405	-14.32131565
0.088325055	6.41	0.247	-14.19812356
0.083051462	6.51	0.2535	-14.08005067
0.078550121	6.61	0.26	-13.96697073
0.0748	6.619402042	0.2665	-13.85875814
0.0648	6.996444712	0.273	-13.75528787
0.0402	7.405965243	0.2795	-13.65643537
0.02815	7.594596241	0.286	-13.56207651
0.02005	7.912266233	0.2925	-13.47208751

Liite 2 Delphin-ohjelmassa käytetyt materiaaliominaisuudet

(3/21)

A1 Gypsum board			
OI	pC	OI	IgKI
0.470883733	4.51	0.27784	-12.617614
0.449304227	4.61	0.28388	-12.5624775
0.427414107	4.71	0.28992	-12.50507561
0.402106217	4.81	0.29596	-12.44551153
0.376587205	4.91	0.302	-12.38391001
0.348745106	5.01	0.30804	-12.32041515
0.32082796	5.11	0.31408	-12.25518823
0.292085098	5.21	0.32012	-12.18840548
0.263414638	5.31	0.32616	-12.12025597
0.235540871	5.41	0.3322	-12.05093934
0.207872471	5.51	0.33824	-11.98066366
0.182463731	5.61	0.34428	-11.90964326
0.157358984	5.71	0.35032	-11.83809653
0.135599136	5.81	0.35636	-11.76624373
0.114196498	5.91	0.3624	-11.69430483
0.096724409	6.01	0.36844	-11.62249732
0.079615221	6.11	0.37448	-11.55103402
0.066499162	6.21	0.38052	-11.48012092
0.053710392	6.31	0.38656	-11.40995499
0.044522845	6.41	0.3926	-11.34072197
0.03559892	6.51	0.39864	-11.27259424
0.029575778	6.61	0.40468	-11.20572857
0.0238	6.619402042	0.41072	-11.14026401
0.0182	6.996444712	0.41676	-11.07631962
0.0114	7.405965243	0.4228	-11.01399237
0.00965	7.594596241	0.42884	-10.95335488
0.00825	7.912266233	0.43488	-10.89445327
0.00615	8.180482849	0.44092	-10.83730498
0	10	0.44696	-10.78189654
		0.453	-10.72818141
		0.45904	-10.67607779
		0.46508	-10.62546642
		0.47112	-10.57618841
		0.47716	-10.52804298
		0.4832	-10.48078537
		0.48924	-10.43412457
		0.49528	-10.38772116
		0.50132	-10.3411851
		0.50736	-10.29407355
		0.5134	-10.24588868
		0.51944	-10.19607547
		0.52548	-10.14401951
		0.53152	-10.08904482
		0.53756	-10.03041165
		0.5436	-9.967314282
		0.54964	-9.898878857
		0.55568	-9.824161156
		0.56172	-9.74214442
		0.56776	-9.651737159
		0.5738	-9.551770953
		0.57984	-9.440998265
		0.58588	-9.318090247
		0.59192	-9.181634544
		0.59796	-9.030133108
		0.604	-9

A2 Wood fibreboard			
OI	pC	OI	IgKI
0.01225	8.180482849	0.299	-13.38634493
0	10	0.3055	-13.30472565
		0.312	-13.22710678
		0.3185	-13.15336569
		0.325	-13.08338002
		0.3315	-13.01702759
		0.338	-12.95418648
		0.3445	-12.89473497
		0.351	-12.83855158
		0.3575	-12.78551503
		0.364	-12.73550429
		0.3705	-12.68839854
		0.377	-12.64407723
		0.3835	-12.60242002
		0.39	-12.56330683
		0.3965	-12.52661784
		0.403	-12.49223348
		0.4095	-12.46003446
		0.416	-12.42990173
		0.4225	-12.40171654
		0.429	-12.3753604
		0.4355	-12.35071511
		0.442	-12.32766273
		0.4485	-12.30608561
		0.455	-12.28586638
		0.4615	-12.26688794
		0.468	-12.24903348
		0.4745	-12.23218645
		0.481	-12.21623057
		0.4875	-12.20104985
		0.494	-12.18652853
		0.5005	-12.17255113
		0.507	-12.15900242
		0.5135	-12.14576742
		0.52	-12.13273138
		0.5265	-12.1197798
		0.533	-12.10679842
		0.5395	-12.09367318
		0.546	-12.08029024
		0.5525	-12.06653599
		0.559	-12.05229702
		0.5655	-12.0374601
		0.572	-12.0219122
		0.5785	-12.00554049
		0.585	-11.98823229
		0.5915	-11.9698751
		0.598	-11.95035659
		0.6045	-11.92956459
		0.611	-11.90738707
		0.6175	-11.88371214
		0.624	-11.85842808
		0.6305	-11.83142325
		0.637	-11.80258619
		0.6435	-11.77180552
		0.65	-11.69897

Liite 2 Delphin-ohjelmassa käytetyt materiaaliominaisuudet

(4/21)

NAME	=	A4 Glass wool board + weather membrane	
FLAGS	=	WATERTIGHT	
RHO	=	104	kg/m ³
CE	=	850	J/(kg·K)
LAMBDA	=	0.031	W/(m·K)
OPOR	=	0.9	m ³ /m ³
OEFF	=	0.9	m ³ /m ³
MEW	=	1.8	-
OCAP	=	6.8	m ³ /m ³
O80	=	0.0017	m ³ /m ³

NAME	=	A8 Wood hardboard	
RHO	=	800	kg/m ³
CE	=	1500	J/(kg·K)
LAMBDA	=	0.12	W/(m·K)
OPOR	=	0.87	m ³ /m ³
OEFF	=	0.87	m ³ /m ³
AW	=	0.03	kg/(m ² ·s ^{0.5})
MEW	=	79	-
KLEFF	=	2.00E-12	s
OCAP	=	0.5	m ³ /m ³
O80	=	0.19	m ³ /m ³

Veden huokosalipaineen ja kosteudenjohtavuuden kymmenkantaiset logaritmit sekä vesihöyrynläpäisevyys kosteuspitäisyyden funktiona:

A4 Glass wool board + weather membrane			
OI	pC	OI	Dv
0.9	0	0	1.47889E-05
0.899983773	3.2	0.00612	1.47888E-05
0.899968932	3.3	0.9	0
0.899912412	3.4		
0.899840259	3.5		
0.899595954	3.6		
0.899297577	3.7		
0.898404111	3.8		
0.897354756	3.9		
0.8945901	4		
0.891452727	4.1		
0.884214414	4.2		
0.876243231	4.3		
0.86020794	4.4		
0.843004332	4.5		
0.812945367	4.6		
0.781418367	4.7		
0.733738005	4.8		
0.68469804	4.9		
0.620697843	5		
0.555973281	5.1		
0.483278301	5.2		
0.410818383	5.3		
0.340945101	5.4		
0.2721582	5.5		
0.215325171	5.6		
0.159968034	5.7		
0.120850659	5.8		
0.083094102	5.9		
0.060311079	6		
0.038490669	6.1		
0.027262278	6.2		
0.016579215	6.3		
0.011896515	6.4		
0.007466058	6.5		
0.005811111	6.6		
0.005424107	6.614980203		
0.004720982	6.992022873		
0.001707589	7.401543405		
0.001034599	7.590174403		
0.000893974	7.907844394		
0.000783482	8.176061011		
0	10		

A8 Wood hardboard			
OI	pC	OI	IgKI
0.87	0	0	-19.69897
0.86997658	4.21	0.0087	-19.50997221
0.869935898	4.31	0.0174	-19.23495978
0.869884464	4.41	0.0261	-19.01074625
0.869714779	4.51	0.0348	-18.81454438
0.869508955	4.61	0.0435	-18.63882811
0.86890547	4.71	0.0522	-18.4799441
0.868199779	4.81	0.0609	-18.33569397
0.866369534	4.91	0.0696	-18.20455152
0.864297402	5.01	0.0783	-18.08534486
0.859563741	5.11	0.087	-17.97710682
0.854354607	5.21	0.0957	-17.87899691
0.843913694	5.31	0.1044	-17.79025733
0.832706389	5.41	0.1131	-17.71018653
0.813066165	5.51	0.1218	-17.63812264
0.792437186	5.61	0.1305	-17.57343252
0.760928535	5.71	0.1392	-17.51550444
0.728453236	5.81	0.1479	-17.46374288
0.685341473	5.91	0.1566	-17.41756487
0.641630072	6.01	0.1653	-17.37639729
0.591320634	6.11	0.174	-17.33967487
0.541030963	6.21	0.1827	-17.30683866
0.490958705	6.31	0.1914	-17.27733489
0.441516552	6.41	0.2001	-17.25061405
0.399007569	6.51	0.2088	-17.22613016
0.3574733	6.61	0.2175	-17.2033402
0.328	6.619402042	0.2262	-17.18170371
0.288	6.996444712	0.2349	-17.16068231
0.2135	7.405965243	0.2436	-17.1397395
0.163	7.594596241	0.2523	-17.11834035
0.0881	7.912266233	0.261	-17.0959513
0.06995	8.180482849	0.2697	-17.07204
0	10	0.2784	-17.04607514
		0.2871	-17.01752634
		0.2958	-16.98586406
		0.3045	-16.95055946
		0.3132	-16.91108439
		0.3219	-16.86691126
		0.3306	-16.81751301
		0.3393	-16.76236306
		0.348	-16.70093527
		0.3567	-16.63270389
		0.3654	-16.55714352
		0.3741	-16.47372911
		0.3828	-16.3819359
		0.3915	-16.2812394

Liite 2 Delphin-ohjelmassa käytetyt materiaaliominaisuudet

(5/21)

A8 Wood hardboard		
	OI	IgKI
	0.4002	-16.17111539
	0.4089	-16.05103989
	0.4176	-15.92048914
	0.4263	-15.77893958
	0.435	-15.62586786
	0.4437	-15.46075079
	0.4524	-15.28306537
	0.4611	-15.09228873
	0.4698	-14.88789818
	0.4785	-14.66937115
	0.4872	-14.43618522
	0.4959	-14.18781809
	0.5046	-13.92374757
	0.5133	-13.64345159
	0.522	-13.55748819
	0.5307	-13.52217873
	0.5394	-13.48783636
	0.5481	-13.45438035
	0.5568	-13.42172658
	0.5655	-13.38978753
	0.5742	-13.3584723
	0.5829	-13.32768656
	0.5916	-13.29733259
	0.6003	-13.26730926
	0.609	-13.23751203
	0.6177	-13.20783294
	0.6264	-13.17816062
	0.6351	-13.14838026
	0.6438	-13.11837366
	0.6525	-13.08801918
	0.6612	-13.05719174
	0.6699	-13.02576285
	0.6786	-12.99360058
	0.6873	-12.96056959
	0.696	-12.92653107
	0.7047	-12.8913428
	0.7134	-12.85485912
	0.7221	-12.81693091
	0.7308	-12.77740565
	0.7395	-12.73612733
	0.7482	-12.69293654
	0.7569	-12.6476704
	0.7656	-12.60016259
	0.7743	-12.55024334
	0.783	-12.49773945
	0.7917	-12.44247424
	0.8004	-12.3842676
	0.8091	-12.32293598
	0.8178	-12.25829234
	0.8265	-12.19014622
	0.8352	-12.11830369
	0.8439	-12.04256737
	0.8526	-11.96273642
	0.8613	-11.87860655
	0.87	-11.69897

Liite 2 Delphin-ohjelmassa käytetyt materiaaliominaisuudet

(6/21)

NAME	=	A11 Spruce plywood	
FLAGS	=	AIRTIGHT	
RHO	=	394	kg/m ³
CE	=	1500	J/(kg·K)
LAMBDA	=	0.11	W/(m·K)
OPOR	=	0.65	m ³ /m ³
OEFF	=	0.63	m ³ /m ³
AW	=	0.022	kg/(m ² s ^{0.5})
MEW	=	232	-
KLEFF	=	6.00E-11	s
OCAP	=	0.59	m ³ /m ³
O80	=	0.065	m ³ /m ³

NAME	=	B5 Bitumen paper	
FLAGS	=	AIRTIGHT	
RHO	=	940	kg/m ³
CE	=	1500	J/(kg·K)
LAMBDA	=	0.15	W/(m·K)
OPOR	=	0.06	m ³ /m ³
OEFF	=	0.009	m ³ /m ³
AW	=	0.001	kg/(m ² s ^{0.5})
MEW	=	137	-
KLEFF	=	1.00E-13	s
OCAP	=	0.009	m ³ /m ³
O80	=	0.000731138	m ³ /m ³

Veden huokosalpaineen ja kosteudenjohtavuuden kymmenkantaiset logaritmit kosteuspitäisyyden funktiona:

A11 Spruce plywood			
OI	pC	OI	IgKI
0.629999685	0	0	-20.22184875
0.629983028	0.29	0.0063	-20.22184875
0.629973464	0.39	0.0126	-20.22184875
0.629954646	0.49	0.0189	-20.22184875
0.629934215	0.59	0.0252	-18.99469957
0.629896	0.69	0.0315	-18.155005
0.629854892	0.79	0.0378	-17.54434529
0.629781875	0.89	0.0441	-17.10930113
0.629704013	0.99	0.0504	-16.80543518
0.629572816	1.09	0.0567	-16.59648382
0.62943409	1.19	0.063	-16.45354875
0.629212469	1.29	0.0693	-16.35428874
0.628979986	1.39	0.0756	-16.28211128
0.628628043	1.49	0.0819	-16.22536423
0.628261641	1.59	0.0882	-16.17652757
0.627736253	1.69	0.0945	-16.131405
0.627193205	1.79	0.1008	-16.08831569
0.626455885	1.89	0.1071	-16.04728593
0.625698927	1.99	0.1134	-16.00924078
0.624725917	2.09	0.1197	-15.97519582
0.623733296	2.19	0.126	-15.94544875
0.622524842	2.29	0.1323	-15.91877114
0.621299089	2.39	0.1386	-15.89160008
0.619882969	2.49	0.1449	-15.85722983
0.618453429	2.59	0.1512	-15.80500357
0.616876256	2.69	0.1575	-15.719505
0.615288719	2.79	0.1638	-15.62849624
0.613587108	2.89	0.1701	-15.50456098
0.611872538	2.99	0.1764	-15.38343347
0.610015398	3.09	0.1827	-15.26507707
0.608129525	3.19	0.189	-15.14945385
0.605927461	3.29	0.1953	-15.03652452
0.603658465	3.39	0.2016	-14.9262485
0.600652994	3.49	0.2079	-14.81858385
0.597513055	3.59	0.2142	-14.71348733
0.59289358	3.69	0.2205	-14.61091438
0.588045427	3.79	0.2268	-14.51081909
0.580681099	3.89	0.2331	-14.41315425
0.572986896	3.99	0.2394	-14.31787132
0.56166305	4.09	0.2457	-14.22492041
0.549938598	4.19	0.252	-14.13425035
0.533806088	4.29	0.2583	-14.04580861
0.517275316	4.39	0.2646	-13.95954134
0.496362264	4.49	0.2709	-13.87539339
0.475150486	4.59	0.2772	-13.79330826

B5 Bitumen paper			
OI	pC	OI	IgKI
0.009	0	0	-20
0.008999796	4.1	0.00009	-19.81769433
0.008999618	4.2	0.00018	-19.15980273
0.008998977	4.3	0.00027	-18.60830548
0.008998172	4.4	0.00036	-18.13658205
0.008995573	4.5	0.00045	-17.7332731
0.008992443	4.6	0.00054	-17.39089202
0.00898346	4.7	0.00063	-17.10340713
0.008973017	4.8	0.00072	-16.86545896
0.008946504	4.9	0.00081	-16.67204234
0.008916633	5	0.0009	-16.51835682
0.008849817	5.1	0.00099	-16.39972863
0.008776588	5.2	0.00108	-16.31156669
0.008632801	5.3	0.00117	-16.24933617
0.008478981	5.4	0.00126	-16.20854191
0.008214761	5.5	0.00135	-16.17485031
0.007938013	5.6	0.00144	-16.14188953
0.007523405	5.7	0.00153	-16.1095832
0.007097053	5.8	0.00162	-16.07786746
0.006541467	5.9	0.00171	-16.04668831
0.005979195	6	0.0018	-16.01599959
0.005343348	6.1	0.00189	-15.9857615
0.004708678	6.2	0.00198	-15.95593936
0.004086955	6.3	0.00207	-15.92650278
0.003473698	6.4	0.00216	-15.89742492
0.002953609	6.5	0.002445679	-15.80724409
0.002445679	6.6	0.002953609	-15.65345436
0.002071542	6.7	0.003473698	-15.36866987
0.001708921	6.8	0.004086955	-15.11229991
0.001473027	6.9	0.004708678	-14.87337211
0.001245211	7	0.005343348	-14.64851897
0.001106277	7.1	0.005979195	-14.45270034
0.000971469	7.2	0.006541467	-14.25777393
0.000882061	7.3	0.007097053	-14.09933162
0.000793929	7.4	0.007523405	-13.9322167
0.000719829	7.5	0.007938013	-13.80580136
0.000645758	7.6	0.008214761	-13.66544812
0.000572015	7.7	0.008478981	-13.56688328
0.000498337	7.8	0.008632801	-13.45271157
0.000425378	7.9	0.008776588	-13.3784104
0.000353112	8	0.008849817	-13.28942957
0.000288454	8.1	0.008916633	-13.23586694
0.000225052	8.2	0.008946504	-13.17020385
0.000175471	8.3	0.008973017	-13.13373501
0.000127306	8.4	0.00898346	-13.08848979

Liite 2 Delphin-ohjelmassa käytetyt materiaaliominaisuudet

(7/21)

A11 Spruce plywood			
OI	pC	OI	IgKI
0.45065172	4.69	0.2835	-13.71322813
0.426035579	4.79	0.2898	-13.63509386
0.400127937	4.89	0.2961	-13.558845
0.374310537	4.99	0.3024	-13.48441973
0.349486074	5.09	0.3087	-13.41175497
0.324915072	5.19	0.315	-13.34078625
0.303132942	5.29	0.3213	-13.27144782
0.281673712	5.39	0.3276	-13.2036726
0.263767405	5.49	0.3339	-13.13739216
0.246155169	5.59	0.3402	-13.07253678
0.231778682	5.69	0.3465	-13.00903538
0.217606171	5.79	0.3528	-12.94681559
0.20567804	5.89	0.3591	-12.88580369
0.193855977	5.99	0.3654	-12.82592464
0.183201077	6.09	0.3717	-12.76710209
0.17258804	6.19	0.378	-12.70925835
0.162435697	6.29	0.3843	-12.65231441
0.152308479	6.39	0.3906	-12.59618994
0.142457717	6.49	0.3969	-12.54080328
0.132650708	6.59	0.4032	-12.48607145
0.126	6.619402042	0.4095	-12.43191013
0.114	6.996444712	0.4158	-12.3782337
0.0748	7.405965243	0.4221	-12.3249552
0.05535	7.594596241	0.4284	-12.27198635
0.03095	7.912266233	0.4347	-12.21923754
0.02285	8.180482849	0.441	-12.16661785
0	10	0.4473	-12.11403501
		0.4536	-12.06139545
		0.4599	-12.00860427
		0.4662	-11.95556523
		0.4725	-11.90218078
		0.4788	-11.84835205
		0.4851	-11.79397883
		0.4914	-11.73895959
		0.4977	-11.68319149
		0.504	-11.62657035
		0.5103	-11.56899066
		0.5166	-11.51034561
		0.5229	-11.45052704
		0.5292	-11.38942548
		0.5355	-11.32693013
		0.5418	-11.26292887
		0.5481	-11.19730824
		0.5544	-11.12995348
		0.5607	-11.06074849
		0.567	-10.98957585
		0.5733	-10.91631681
		0.5796	-10.8408513
		0.5859	-10.76305793
		0.5922	-10.68281397
		0.5985	-10.59999538
		0.6048	-10.5144768
		0.6111	-10.42613152
		0.6174	-10.33483154
		0.6237	-10.2404475
		0.63	-10.22184875

B5 Bitumen paper			
OI	pC	OI	IgKI
9.47E-05	8.5	0.008992443	-13.06538302
6.33E-05	8.6	0.008995573	-1.30E+01
4.50E-05	8.7	0.008998172	-1.30E+01
2.75E-05	8.8	0.008998977	-1.30E+01
1.87E-05	8.9	0.009	-1.30E+01
1.04E-05	9		
6.81E-06	9.1		
3.40E-06	9.2		
2.15E-06	9.3		
9.63E-07	9.4		
5.87E-07	9.5		
2.35E-07	9.6		
0	10		

Liite 2 Delphin-ohjelmassa käytetyt materiaaliominaisuudet

(8/21)

NAME	=	C11 Plastic film 0.2 mm	
FLAGS	=	AIRTIGHT	WATERTIGHT
RHO	=	980	kg/m ³
CE	=	2300	J/(kg·K)
LAMBDA	=	0.15	W/(m·K)
OPOR	=	0.001	m ³ /m ³
OEFF	=	0.001	m ³ /m ³
MEW	=	89000	-
OCAP	=	0.0001	m ³ /m ³
O80	=	3.87E-05	m ³ /m ³

NAME	=	C13 Pine Across grain	
FLAGS	=	AIRTIGHT	
RHO	=	532	kg/m ³
CE	=	2000	J/(kg·K)
LAMBDA	=	0.12	W/(m·K)
OPOR	=	0.7	m ³ /m ³
OEFF	=	0.67	m ³ /m ³
AW	=	0.004	kg/(m ² ·s ^{0.5})
MEW	=	84	-
KLEFF	=	3.00E-13	s
OCAP	=	0.55	m ³ /m ³
O80	=	0.09	m ³ /m ³

Veden huokosalipaineen ja kosteudenjohtavuuden kymmenkantaiset logaritmit kosteuspiitoisuuden funktiona:

C11 Plastic film 0.2 mm	
Ol	pC
0.001	0
0.000999976	4.2
0.000999937	4.3
0.000999887	4.4
0.000999727	4.5
0.000999534	4.6
0.000998979	4.7
0.000998334	4.8
0.000996698	4.9
0.000994854	5
0.000990729	5.1
0.000986209	5.2
0.000977333	5.3
0.000967838	5.4
0.000951528	5.5
0.000934444	5.6
0.000908847	5.7
0.000882525	5.8
0.000848213	5.9
0.000813483	6
0.000774161	6.1
0.000734894	6.2
0.000696244	6.3
0.000658067	6.4
0.000625094	6.5
0.000592747	6.6
0.000567286	6.7
0.000542273	6.8
0.000522205	6.9
0.000502182	7
0.000482664	7.1
0.000462765	7.2
0.000438681	7.3
0.00041398	7.4
0.000382507	7.5
0.000350505	7.6
0.000312672	7.7
0.000274686	7.8
0.00023502	7.9
0.000195683	8
0.000159966	8.1
0.000124934	8.2
9.74E-05	8.3
7.07E-05	8.4
5.26E-05	8.5

C13 Pine Across grain			
Ol	pC	Ol	lgKl
0.669997474	0	0	-22.52287875
0.66996717	1.11	0.0067	-20.94864155
0.669935955	1.21	0.0134	-20.23266115
0.669894696	1.31	0.0201	-19.58993435
0.669852345	1.41	0.0268	-19.01645795
0.669798075	1.51	0.0335	-18.50822875
0.669742479	1.61	0.0402	-18.06124355
0.669672343	1.71	0.0469	-17.67149915
0.669600633	1.81	0.0536	-17.33499235
0.66951159	1.91	0.0603	-17.04771995
0.669420718	2.01	0.067	-16.80567875
0.669309672	2.11	0.0737	-16.60486555
0.669196543	2.21	0.0804	-16.44127715
0.669060486	2.31	0.0871	-16.31091035
0.668922117	2.41	0.0938	-16.20976195
0.668758349	2.51	0.1005	-16.13382875
0.668592089	2.61	0.1072	-16.07910755
0.668398432	2.71	0.1139	-16.04159515
0.668202169	2.81	0.1206	-16.01728835
0.667977196	2.91	0.1273	-16.00218395
0.667749577	3.01	0.134	-15.99227875
0.667492793	3.11	0.1407	-15.98356955
0.667233396	3.21	0.1474	-15.97205315
0.666945195	3.31	0.1541	-15.95372635
0.666654368	3.41	0.1608	-15.92458595
0.666334678	3.51	0.1675	-15.88062875
0.666011664	3.61	0.1742	-15.81785155
0.665652122	3.71	0.1809	-15.79450105
0.665285083	3.81	0.1876	-15.77115056
0.664835506	3.91	0.1943	-15.74780006
0.664361615	4.01	0.201	-15.72444957
0.663620247	4.11	0.2077	-15.70109907
0.662803048	4.21	0.2144	-15.67774858
0.661151437	4.31	0.2211	-15.65439809
0.659302103	4.41	0.2278	-15.63104759
0.655277199	4.51	0.2345	-15.6076971
0.650837833	4.61	0.2412	-15.5843466
0.641837977	4.71	0.2479	-15.56099611
0.632155841	4.81	0.2546	-15.53764562
6.15E-01	4.91	0.2613	-15.51429512
5.97E-01	5.01	0.268	-1.55E+01
5.70E-01	5.11	0.2747	-1.55E+01
5.41E-01	5.21	0.2814	-1.54E+01
5.05E-01	5.31	0.2881	-1.54E+01
4.69E-01	5.41	0.2948	-1.54E+01

Liite 2 Delphin-ohjelmassa käytetyt materiaaliominaisuudet

(9/21)

C11 Plastic film 0.2 mm	
OI	pC
3.52E-05	8.6
2.50E-05	8.7
1.53E-05	8.8
1.04E-05	8.9
5.78E-06	9
3.78E-06	9.1
1.89E-06	9.2
1.19E-06	9.3
5.35E-07	9.4
3.26E-07	9.5
1.30E-07	9.6
7.71E-08	9.7
2.73E-08	9.8
1.59E-08	9.9
0	10

C13 Pine Across grain			
OI	pC	OI	IgKI
4.30E-01	5.51	0.3015	-1.54E+01
3.91E-01	5.61	0.3082	-1.54E+01
3.55E-01	5.71	0.3149	-1.53E+01
3.21E-01	5.81	0.3216	-1.53E+01
2.94E-01	5.91	0.3283	-1.53E+01
2.69E-01	6.01	0.335	-1.53E+01
2.52E-01	6.11	0.3417	-1.52E+01
2.35E-01	6.21	0.3484	-1.52E+01
2.23E-01	6.31	0.3551	-1.52E+01
2.11E-01	6.41	0.3618	-1.52E+01
1.99E-01	6.51	0.3685	-1.51E+01
0.186647943	6.61	0.3752	-1.51E+01
0.185	6.614980203	0.3819	-15.09398623
0.169	6.992022873	0.3886	-15.07063573
0.10805	7.401543405	0.3953	-15.04728524
0.0801	7.590174403	0.402	-15.02393475
0.04495	7.907844394	0.4087	-14.98717462
0.0323	8.176061011	0.4154	-14.95191694
0	10	0.4221	-14.91799319
		0.4288	-14.88522719
		0.4355	-14.85343506
		0.4422	-14.82242526
		0.4489	-14.79199857
		0.4556	-14.76194808
		0.4623	-14.73205923
		0.469	-14.70210975
		0.4757	-14.6718697
		0.4824	-14.64110149
		0.4891	-14.60955982
		0.4958	-14.57699172
		0.5025	-14.54313656
		0.5092	-14.507726
		0.5159	-14.47048406
		0.5226	-14.43112705
		0.5293	-14.38936362
		0.536	-14.34489475
		0.5427	-14.29741371
		0.5494	-14.24660612
		0.5561	-14.19214993
		0.5628	-14.13371538
		0.5695	-14.07096506
		0.5762	-14.00355387
		0.5829	-13.93112903
		0.5896	-13.8533301
		0.5963	-13.76978894
		0.603	-13.68012975
		0.6097	-13.58396903
		0.6164	-13.48091564
		0.6231	-13.37057072
		0.6298	-13.25252776
		0.6365	-13.12637256
		0.6432	-12.99168325
		0.6499	-12.84803028
		0.6566	-12.69497643
		0.6633	-12.53207678
		0.67	-12.52287875

Liite 2 Delphin-ohjelmassa käytetyt materiaaliominaisuudet

(10/21)

NAME	=	D1 Glass wool	
FLAGS	=	WATERTIGHT	
RHO	=	22	kg/m ³
CE	=	850	J/(kg·K)
LAMBDA	=	0.035	W/(m·K)
OPOR	=	0.98	m ³ /m ³
OEFF	=	0.98	m ³ /m ³
MEW	=	1.2	-
OCAP	=	0.003	m ³ /m ³
O80	=	0.001	m ³ /m ³

NAME	=	D4a Cellulose_Insulation	
RHO	=	60	kg/m ³
CE	=	2000	J/(kg·K)
LAMBDA	=	0.041	W/(m·K)
OPOR	=	0.96	m ³ /m ³
OEFF	=	0.96	m ³ /m ³
AW	=	0.065	kg/(m ² s ^{0.5})
MEW	=	1.7	-
KLEFF	=	1.70E-08	s
OCAP	=	0.57	m ³ /m ³
O80	=	0.008	m ³ /m ³

Veden huokosalipaineen ja kosteudenjohtavuuden kymmenkantaiset logaritmit sekä vesihöyrynläpäisevyys kosteuspitäisyyden funktiona:

D1 Glass wool			
OI	pC	OI	Dv
0.98	0	0	2.22E-05
0.979982331	2.5	0.00294	2.22E-05
0.97996617	2.6	0.98	0
0.979904626	2.7		
0.97982606	2.8		
0.979560039	2.9		
0.979235139	3		
0.978262254	3.1		
0.977119623	3.2		
0.97410922	3.3		
0.970692969	3.4		
0.962811251	3.5		
0.954131518	3.6		
0.936670868	3.7		
0.91793805	3.8		
0.885207177	3.9		
0.850877777	4		
0.798959161	4.1		
0.745560088	4.2		
0.675870985	4.3		
0.605393128	4.4		
0.526236372	4.5		
0.447335573	4.6		
0.371251332	4.7		
0.29635004	4.8		
0.234465186	4.9		
0.174187415	5		
0.13159294	5.1		
0.090480244	5.2		
0.065672064	5.3		
0.041912062	5.4		
0.029685592	5.5		
0.018052923	5.6		
0.012953983	5.7		
8.13E-03	5.8		
6.33E-03	5.9		
4.63E-03	6		
4.07E-03	6.1		
3.54E-03	6.2		
3.31E-03	6.3		
3.08E-03	6.4		
2.80E-03	6.5		
2.51E-03	6.6		
2.40E-03	6.614980203		
1.90E-03	6.992022873		
1.05E-03	7.401543405		

D4a Cellulose_Insulation			
OI	pC	OI	IgKI
0.96	0	0	-16.76955108
0.959951203	0.81	0.0031	-16.76955108
0.959899882	0.91	0.004025	-16.33269245
0.959677853	1.01	0.00495	-15.94720142
0.959384611	1.11	0.00635	-15.70454985
0.95830776	1.21	0.00775	-15.50991344
0.956980166	1.31	0.01095	-15.35955259
0.9528936	1.41	0.02275	-15.23955867
0.948136445	1.51	0.0288	-15.10265353
0.936000576	1.61	0.0384	-14.88541561
0.922525862	1.71	0.048	-14.6681777
0.894319248	1.81	0.0576	-14.45093978
0.86418745	1.91	0.0672	-14.23370187
0.81287209	2.01	0.0768	-14.01646395
0.759743434	2.11	0.0864	-13.79922604
0.686662349	2.21	0.096	-13.28210778
0.612881021	2.31	0.1056	-12.8203111
0.531394637	2.41	0.1152	-12.40875153
0.450768307	2.51	0.1248	-12.04268473
0.379605437	2.61	0.1344	-11.71769208
0.310309699	2.71	0.144	-11.42966646
0.26155873	2.81	0.1536	-11.17479844
0.214670467	2.91	0.1632	-10.94956266
0.188278195	3.01	0.1728	-10.7507046
0.163107658	3.11	0.1824	-10.57522754
0.151380298	3.21	0.192	-10.42037988
0.140203286	3.31	0.2016	-10.28364276
0.135082032	3.41	0.2112	-10.16271793
0.130099363	3.51	0.2208	-10.05551594
0.126641683	3.61	2.30E-01	-9.960144595
0.123147062	3.71	2.40E-01	-9.874897759
0.119245978	3.81	2.50E-01	-9.798244389
0.115262131	3.91	2.59E-01	-9.728817902
0.110367677	4.01	2.69E-01	-9.665405818
0.105405485	4.11	2.78E-01	-9.606939697
0.099697997	4.21	2.88E-01	-9.552485379
0.093966979	4.31	2.98E-01	-9.501233503
0.087977088	4.41	3.07E-01	-9.452490327
0.082016851	4.51	3.17E-01	-9.405668841
0.076382995	4.61	3.26E-01	-9.360280171
0.07082305	4.71	3.36E-01	-9.315925271
0.066076234	4.81	3.46E-01	-9.272286919
0.061426426	4.91	3.55E-01	-9.229121995
0.057843898	5.01	3.65E-01	-9.186254058
0.054358061	5.11	3.74E-01	-9.143566215
0.051936106	5.21	3.84E-01	-9.10094279

Liite 2 Delphin-ohjelmassa käytetyt materiaaliominaisuudet

(11/21)

D1 Glass wool	
OI	pC
7.80E-04	7.590174403
5.40E-04	7.907844394
4.55E-04	8.176061011
0.00E+00	10

D4a Cellulose_Insulation			
OI	pC	OI	IgKI
0.049593715	5.31	0.3936	-9.058520225
0.048126806	5.41	0.4032	-9.016165937
0.046715318	5.51	0.4128	-8.973987246
0.045913709	5.61	0.4224	-8.93206826
0.045140218	5.71	0.432	-8.890515996
0.044676125	5.81	0.4416	-8.849455291
0.044191594	5.91	0.4512	-8.809024014
0.043482192	6.01	0.4608	-8.769368573
0.042655306	6.11	0.4704	-8.730639707
0.040535606	6.21	0.48	-8.692988579
0.038236608	6.31	0.4896	-8.656563154
0.033964694	6.41	0.4992	-8.621504877
0.029647517	6.51	0.5088	-8.58794564
0.024832291	6.61	0.5184	-8.556005039
0.0246	6.619402042	0.528	-8.525787934
0.0209	6.996444712	0.5376	-8.497382288
0.01095	7.405965243	0.5472	-8.470857311
0.00775	7.594596241	0.5568	-8.446261889
0.00495	7.912266233	0.5664	-8.423623309
0.0031	8.180482849	0.576	-8.402946279
0	10	0.5856	-8.384212233
		0.5952	-8.367378939
		0.6048	-8.352380392
		0.6144	-8.339127004
		0.624	-8.327506084
		0.6336	-8.317382615
		0.6432	-8.308600318
		0.6528	-8.300983014
		0.6624	-8.294336278
		0.672	-8.288449379
		0.6816	-8.283097526
		0.6912	-8.278044394
		0.7008	-8.27304495
		0.7104	-8.26784857
		0.72	-8.262202446
		0.7296	-8.255855295
		0.7392	-8.248561347
		0.7488	-8.240084637
		0.7584	-8.230203588
		0.768	-8.218715879
		0.7776	-8.205443617
		0.7872	-8.190238795
		0.7968	-8.172989043
		0.8064	-8.153623673
		0.816	-8.132120021
		0.8256	-8.108510073
		0.8352	-8.08288739
		0.8448	-8.055414326
		0.8544	-8.026329536
		0.864	-7.995955779
		0.8736	-7.964708011
		0.8832	-7.933101774
		0.8928	-7.901761877
		0.9024	-7.87143137
		0.912	-7.842980809
		0.9216	-7.817417812
		0.9312	-7.795896919
		0.9408	-7.779729728
		0.9504	-7.770395339
		0.96	-7.769551079

Liite 2 Delphin-ohjelmassa käytetyt materiaaliominaisuudet

(12/21)

NAME	=	Bitumen sheet	
FLAGS	=	AIRTIGHT	WATERTIGHT
RHO	=	1200	kg/m ³
CE	=	2000	J/(kg·K)
LAMBDA	=	0.145	W/(m·K)
OPOR	=	0.0026	m ³ /m ³
OEFF	=	0.0025	m ³ /m ³
AW	=	1.00E-10	kg/(m ² ·s ^{0.5})
MEW	=	20000	-
OCAP	=	0.0025	m ³ /m ³
O80	=	1.37E-05	m ³ /m ³

NAME	=	Glass wool 036	
FLAGS	=	WATERTIGHT	
RHO	=	22	kg/m ³
CE	=	850	J/(kg·K)
LAMBDA	=	0.036	W/(m·K)
OPOR	=	0.98	m ³ /m ³
OEFF	=	0.98	m ³ /m ³
MEW	=	1.2	-
OCAP	=	0.003	m ³ /m ³
O80	=	0.001	m ³ /m ³

Veden huokosalipaineen kymmenkantaiset logaritmit sekä vesihöyrynläpäisevyys kosteuspitouuden funktiona:

Bitumen sheet	
OI	pC
0.0025	0
0.002499937	4.1
0.002499882	4.2
0.002499684	4.3
0.002499436	4.4
0.002498635	4.5
0.00249767	4.6
0.0024949	4.7
0.00249168	4.8
0.002483505	4.9
0.002474295	5
0.002453693	5.1
0.002431115	5.2
0.00238678	5.3
0.002339353	5.4
0.002257885	5.5
0.002172555	5.6
0.00204472	5.7
1.91E-03	5.8
1.74E-03	5.9
1.57E-03	6
1.37E-03	6.1
1.18E-03	6.2
9.85E-04	6.3
7.97E-04	6.4
6.37E-04	6.5
4.81E-04	6.6
3.67E-04	6.7
2.57E-04	6.8
1.87E-04	6.9
1.21E-04	7
8.47E-05	7.1
5.03E-05	7.2
3.42E-05	7.3
1.90E-05	7.4
1.28E-05	7.5
6.90E-06	7.6
4.75E-06	7.7
2.73E-06	7.8
1.99E-06	7.9
1.28E-06	8
9.78E-07	8.1
6.84E-07	8.2
5.21E-07	8.3
3.63E-07	8.4
2.69E-07	8.5
1.77E-07	8.6

Glass wool 036			
OI	pC	OI	Dv
0.98	0	0	2.22E-05
0.979982331	2.5	0.00294	2.22E-05
0.97996617	2.6	0.98	0
0.979904626	2.7		
0.97982606	2.8		
0.979560039	2.9		
0.979235139	3		
0.978262254	3.1		
0.977119623	3.2		
0.97410922	3.3		
0.970692969	3.4		
0.962811251	3.5		
0.954131518	3.6		
0.936670868	3.7		
0.91793805	3.80E+00		
0.885207177	3.90E+00		
0.850877777	4.00E+00		
0.798959161	4.10E+00		
0.745560088	4.20E+00		
0.675870985	4.30E+00		
0.605393128	4.40E+00		
0.526236372	4.50E+00		
0.447335573	4.60E+00		
0.371251332	4.70E+00		
0.29635004	4.80E+00		
0.234465186	4.90E+00		
0.174187415	5.00E+00		
0.13159294	5.10E+00		
0.090480244	5.20E+00		
0.065672064	5.30E+00		
0.041912062	5.40E+00		
0.029685592	5.50E+00		
0.018052923	5.60E+00		
0.012953983	5.70E+00		
0.008129708	5.80E+00		
0.006327654	5.90E+00		
0.004629226	6.00E+00		
0.004071057	6.10E+00		
0.003540426	6.20E+00		
0.003312723	6.30E+00		
0.003080836	6.40E+00		
0.002802947	6.50E+00		
0.002513053	6.60E+00		
0.0024	6.61E+00		
0.0019	6.992022873		
0.00105	7.401543405		
0.00078	7.590174403		

Liite 2 Delphin-ohjelmassa käytetyt materiaaliominaisuudet**(13/21)**

Bitumen sheet	
OI	pC
1.26E-07	8.7
0	10

Glass wool 036	
OI	pC
0.00054	7.907844394
0.000455	8.176061011
0	10

Liite 2 Delphin-ohjelmassa käytetyt materiaaliominaisuudet

(14/21)

NAME	=	Medium sand	
RHO	=	2650	kg/m ³
CE	=	1050	J/(kg·K)
LAMBDA	=	2.1	W/(m·K)
OPOR	=	0.38	m ³ /m ³
OEFF	=	0.37	m ³ /m ³
AW	=	0	kg/(m ² s ^{0.5})
MEW	=	15	-
KLEFF	=	7.01E-09	s
OCAP	=	0.37	m ³ /m ³
O80	=	0.156	m ³ /m ³

NAME	=	Medium sand_mod	
RHO	=	2650	kg/m ³
CE	=	1050	J/(kg·K)
LAMBDA	=	2.1	W/(m·K)
OPOR	=	0.38	m ³ /m ³
OEFF	=	0.37	m ³ /m ³
AW	=	0	kg/(m ² s ^{0.5})
MEW	=	15	-
KLEFF	=	7.01E-09	s
OCAP	=	0.37	m ³ /m ³
O80	=	0.156	m ³ /m ³

Veden huokosalipaineen ja kosteudenjohtavuuden kymmenkantaiset logaritmit kosteuspitoisuuden funktiona:

Medium sand			
OI	pC	OI	lgKI
0.37	0	0	-28.1542
0.369992108	4.1	0.0037	-28.1542
0.369986306	4.2	0.0074	-28.1542
0.369968587	4.3	0.0111	-28.1542
0.369947453	4.4	0.0148	-28.1542
0.369888723	4.5	0.0185	-28.1542
0.369820569	4.6	0.0222	-28.1542
0.369648689	4.7	0.0259	-28.1542
0.369454124	4.8	0.0296	-28.1542
0.369009976	4.9	0.0333	-27.9681
0.368518405	5	0.037	-27.7402
0.367505031	5.1	0.0407	-27.513
0.366405998	5.2	0.0444	-27.2863
0.364364423	5.3	0.0481	-27.0597
0.362190347	5.4	0.0518	-26.8333
0.358558305	5.5	0.0555	-26.607
0.354753366	5.6	0.0592	-26.3807
0.349045953	5.7	0.0629	-26.1544
0.343153503	5.8	0.0666	-25.9282
0.335225039	5.9	0.0703	-25.7019
0.327143851	6	0.074	-25.4757
0.317382182	6.1	0.0777	-25.2495
0.307539431	6.2	0.0814	-25.0233
0.296804539	6.3	0.0851	-24.7971
0.286066632	6.4	0.0888	-24.5708
0.275295573	6.5	0.0925	-24.3446
0.264557974	6.6	0.0962	-24.1184
0.25418855	6.7	0.0999	-23.8922
0.243814205	6.8	0.1036	-23.666
0.233385744	6.9	0.1073	-23.4398
0.222851266	7	0.111	-23.2135
0.211150305	7.1	0.1147	-22.9873
0.199243927	7.2	0.1184	-22.7611
0.185077323	7.3	0.1221	-22.5349
0.17069055	7.4	0.1258	-22.3087
0.153881146	7.5	0.1295	-22.0825
0.136962219	7.6	0.1332	-21.8563
0.118838161	7.7	0.1369	-21.63
0.100799851	7.8	0.1406	-21.4038
0.083705074	7.9	0.1443	-21.1776
0.066878011	8	0.148	-20.9514
0.05299665	8.1	0.1517	-20.7252
0.039468414	8.2	0.1554	-20.499
0.029825752	8.3	0.1591	-20.2728
0.020510254	8.4	0.1628	-20.0465
0.014794702	8.5	0.1665	-19.8203
0.009314732	8.6	0.1702	-19.5941

Medium sand_mod			
OI	pC	OI	lgKI
0.37	0	0	-28.1542
0.369992108	4.1	0.0037	-28.1542
0.369986306	4.2	0.0074	-28.1542
0.369968587	4.3	0.0111	-28.1542
0.369947453	4.4	0.0148	-28.1542
0.369888723	4.5	0.0185	-28.1542
0.369820569	4.6	0.0222	-28.1542
0.369648689	4.7	0.0259	-28.1542
0.369454124	4.8	0.0296	-28.1542
0.369009976	4.9	0.0333	-27.9681
0.368518405	5	0.037	-27.7402
0.367505031	5.1	0.0407	-27.513
0.366405998	5.2	0.0444	-27.2863
0.364364423	5.3	0.0481	-27.0597
0.362190347	5.4	0.0518	-26.8333
0.358558305	5.5	0.0555	-26.607
0.354753366	5.6	0.0592	-26.3807
0.349045953	5.7	0.0629	-26.1544
0.343153503	5.8	0.0666	-25.9282
0.335225039	5.9	0.0703	-25.7019
0.327143851	6	0.074	-25.4757
0.317382182	6.1	0.0777	-25.2495
0.307539431	6.2	0.0814	-25.0233
0.296804539	6.3	0.0851	-24.7971
0.286066632	6.4	0.0888	-24.5708
0.275295573	6.5	0.0925	-24.3446
0.264557974	6.6	0.0962	-24.1184
0.25418855	6.7	0.0999	-23.8922
0.243814205	6.8	0.1036	-23.666
0.233385744	6.9	0.1073	-23.4398
0.222851266	7	0.111	-23.2135
0.211150305	7.1	0.1147	-22.9873
0.199243927	7.2	0.1184	-22.7611
0.185077323	7.3	0.1221	-22.5349
0.17069055	7.4	0.1258	-22.3087
0.153881146	7.5	0.1295	-22.0825
0.136962219	7.6	0.1332	-21.8563
0.118838161	7.7	0.1369	-21.63
0.100799851	7.8	0.1406	-21.4038
0.083705074	7.9	0.1443	-21.1776
0.066878011	8	0.148	-20.9514
0.05299665	8.1	0.1517	-20.7252
0.039468414	8.2	0.1554	-20.499
0.029825752	8.3	0.1591	-20.2728
0.020510254	8.4	0.1628	-20.0465
0.014794702	8.5	0.1665	-19.8203
0.009314732	8.6	0.1702	-19.5941

Liite 2 Delphin-ohjelmassa käytetyt materiaaliominaisuudet

(15/21)

Medium sand			
OI	pC	OI	IgKI
0.006426941	8.7	0.1739	-19.3679
0.003676165	8.8	0.1776	-19.1417
0.002433005	8.9	0.1813	-18.9155
0.001255436	9	0.185	-18.6892
0.000799555	9.1	0.1887	-18.463
0.000369789	9.2	0.1924	-18.2368
0.000227398	9.3	1.96E-01	-18.0106
9.37E-05	9.4	2.00E-01	-17.7844
5.58E-05	9.5	2.04E-01	-17.5582
2.04E-05	9.6	2.07E-01	-17.332
1.18E-05	9.7	0.2109	-17.1057
0	10	0.2146	-16.8795
		0.2183	-16.6533
		0.222	-16.4271
		0.2257	-16.2009
		0.2294	-15.9747
		0.2331	-15.7485
		0.2368	-15.5222
		0.2405	-15.296
		0.2442	-15.0698
		0.2479	-14.8399
		0.2516	-14.5943
		0.2553	-14.351
		0.259	-14.1152
		0.2627	-13.883
		0.2664	-13.6592
		0.2701	-13.4372
		0.2738	-13.2185
		0.2775	-13.0028
		0.2812	-12.7917
		0.2849	-12.5836
		0.2886	-12.3792
		0.2923	-12.1791
		0.296	-11.9835
		0.2997	-11.7892
		0.3034	-11.5961
		0.3071	-11.4054
		0.3108	-11.2168
		0.3145	-11.0303
		0.3182	-10.8452
		0.3219	-10.663
		0.3256	-10.4822
		0.3293	-10.3002
		0.333	-10.1177
		0.3367	-9.9336
		0.3404	-9.74904
		0.3441	-9.55942
		0.3478	-9.36862
		0.3515	-9.16781
		0.3552	-8.96543
		0.3589	-8.72713
		0.3626	-8.48448
		0.3663	-8.31718
		0.37	-8.15418

Medium sand_mod			
OI	pC	OI	IgKI
0.006426941	8.7	0.1739	-19.3679
0.003676165	8.8	0.1776	-19.1417
0.002433005	8.90E+00	1.81E-01	-18.9155
0.001255436	9.00E+00	1.85E-01	-18.6892
0.000799555	9.10E+00	1.89E-01	-18.463
0.000369789	9.20E+00	1.92E-01	-18.2368
0.000227398	9.3	0.1961	-18.0106
9.37E-05	9.4	0.1998	-1.78E+01
5.58E-05	9.5	0.2035	-1.76E+01
2.04E-05	9.6	0.2072	-1.73E+01
1.18E-05	9.7	0.2109	-1.71E+01
0	10	0.2146	-16.8795
		0.2183	-16.6533
		0.222	-16.4271
		0.2257	-16.2009
		0.2294	-15.9747
		0.2331	-15.7485
		0.2368	-15.5222
		0.2405	-15.296
		0.2442	-15.0698
		0.2479	-14.8399
		0.2516	-14.5943
		0.2553	-14.351
		0.259	-14.1152
		0.2627	-13.883
		0.2664	-13.6592
		0.2701	-13.4372
		0.2738	-13.2185
		0.2775	-13.0028
		0.2812	-12.7917
		0.2849	-12.5836
		0.2886	-12.3792
		0.2923	-12.1791
		0.296	-11.9835
		0.2997	-11.7892
		0.3034	-11.5961
		0.3071	-11.4054
		0.3108	-11.2168
		0.3145	-11.0303
		0.3182	-10.8452
		0.3219	-10.663
		0.3256	-10.4822
		0.3293	-10.3002
		0.333	-10.1177
		0.3367	-9.9336
		0.3404	-9.74904
		0.3441	-9.55942
		0.3478	-9.36862
		0.3515	-9.16781
		0.3552	-8.96543
		0.3589	-8.72713
		0.3626	-8.48448
		0.3663	-8.31718
		0.37	-8.15418

Liite 2 Delphin-ohjelmassa käytetyt materiaaliominaisuudet

(16/21)

NAME	=	Spruce SW_Fi Dresden	
FLAGS	=	AIRTIGHT	WOOD
RHO	=	530	kg/m ³
CE	=	2000	J/(kg·K)
LAMBDA	=	0.13	W/(m·K)
OPOR	=	0.7	m ³ /m ³
OEFF	=	0.695	m ³ /m ³
AW	=	0.0582	kg/(m ² s ^{0.5})
MEW	=	236	-
KLEFF	=	4.00E-09	s
OCAP	=	0.55	m ³ /m ³
O80	=	0.0749	m ³ /m ³

NAME	=	Leca	
FLAGS	=	WATERTIGHT	
RHO	=	270	kg/m ³
CE	=	1000	J/(kg·K)
LAMBDA	=	0.1	W/(m·K)
OPOR	=	0.73	m ³ /m ³
OEFF	=	0.73	m ³ /m ³
AW	=	0	kg/(m ² s ^{0.5})
MEW	=	5	-
KLEFF	=	0.00E+00	s

Veden huokosalipaineen ja kosteudenjohtavuuden kymmenkantaiset logaritmit kosteuspitäisyyden funktiona:

Spruce SW_Fi Dresden			
OI	pC	OI	IgKI
0.69499738	0	0	-28.3979
0.694965945	0.1	0.00695	-20.0000
0.694933565	0.2	0.0139	-20.0000
0.694890767	0.3	0.02085	-20.0000
0.694846836	0.4	0.0278	-20.0000
0.694790541	0.5	0.03475	-19.5929
0.69473287	0.6	0.0417	-19.1265
0.694660117	0.7	0.04865	-18.6602
0.694585731	0.8	0.0556	-18.1939
0.694493366	0.9	0.06255	-17.7275
0.694399103	1	0.0695	-17.2612
0.694283914	1.1	0.07645	-16.7949
0.694166563	1.2	0.0834	-16.3286
0.694025429	1.3	0.09035	-15.8622
0.693881898	1.4	0.0973	-15.5045
0.693712019	1.5	0.10425	-15.4086
0.693539555	1.6	0.1112	-15.3128
0.693338672	1.7	0.11815	-15.2170
0.693135086	1.8	0.1251	-15.1212
0.692901719	1.9	0.13205	-15.0253
0.692665606	2	0.139	-14.9294
0.692399241	2.1	0.14595	-14.8336
0.692130164	2.2	0.1529	-14.7378
0.69183121	2.3	0.15985	-14.6420
0.691529531	2.4	0.1668	-14.5461
0.691197912	2.5	0.17375	-14.4502
0.690862846	2.6	0.1807	-14.3544
0.690489888	2.7	0.18765	-14.2585
0.690109153	2.8	0.1946	-14.1628
0.689642801	2.9	0.20155	-14.0668
0.689151228	3	0.2085	-13.9710
0.688382196	3.1	0.21545	-13.8751
0.687534505	3.2	0.2224	-13.7791
0.685821267	3.3	0.22935	-13.6832
0.683902928	3.4	0.2363	-13.5872
0.679727841	3.5	0.24325	-13.4911
0.675122826	3.6	0.2502	-13.3948
0.665787155	3.7	0.25715	-13.2983
0.655743745	3.8	0.2641	-13.2016
0.637912839	3.9	0.27105	-13.1045
0.619200548	4	0.278	-13.0070
0.59078999	4.1	0.28495	-12.9089
0.561624586	4.2	0.2919	-12.8102
0.524153286	4.3	0.29885	-12.7106
4.86E-01	4.4	0.3058	-12.6100
4.46E-01	4.5	0.31275	-12.5083

Leca	
OI	pC
0.73	0
0.73	2.8
0.73	2.85
0.7299	2.9
0.7299	2.95
0.7299	3
0.7299	3.05
0.7299	3.1
0.7299	3.15
0.7299	3.2
0.7298	3.25
0.7298	3.3
0.7298	3.35
0.7297	3.4
0.7297	3.45
0.7296	3.5
0.7295	3.55
0.7294	3.6
0.7293	3.65
0.7292	3.7
0.7291	3.75
0.7289	3.8
0.7287	3.85
0.7285	3.9
0.7282	3.95
0.7279	4
0.7275	4.05
0.727	4.1
0.7265	4.15
0.7259	4.2
0.7251	4.25
0.7242	4.3
0.7232	4.35
0.722	4.4
0.7205	4.45
0.7189	4.5
0.7169	4.55
0.7145	4.6
0.7118	4.65
0.7086	4.7
0.7049	4.75
0.7005	4.8
0.6954	4.85
0.6894	4.9
0.6826	4.95
0.6746	5

Liite 2 Delphin-ohjelmassa käytetyt materiaaliominaisuudet

(17/21)

Spruce SW_Fi Dresden			
OI	pC	OI	IgKI
4.05E-01	4.6	0.3197	-12.4054
3.68E-01	4.7	0.32665	-12.3010
0.332524404	4.8	0.3336	-12.1950
0.305156659	4.9	3.41E-01	-12.0874
0.278597651	5	3.48E-01	-11.9780
0.260937472	5.1	3.54E-01	-11.9175
0.243719062	5.2	3.61E-01	-11.8730
0.231361539	5.3	0.36835	-11.8139
0.218979307	5.4	0.3753	-11.7410
0.206325206	5.5	0.38225	-11.6532
0.193612419	5.6	0.3892	-11.5525
0.180253852	5.7	0.39615	-11.4400
0.167183876	5.8	0.4031	-11.3215
0.15728937	5.9	0.41005	-11.1977
0.147763401	6	0.417	-11.0710
0.142292549	6.1	0.42395	-10.9445
0.136971073	6.2	0.4309	-10.8200
0.133293195	6.3	0.43785	-10.7027
0.129605205	6.4	0.4448	-10.5966
0.125806057	6.5	0.45175	-10.4905
0.121954673	6.6	0.4587	-10.3844
0.117528566	6.7	0.46565	-10.2783
0.113050034	6.8	0.4726	-10.1799
0.107994764	6.9	0.47955	-10.0972
0.102897377	7	0.4865	-10.0223
0.097336627	7.1	0.49345	-9.9540
0.091749091	7.2	0.5004	-9.8912
0.085866791	7.3	0.50735	-9.8331
0.07997618	7.4	0.5143	-9.7794
0.073994162	7.5	0.52125	-9.7297
0.068023361	7.6	0.5282	-9.6829
0.062176014	7.7	0.53515	-9.6386
0.056358155	7.8	0.5421	-9.5963
0.050864819	7.9	0.54905	-9.5554
0.045415943	8	0.556	-9.5088
0.040456298	8.1	0.56295	-9.4532
0.035551342	8.2	0.5699	-9.3976
0.031248201	8.3	0.57685	-9.3421
0.027004656	8.4	0.5838	-9.2866
0.02341685	8.5	0.59075	-9.2311
0.019888468	8.6	0.5977	-9.1755
0.017013892	8.7	0.60465	-9.1199
0.014194423	8.8	0.6116	-9.0644
0.011981251	8.9	0.61855	-9.0089
0.009816048	9	0.6255	-8.9533
0.00817867	9.1	0.63245	-8.8978
0.006580726	9.2	0.6394	-8.8422
0.005416663	9.3	0.64635	-8.7867
0.004283334	9.4	0.6533	-8.7312
0.003488108	9.5	0.66025	-8.6757
0.002715643	9.6	0.6672	-8.6201
0.002193615	9.7	0.67415	-8.5646
0.001688051	9.8	0.6811	-8.5090
0.001363722	9.9	0.68805	-8.4535
0	10	0.695	-8.3979

Leca	
OI	pC
0.6655	5.05
0.655	5.1
0.643	5.15
0.6294	5.2
0.614	5.25
0.5968	5.3
0.5777	5.35
0.5567	5.4
0.5337	5.45
0.5089	5.5
0.4824	5.55
0.4544	5.6
0.4253	5.65
0.3953	5.7
0.365	5.75
0.3347	5.8
0.3047	5.85
0.2756	5.9
0.2476	5.95
0.2211	6
0.1963	6.05
0.1733	6.1
0.1523	6.15
0.1332	6.2
0.116	6.25
0.1006	6.3
0.087	6.35
0.075	6.4
0.0645	6.45
0.0554	6.5
0.0474	6.55
0.0406	6.6
0.0346	6.65
0.0295	6.7
0.0251	6.75
0.0214	6.8
0.0182	6.85
0.0155	6.9
0.0131	6.95
0.0111	7
0.0095	7.05
0.008	7.1
0.0068	7.15
0.0058	7.2
0.0049	7.25
0.0041	7.3
0.0035	7.35
0.003	7.4
0.0025	7.45
0.0021	7.5
0.0018	7.55
0.0015	7.6
0.0013	7.65
0.0011	7.7
0.0009	7.75
0.0008	7.8
0.0007	7.85
0.0006	7.9
0.0005	7.95
0.0004	8
0.0003	8.05

Liite 2 Delphin-ohjelmassa käytetyt materiaaliominaisuudet**(18/21)**

Leca	
OI	pC
0.0003	8.1
0.0002	8.15
0.0002	8.2
0.0002	8.25
0.0001	8.3
0.0001	8.35
0.0001	8.4
0.0001	8.45
0.0001	8.5
0.0001	8.55
0.0001	8.6
0	8.65
0	10

Liite 2 Delphin-ohjelmassa käytetyt materiaaliominaisuudet

(19/21)

NAME	=	Concrete C20_25 (IBK)	
RHO	=	2320	kg/m ³
CE	=	850	J/(kg·K)
LAMBDA	=	2.1	W/(m·K)
OPOR	=	0.143	m ³ /m ³
OEFF	=	0.1429	m ³ /m ³
AW	=	0.02	kg/(m ² s ^{0.5})
MEW	=	110	-
KLEFF	=	4.40E-11	s
OCAP	=	0.136	m ³ /m ³
O80	=	0.0582	m ³ /m ³

NAME	=	Polystyrene board-expanded (IBK)	
FLAGS	=	AIRTIGHT	WATERTIGHT
RHO	=	23	kg/m ³
CE	=	1500	J/(kg·K)
LAMBDA	=	0.036	W/(m·K)
OPOR	=	0.93	m ³ /m ³
OEFF	=	0.92	m ³ /m ³
AW	=	1.00E-05	kg/(m ² s ^{0.5})
MEW	=	96	-
KLEFF	=	0.00E+00	s
O80	=	0.0006	m ³ /m ³

Veden huokosalipaineen ja kosteudenjohtavuuden kymmenkantaiset logaritmit kosteuspitäisyyden funktiona:

Concrete C20_25 (IBK)			
OI	pC	OI	lgKI
0.1429	0	0	-30.3564
0.142894	0.5	0.001429	-30.3564
0.142891	0.6	0.002858	-30.3564
0.142886	0.7	0.004287	-30.3564
0.142881	0.8	0.005716	-30.3564
0.142871	0.9	0.007145	-30.3564
0.142861	1	0.008574	-30.3564
0.142845	1.1	0.010003	-30.3564
0.142828	1.2	0.011432	-30.3564
0.142801	1.3	0.012861	-30.3564
0.142773	1.4	0.01429	-30.3564
0.142732	1.5	0.015719	-19.8105
0.14269	1.6	0.017148	-19.5063
0.14263	1.7	0.018577	-19.2701
0.142569	1.8	0.020006	-19.0698
0.142488	1.9	0.021435	-18.8921
0.142404	2	0.022864	-18.7299
0.1423	2.1	0.024293	-18.5794
0.142193	2.2	0.025722	-18.4377
0.142066	2.3	0.027151	-18.3032
0.141937	2.4	0.02858	-18.1743
0.141789	2.5	0.030009	-18.05
0.14164	2.6	0.031438	-17.9296
0.141476	2.7	0.032867	-17.8122
0.14131	2.8	0.034296	-17.6974
0.141128	2.9	0.035725	-17.5845
0.140945	3	0.037154	-17.4733
0.140742	3.1	0.038583	-17.3631
0.140537	3.2	0.040012	-17.2539
0.140298	3.3	0.041441	-17.1452
0.140054	3.4	0.04287	-17.0598
0.139751	3.5	0.044299	-17.0203
0.13944	3.6	0.045728	-16.9782
0.139032	3.7	0.047157	-16.9335
0.138611	3.8	0.048586	-16.886
0.138044	3.9	0.050015	-16.8358
0.137458	4	0.051444	-16.7835
0.13667	4.1	0.052873	-16.7295
0.135859	4.2	0.054302	-16.6735
0.13479	4.3	0.055731	-16.6158
0.133695	4.4	0.05716	-16.5566
0.1323	4.5	0.058589	-16.4962
0.130877	4.6	0.060018	-16.4344
0.129137	4.7	0.061447	-16.3714
0.127369	4.8	0.062876	-16.3073
0.125299	4.9	0.064305	-16.2419
0.123206	5	0.065734	-16.1753

Polystyrene board-expanded (IBK)	
OI	pC
0.919999328	0
0.919968748	0.3
0.919954101	0.4
0.91993135	0.5
0.919907494	0.6
0.919871467	0.7
0.91983383	0.8
0.91977863	0.9
0.919721194	1
0.919639351	1.1
0.919554536	1.2
0.919437126	1.3
0.919315916	1.4
0.919152947	1.5
0.918985332	1.6
0.918766482	1.7
0.918542168	1.8
0.918257787	1.9
0.917967315	2
0.917609785	2.1
0.917245796	2.2
0.916810857	2.3
0.916369505	2.4
0.915857571	2.5
0.915339712	2.6
0.914756681	2.7
0.9141687	2.8
0.913526245	2.9
0.91288024	3
0.912195244	3.1
0.911508437	3.2
0.910801711	3.3
0.910095041	3.4
0.909389024	3.5
0.908684662	3.6
0.907998563	3.7
0.907314111	3.8
0.906647902	3.9
0.90597679	4
0.905251765	4.1
0.904493032	4.2
0.90336352	4.3
0.90211129	4.4
0.89950872	4.5
0.896570618	4.6
0.889940601	4.7
0.882586296	4.8

Liite 2 Delphin-ohjelmassa käytetyt materiaaliominaisuudet

(20/21)

Concrete C20_25 (IBK)			
OI	pC	OI	IgKI
0.120859	5.1	0.067163	-16.1073
0.118498	5.2	0.068592	-16.0378
0.115966	5.3	0.070021	-15.9667
0.113428	5.4	0.07145	-15.8938
0.110822	5.5	0.072879	-15.8187
0.108221	5.6	0.074308	-15.7408
0.10566	5.7	0.075737	-15.6596
0.103111	5.8	0.077166	-15.5749
0.100693	5.9	0.078595	-15.4862
0.0982926	6	0.080024	-15.3929
0.096075	6.1	0.081453	-15.2947
0.093873	6.2	0.082882	-15.1886
0.0918421	6.3	0.084311	-15.0759
0.089818	6.4	0.08574	-14.957
0.087869	6.5	0.087169	-14.8322
0.0859098	6.6	0.088598	-14.6994
0.0838388	6.7	0.090027	-14.5628
0.0817343	6.8	0.091456	-14.4237
0.0792625	6.9	0.092885	-14.2825
0.0767338	7	0.094314	-14.1417
0.0735794	7.1	0.095743	-14.0019
0.0703534	7.2	0.097172	-13.864
0.0663415	7.3	0.098601	-13.729
0.0622614	7.4	0.10003	-13.5959
0.0574322	7.5	0.101459	-13.4664
0.0525599	7.6	0.102888	-13.3397
0.0472121	7.7	0.104317	-13.2147
0.0418622	7.8	0.105746	-13.0936
0.0364886	7.9	0.107175	-12.9737
0.031157	8	0.108604	-12.856
0.0262891	8.1	0.110033	-12.74
0.0214966	8.2	0.111462	-12.625
0.0175334	8.3	0.112891	-12.5116
0.0136592	8.4	0.11432	-12.3984
0.0107638	8.5	0.115749	-12.2858
0.00795157	8.6	0.117178	-12.1731
0.00605487	8.7	0.118607	-12.06
0.00422341	8.8	0.120036	-11.9459
0.00310978	8.9	0.121465	-11.8308
0.00204012	9	0.122894	-11.7133
0.00145419	9.1	0.124323	-11.5941
0.000894075	9.2	0.125752	-11.4704
0.000617861	9.3	0.127181	-11.3441
0.000354938	9.4	0.12861	-11.2099
0.000238273	9.5	0.130039	-11.0713
0.00012765	9.6	0.131468	-10.9192
8.35022E-05	9.7	0.132897	-10.7582
4.18111E-05	9.8	0.134326	-10.6016
2.71724E-05	9.9	0.135755	-10.4489
0	10	0.137184	-10.3564
		0.138613	-10.3564
		0.140042	-10.3564
		0.141471	-10.3564
		0.1429	-10.3564

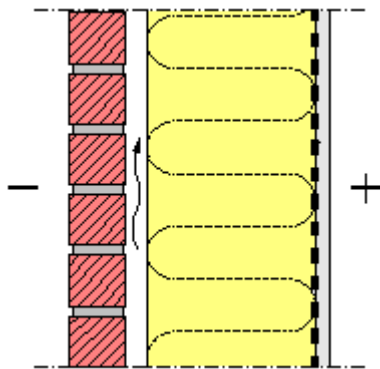
Polystyrene board-expanded (IBK)	
OI	pC
0.867262426	4.9
0.850704404	5
0.820566676	5.1
0.788810438	5.2
0.739245024	5.3
0.688157544	5.4
0.620322015	5.5
0.551710991	5.6
0.47456682	5.7
0.397779324	5.8
0.324916326	5.9
0.253362452	6
0.196213331	6.1
0.140724056	6.2
0.103498611	6.3
0.067696075	6.4
0.047550338	6.5
0.028327094	6.6
0.019254505	6.7
0.010652754	6.8
0.007231798	6.9
0.004003555	7
0.002895866	7.1
0.001852006	7.2
0.001510585	7.3
0.001186377	7.4
0.001051588	7.5
0.000920718	7.6
0.000832931	7.7
0.000746184	7.8
0.000670781	7.9
0.000596068	8
0.000528899	8.1
0.000462502	8.2
0.000404662	8.3
0.000347677	8.4
0.00030015	8.5
0.000253478	8.6
0.000216283	8.7
0.000179878	8.8
0.000152159	8.9
0.00012512	9
0.00010546	9.1
8.63328E-05	9.2
7.30572E-05	9.3
0	10

Liite 2 Delphin-ohjelmassa käytetyt materiaaliominaisuudet

(21/21)

NAME	=	Air	
FLAGS	=	AIR	WATERTIGHT
RHO	=	1.25	kg/m ³
CE	=	1000	J/(kg·K)
LAMBDA	=	4	W/(m·K)
MEW	=	1	-
KG	=	0.1	s

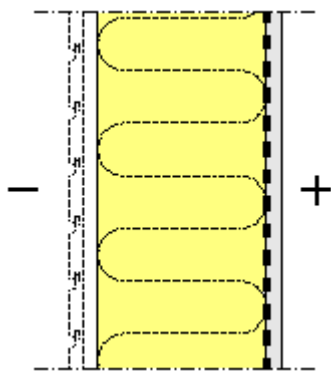
Tasapainokosteuskäyrä:
Ohjelma laskee ilman vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuuden lämpötilan perusteella.



Rakennekerrokset ulkoa sisällepäin:

Tiiliverhous 85 mm
Tuuletusväli 30 mm
Tuulensuojakalvo
Lasivilla 250
Höyrynsulkumuovi
Kipsilevy 13 mm

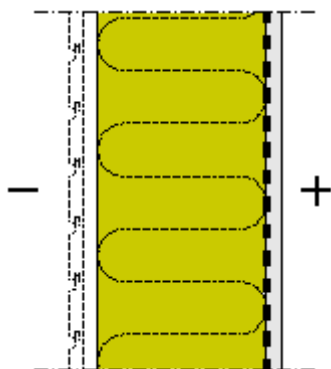
Kuva L3.1 *Tiiliverhottu rankaseinä.*



Rakennekerrokset ulkoa sisällepäin:

Puuverhous 20 mm
Tuuletusväli 20 mm
Tuulensuojakalvo
Lasivilla 250 mm
Höyrynsulkumuovi
Kipsilevy 13 mm

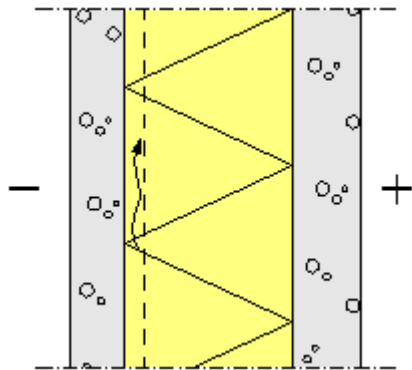
Kuva L3.2a *Puuverhottu rankaseinä, mineraalivillaeriste.*



Rakennekerrokset ulkoa sisällepäin:

Puuverhous 20 mm
Tuuletusväli 20 mm
Tuulensuojakalvo
Puukuitueriste 250 mm
Höyrynsulkumuovi
Kipsilevy 13 mm

Kuva L3.2b *Puuverhottu rankaseinä, puukuitueriste.*



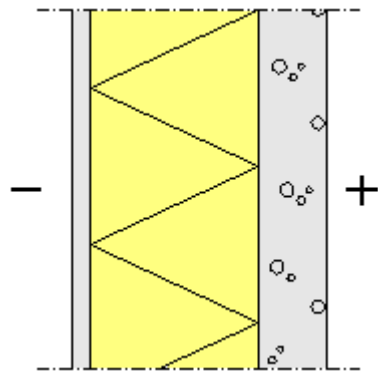
Rakennekerrokset ulkoa sisällepäin:

Betoni 80 mm

Uritettu kivivilla 250 mm

Betoni 100 mm

Kuva L3.3 *Betonsandwich-rakenne.*



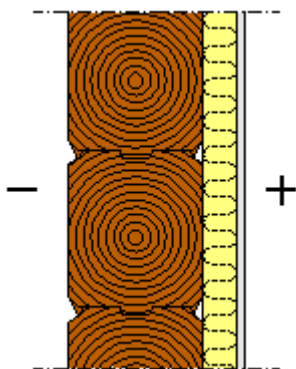
Rakennekerrokset ulkoa sisällepäin:

Kalkkisementtirappaus 25 mm

Kivivilla 250 mm

Betoni 100 mm

Kuva L3.4 *Eristerapattu betoniseinä.*



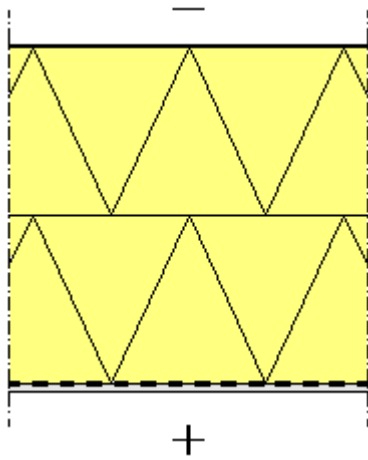
Rakennekerrokset ulkoa sisällepäin:

Hirsi 200 mm

Lasivilla 50 mm

Kipsilevy 13 mm

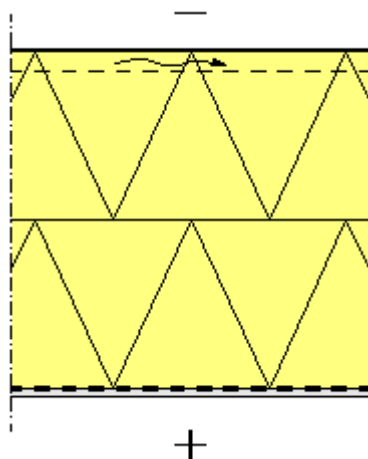
Kuva L3.5 *Sisäpuolelta lisäeristetty hirsiseinä.*



Rakennekerrokset ulkoa sisällepäin:

- Bitumihuopa 3 mm
- Lasivilla 520 mm
- Höyrinsulkumuovi
- Kipsilevy 13 mm

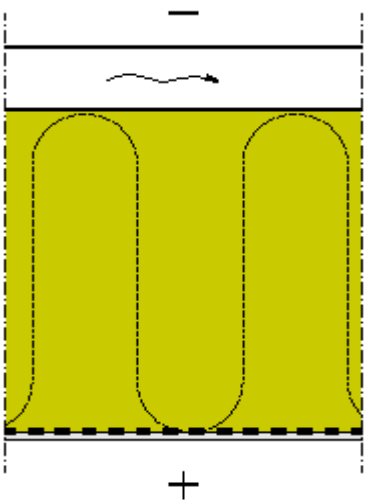
Kuva L3.6 Tuulettumaton yläpohja.



Rakennekerrokset ulkoa sisällepäin:

- Bitumihuopa 3 mm
- Uritettu lasivilla 520 mm
- Höyrinsulkumuovi
- Kipsilevy 13 mm

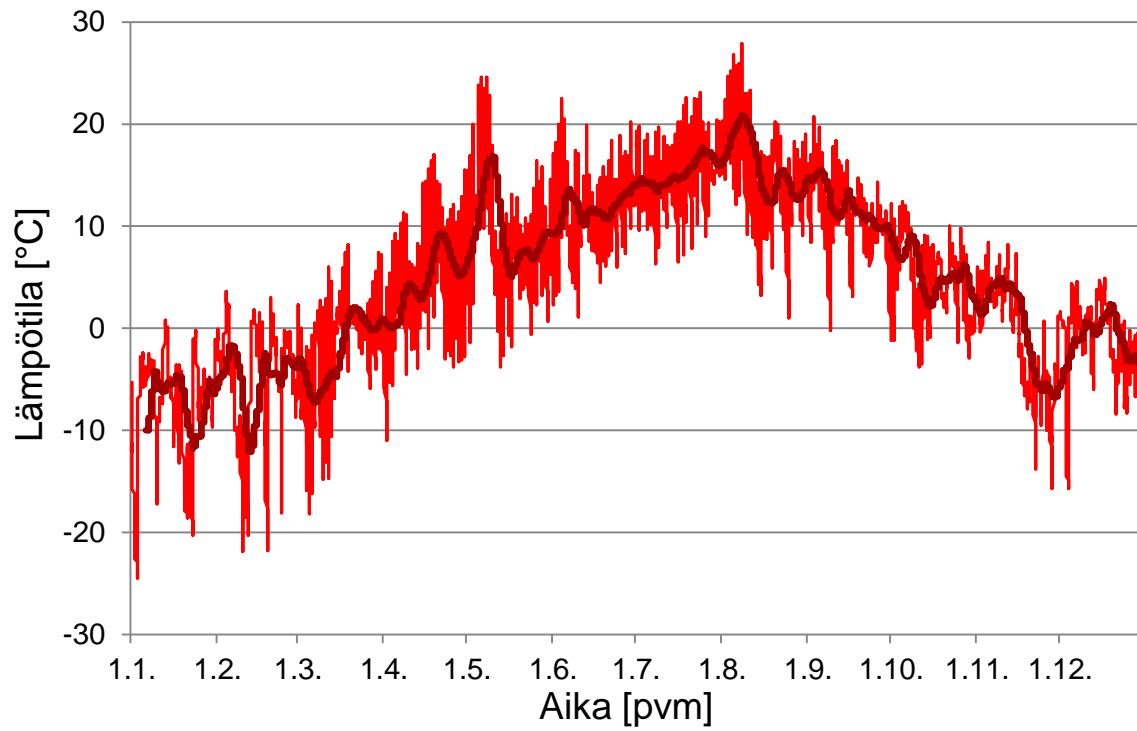
Kuva L3.7 Vähän tuuletettu yläpohja.



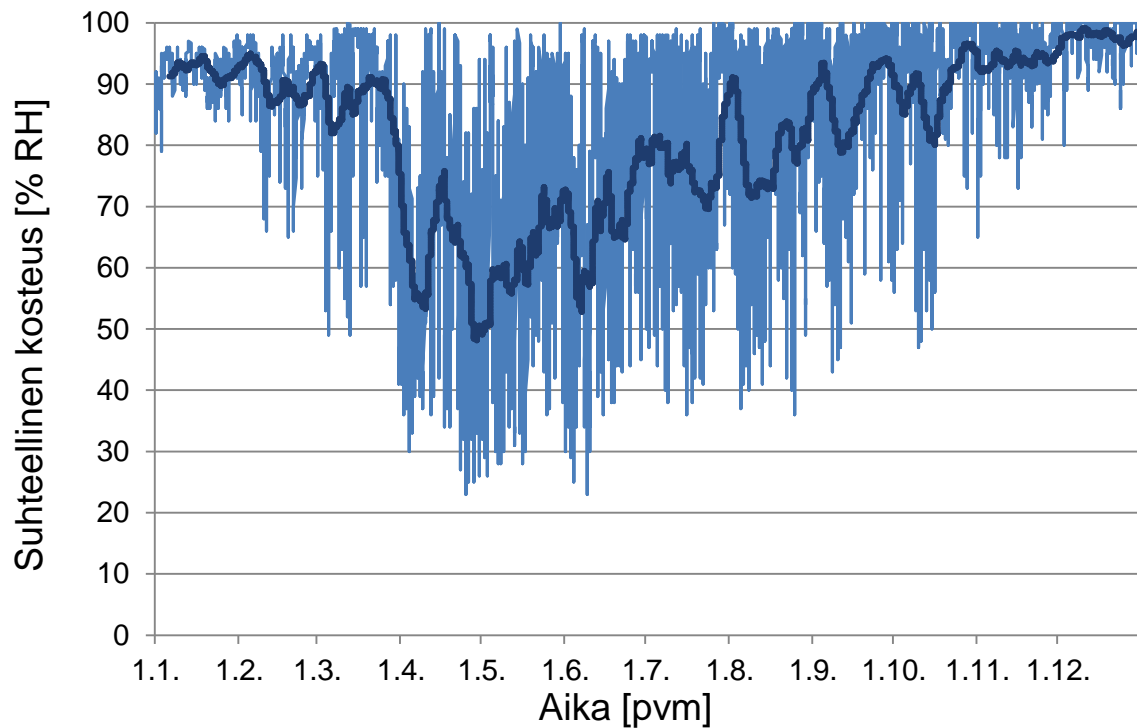
Rakennekerrokset ulkoa sisällepäin:

- Bitumihuopa 3 mm
- Tuuletusväli 100 mm
- Tuulensuojakalvo
- Puukuitueriste 500 mm
- Höyrinsulkumuovi
- Kipsilevy 13 mm

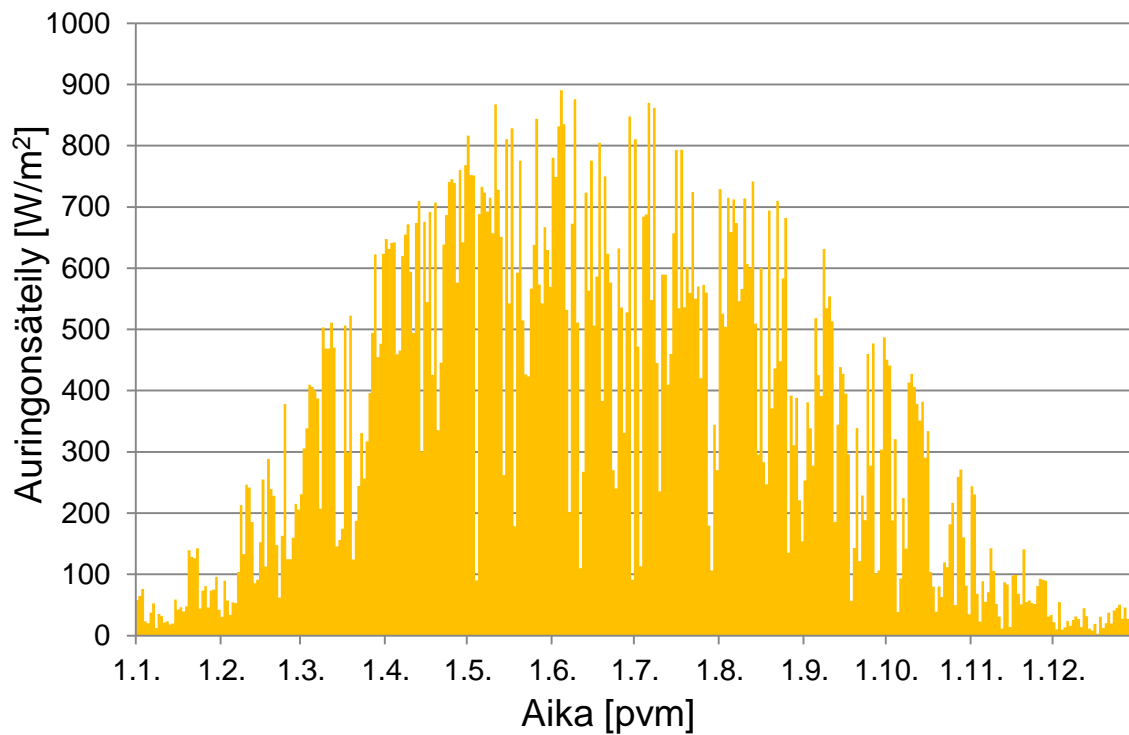
Kuva L3.8 Tuuletettu yläpohja.



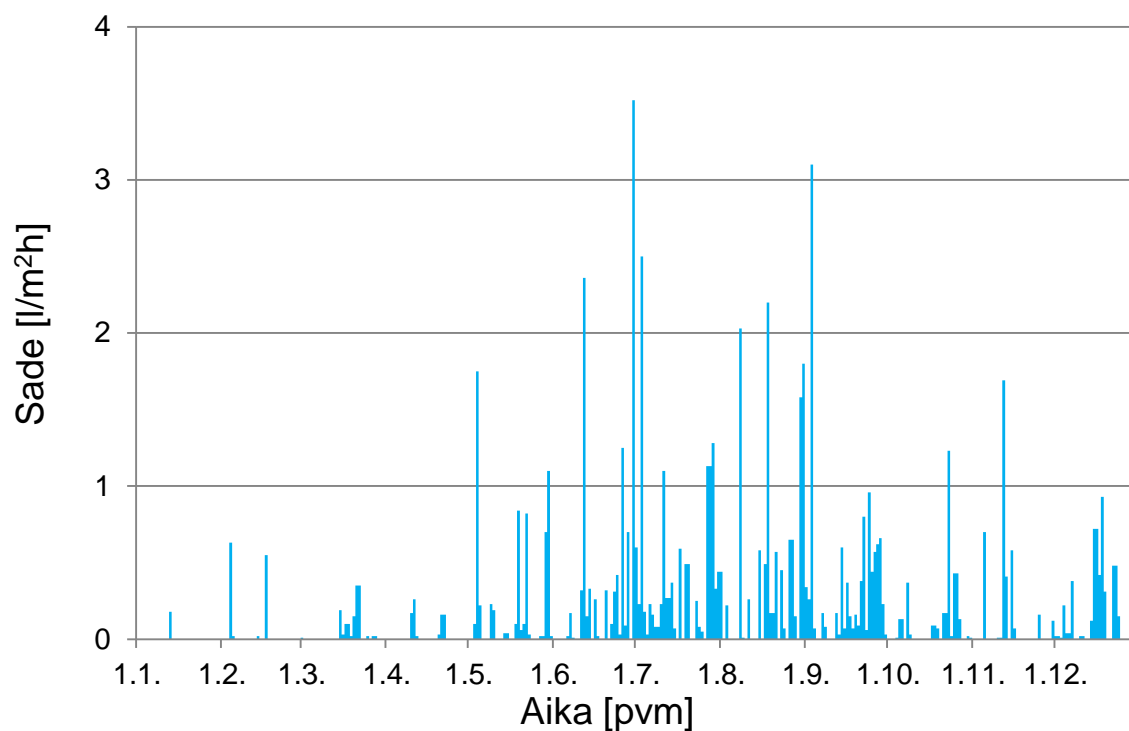
Kuva L4.1 Ulkoilman lämpötila Jokioisissa 2004.



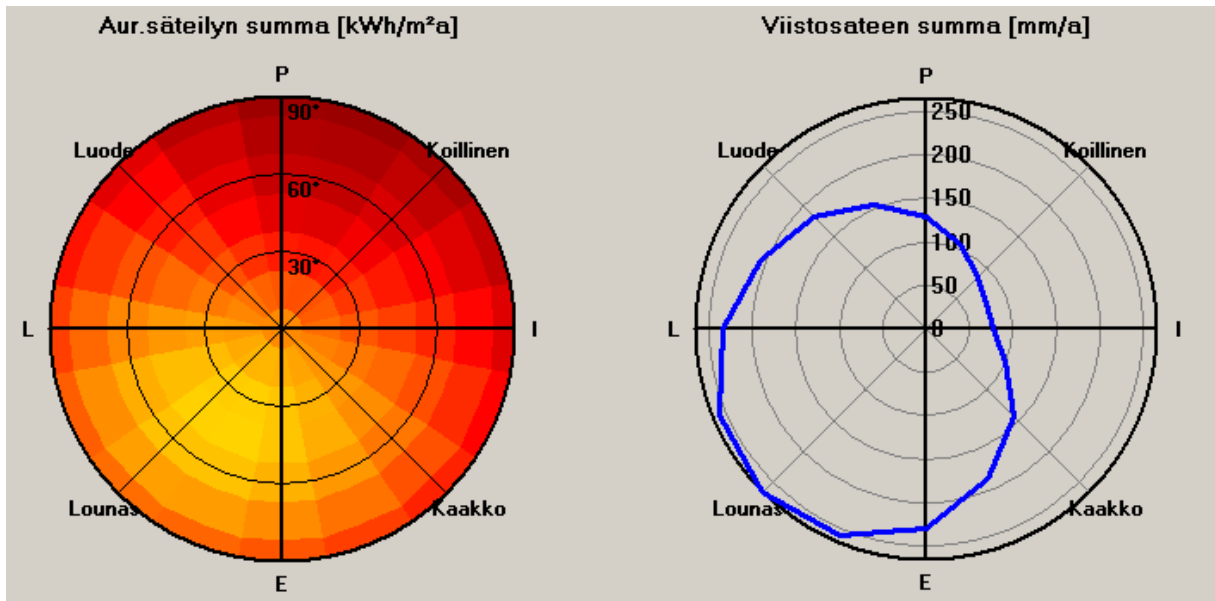
Kuva L4.2 Ulkoilman suhteellinen kosteus Jokioisissa 2004.



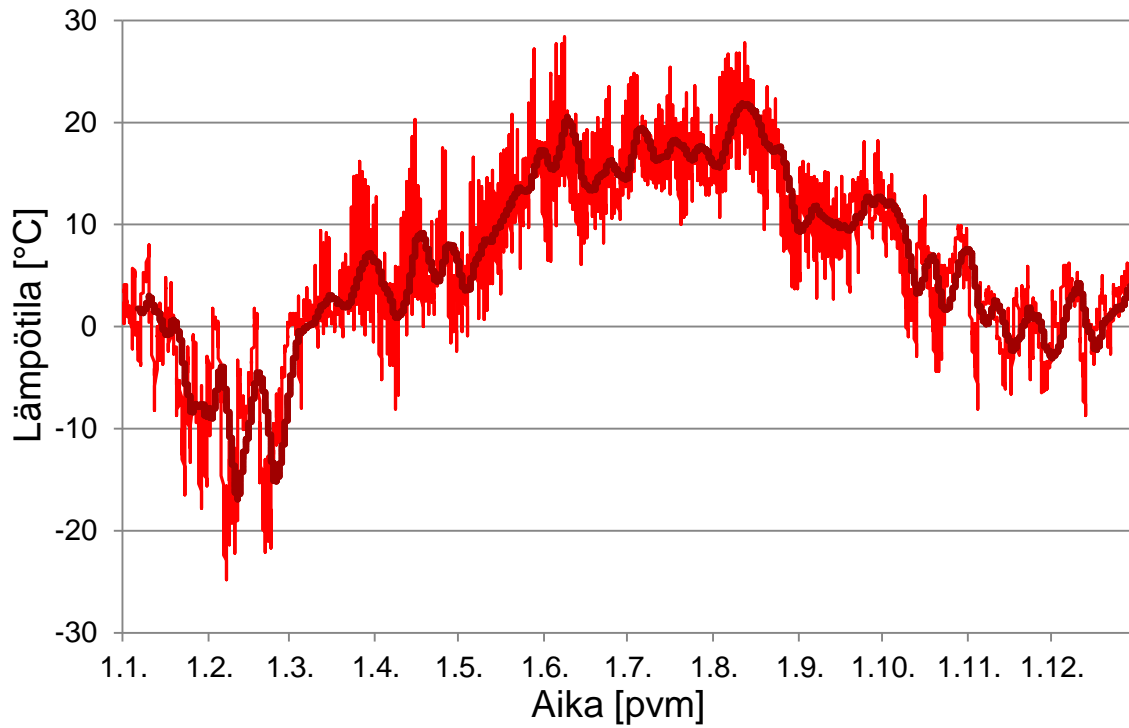
Kuva L4.3 Auringonsäteilyn kokonaismäärä (suora ja diffuusi) vaakapinnalle Jokioisissa 2004.



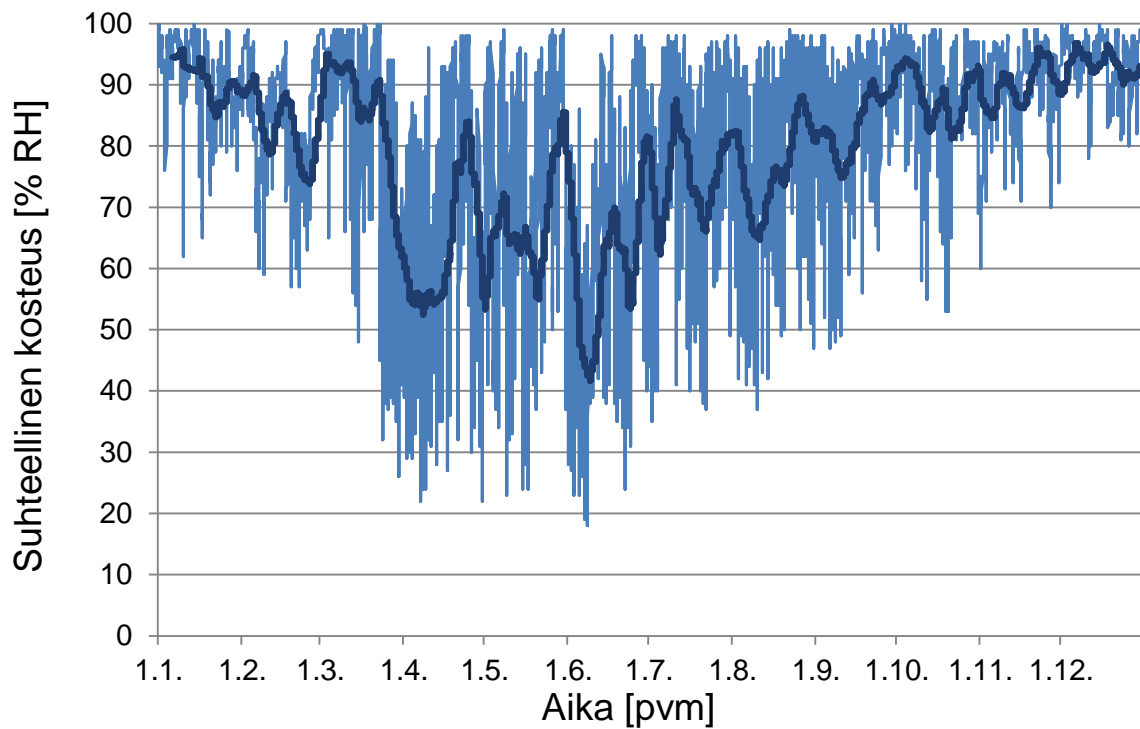
Kuva L4.4 Vetenä tulevan sateen kokonaismäärä vaakapinnalle Jokioisissa 2004.



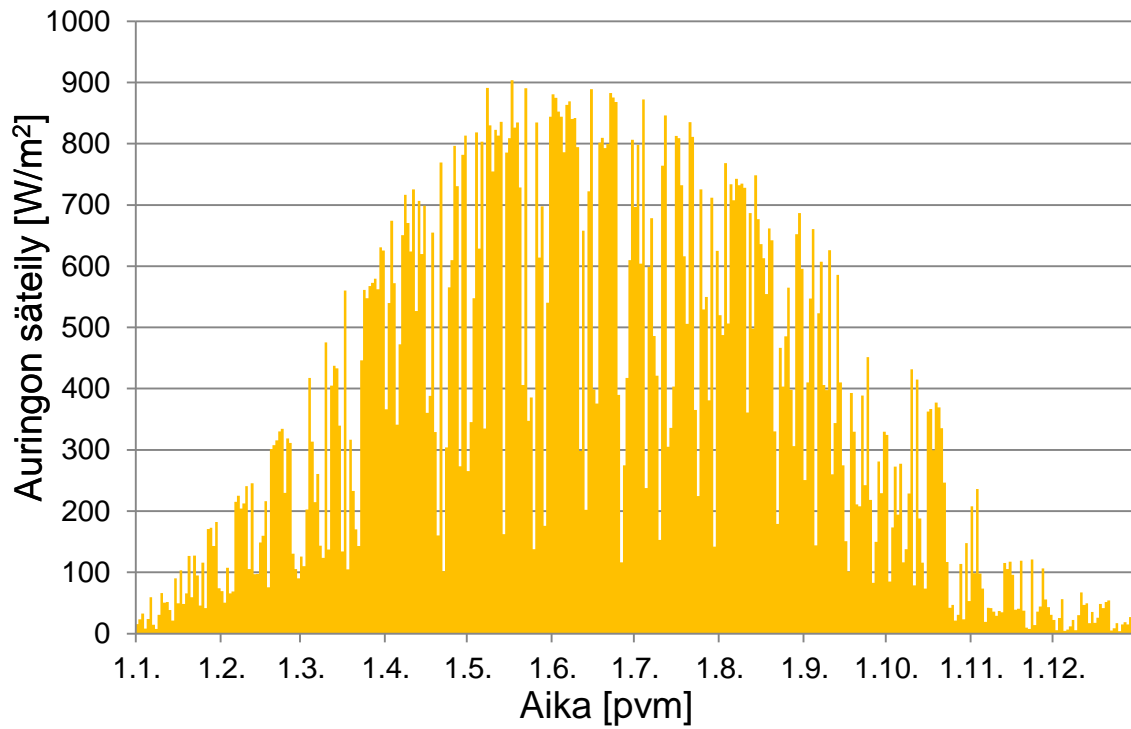
Kuva L4.5 Auringonsäteilyn kokonaismäärä (suora ja diffuusi) erisuuntaisille pinnoille (0° = vaakapinta, 90° = pystypinta) sekä vetenä tulevan viistosateen summa (lämpötila $\geq 0^\circ\text{C}$) erisuuntaisille pystypinnoille Jokioisissa 2004. Auringonsäteilyn summa aurinkoisimmalle pinnalle = $1096\text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ ja varjoisimmalle pinnalle = $361\text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$.



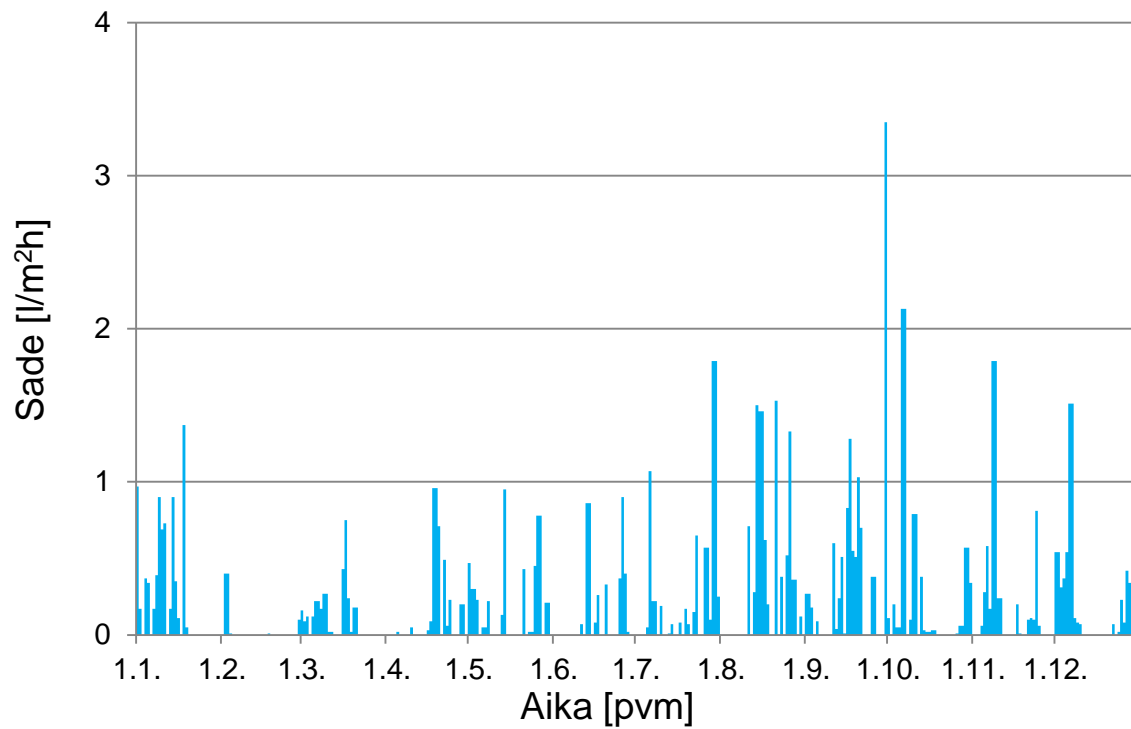
Kuva L4.6 Ulkoilman lämpötila Vantaalla 2007.



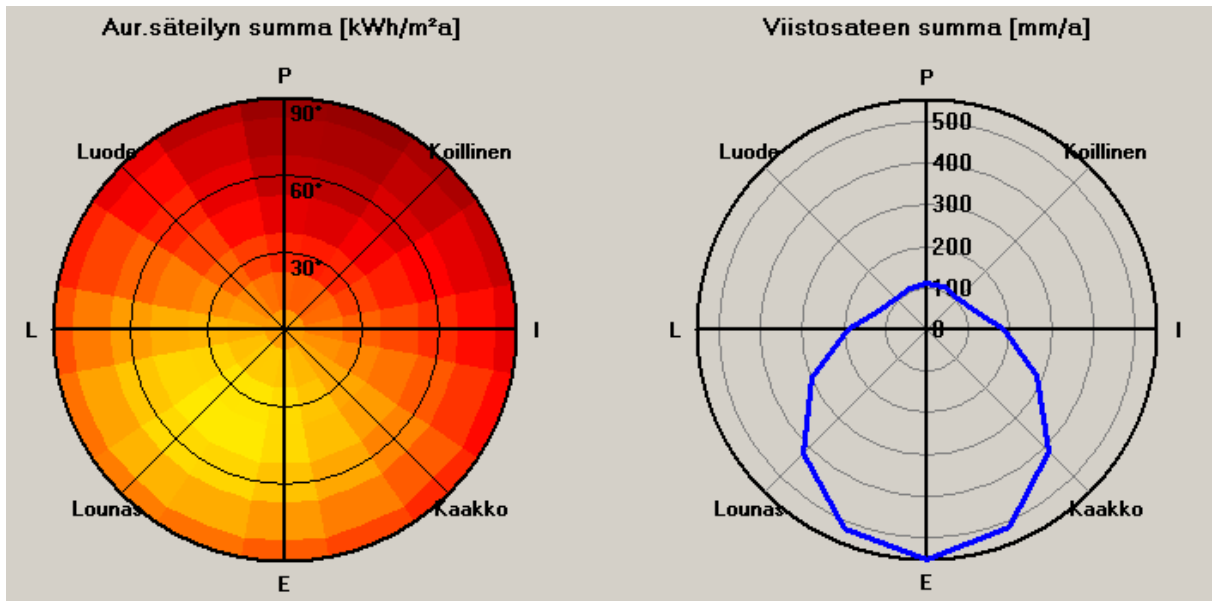
Kuva L4.7 Ulkoilman suhteellinen kosteus Vantaalla 2007.



Kuva L4.8 Auringonsäteilyn kokonaismäärä (suora ja diffuusi) vaakapinnalle Vantaalla 2007.



Kuva L4.9 Vetenä tulevan sateen kokonaismäärä vaakapinnalle Vantaalla 2007.



Kuva L4.10

Auringonsäteilyn kokonaismäärä (suora ja diffuusi) erisuuntaisille pinnoille (0° = vaakapinta, 90° = pystypinta) sekä vetenä tulevan viistosateen summa (lämpötila \geq $^\circ\text{C}$) erisuuntaisille pystypinnoille Vantaalla 2007. Auringonsäteilyn summa aurinkoisimmalle pinnalle = $1149 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ ja varjoisimmalle pinnalle = $354 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$.

Liite 4 Rakennusfysikaaliset testivuodet

(7/10)

Taulukko L4.1 Ulkoilman lämpötilan kuukauden keskiarvot Jokioisten nykyilmastossa sekä tulevaisuudessa vuosien 2050 ja 2100 ilmastoissa.

kk	Lämpötilan kk-keskiarvo [°C]		
	Jokioinen 2004	Jokioinen 2050	Jokioinen 2100
Tammi	-7,5	-4,4	-0,6
Helmi	-4,9	-2,1	1,2
Maalis	-1,8	0,6	3,5
Huhti	5,0	6,8	9,0
Touko	9,6	11,2	13,3
Kesä	12,2	13,7	15,8
Heinä	15,4	17,0	19,1
Elo	15,7	17,3	19,5
Syys	11,5	13,2	15,5
Loka	4,8	6,4	8,9
Marras	-0,7	1,4	4,0
Joulu	-0,9	1,2	3,9

Taulukko L4.2 Ulkoilman suhteellisen kosteuden kuukauden keskiarvot Jokioisten nykyilmastossa sekä tulevaisuudessa vuosien 2050 ja 2100 ilmastoissa.

kk	Suhteellisen kosteuden kk-keskiarvo [% RH]		
	Jokioinen 2004	Jokioinen 2050	Jokioinen 2100
Tammi	92,1	94,0	96,8
Helmi	90,2	92,3	93,8
Maalis	85,2	85,9	86,8
Huhti	59,7	60,5	62,1
Touko	64,5	62,9	64,5
Kesä	68,1	67,9	67,3
Heinä	78,1	77,8	78,5
Elo	79,4	78,8	78,2
Syys	88,1	87,6	87,6
Loka	90,0	90,2	90,4
Marras	94,0	94,3	95,6
Joulu	98,0	98,2	98,8

Taulukko L4.3 Auringonsäteilyn kokonaismäärä (suora ja diffuusi) vaakapinnalle kuukaudessa Jokioisten nykyilmastossa sekä tulevaisuudessa vuosien 2050 ja 2100 ilmastoissa.

kk	Auringonsäteilyn määrä vaakapinnalle [kWh/m ²]								
	Jokioinen 2004			Jokioinen 2050			Jokioinen 2100		
	Suora	Diff.	Yht.	Suora	Diff.	Yht.	Suora	Diff.	Yht.
Tammi	1,2	6,5	7,7	0,9	6,3	7,1	0,7	5,8	6,5
Helmi	6,5	18,2	24,7	5,2	17,6	22,9	4,2	16,4	20,6
Maalis	35,5	36,1	71,7	32,0	35,9	67,9	28,2	35,0	63,2
Huhti	93,1	49,9	143,0	90,0	49,9	139,9	84,7	49,9	134,6
Touko	81,9	67,9	149,8	81,9	67,9	149,8	80,4	67,9	148,3
Kesä	79,5	72,7	152,2	79,5	72,7	152,2	78,3	72,7	151,0
Heinä	59,6	78,5	138,2	59,7	78,5	138,3	57,9	78,5	136,4
Elo	67,3	57,2	124,5	67,5	57,2	124,7	68,0	57,2	125,1
Syys	24,7	38,3	63,0	26,1	38,3	64,5	27,9	38,3	66,2
Loka	16,9	18,6	35,5	17,6	18,6	36,2	18,2	18,6	36,8
Marras	2,8	7,9	10,6	2,6	7,9	10,4	2,3	7,8	10,1
Joulu	0,2	3,0	3,2	0,2	2,9	3,1	0,1	2,8	2,9
Yht.	469,2	454,8	924,0	463,2	453,7	916,9	450,9	451,0	901,8

Taulukko L4.4 Vetenä tulevan sateen kokonaismäärä vaakapinnalle kuukaudessa Jokioisten nykyilmastossa sekä tulevaisuudessa vuosien 2050 ja 2100 ilmastoissa.

kk	Sademäärä kuukaudessa [mm]		
	Jokioinen 2004	Jokioinen 2050	Jokioinen 2100
Tammi	2,4	6,1	30,0
Helmi	11,3	38,6	49,5
Maalis	10,6	14,1	18,5
Huhti	5,7	5,8	6,1
Touko	59,5	63,3	69,4
Kesä	115,7	124,6	136,0
Heinä	130,9	138,4	148,7
Elo	87,6	89,2	89,4
Syys	101,0	105,0	110,3
Loka	29,7	31,1	33,1
Marras	36,2	45,3	60,5
Joulu	53,5	67,3	79,7
Yhteensä	643,9	729,0	831,1

Taulukko L4.5 *Ulkoilman lämpötilan kuukauden keskiarvot Vantaan nykyilmastossa sekä tulevaisuudessa vuosien 2050 ja 2100 ilmastoissa.*

kk	Lämpötilan kk-keskiarvo [°C]		
	Vantaa 2007	Vantaa 2050	Vantaa 2100
Tammi	-2,5	0,2	3,9
Helmi	-9,3	-5,7	-1,8
Maalis	3,0	4,7	7,0
Huhti	5,2	7,0	9,4
Touko	11,6	13,3	15,5
Kesä	15,9	17,5	19,4
Heinä	17,3	18,8	20,7
Elo	17,1	18,6	20,6
Syys	11,2	12,9	15,1
Loka	6,3	7,9	10,4
Marras	-0,3	2,1	5,0
Joulu	1,6	3,8	6,8

Taulukko L4.6 *Ulkoilman suhteellisen kosteuden kuukauden keskiarvot Vantaan nykyilmastossa sekä tulevaisuudessa vuosien 2050 ja 2100 ilmastoissa.*

kk	Suhteellisen kosteuden kk-keskiarvo [% RH]		
	Vantaa 2007	Vantaa 2050	Vantaa 2100
Tammi	90,8	92,5	94,4
Helmi	83,2	86,4	89,3
Maalis	82,8	83,0	83,7
Huhti	63,2	64,1	65,6
Touko	69,5	68,6	70,1
Kesä	60,4	60,0	59,0
Heinä	75,6	75,1	75,3
Elo	76,4	75,8	74,6
Syys	84,8	84,3	84,1
Loka	88,2	88,7	88,9
Marras	89,5	91,0	92,2
Joulu	93,8	94,7	95,7

Taulukko L4.7 Auringonsäteilyn kokonaismäärä (suora ja diffuusi) vaakapinnalle kuukaudessa Vantaan nykyilmastossa sekä tulevaisuudessa vuosien 2050 ja 2100 ilmastoissa.

kk	Auringonsäteilyn määrä vaakapinnalle [kWh/m ²]								
	Vantaa 2007			Vantaa 2050			Vantaa 2100		
	Suora	Diff.	Yht.	Suora	Diff.	Yht.	Suora	Diff.	Yht.
Tammi	2,5	6,6	9,1	2,0	6,3	8,3	1,5	5,9	7,3
Helmi	11,6	17,8	29,4	9,9	17,1	27,0	8,0	16,1	24,1
Maalis	36,7	31,4	68,1	33,6	31,1	64,7	29,6	30,2	59,8
Huhti	76,4	48,6	125,0	72,9	48,6	121,5	68,0	48,6	116,6
Touko	94,2	61,9	156,1	93,7	61,9	155,5	91,9	61,9	153,8
Kesä	119,1	61,6	180,7	120,4	61,6	182,0	118,8	61,6	180,4
Heinä	84,5	66,9	151,4	84,8	66,9	151,6	83,1	66,8	149,9
Elo	84,6	52,2	136,8	84,7	52,2	137,0	86,5	52,2	138,7
Syys	26,3	40,8	67,1	27,4	40,8	68,2	29,3	40,8	70,1
Loka	11,2	20,8	32,0	11,6	20,8	32,3	11,6	20,8	32,4
Marras	2,0	6,8	8,8	1,7	6,6	8,4	1,5	6,4	7,8
Joulu	0,2	3,0	3,2	0,1	2,9	3,1	0,1	2,7	2,8
Yht.	549,4	418,4	967,8	542,8	416,9	959,7	529,7	413,9	943,6

Taulukko L4.8 Vetenä tulevan sateen kokonaismäärä vaakapinnalle kuukaudessa Vantaan nykyilmastossa sekä tulevaisuudessa vuosien 2050 ja 2100 ilmastoissa.

kk	Sademäärä kuukaudessa [mm]		
	Vantaa 2007	Vantaa 2050	Vantaa 2100
Tammi	72,2	101,2	129,9
Helmi	7,6	11,1	17,2
Maalis	27,9	31,0	34,6
Huhti	53,0	60,3	70,8
Touko	37,8	38,9	42,2
Kesä	44,4	46,0	48,5
Heinä	60,5	61,9	65,4
Elo	64,3	65,8	65,0
Syys	109,6	118,2	125,4
Loka	67,7	74,3	82,2
Marras	78,7	99,1	117,8
Joulu	80,6	103,3	125,9
Yhteensä	704,3	811,2	925,0

Liite 5 Eri maiden U-arvoihin liittyvää lainsäädäntöä ja standardeja (1/2)

Kaikkiin internetlähteisiin on viitattu maaliskuussa 2013.

Suomi: Suomen Rakentamismääräyskokoelma D3 (2012). Rakennusten energiatehokkuus, määräykset ja ohjeet. Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto, 2012.

http://www.finlex.fi/data/normit/37188-D3-2012_Suomi.pdf

Ruotsi: Boverkets Byggregler, BBR 19, avsnitt 9 – Energihushållning. Boverket 2011.

<http://www.boverket.se/Global/bygga-o-forvalta-ny/dokument/regler-om-byggande/boverkets-byggregler-bbr/bbr-19/bfs-2011-26-9.pdf>

Norja: Forskrift om tekniske krav til byggverk (Byggteknisk forskrift). FOR 2010-03-26 nr 489, § 14-3. Energiltak. Kommunal- og regionaldepartementet 2010.

<http://www.lovdatab.no/cgi-wifit/ldles?doc=/sf/sf/sf-20100326-0489.html#14-3>

Tanska: Bygningsreglementet BR2010, 7. Energiforbrug, 7.3.2 Varmeisolering af bygningsdele. Erhvervs- og Byggestyrelsen 2010.

http://www.bygningsreglementet.dk/br10_02_id113/0/42

Saksa: Energieeinsparverordnung – EnEV 2009. Anlagen zur EnEV 2009; 1: Anforderungen Wohnungsbau. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2009.

http://www.enev-online.org/enev_2009_volltext/enev_2009_anlage_01_anforderungen_an_wohngebaeude.pdf

Itävalta: OIB-Richtlinien 2011, Richtlinie 6: Energieeinsparung und Wärmeschutz. Österreichisches Institut für Bautechnik, 2011.

<http://www.oib.or.at/richtlinien11.htm> → Richtlinie 6 Energieeinsparung und Wärmeschutz.

Englanti ja Wales: Building Regulations 2000. Approved Document L1A: Conservation of fuel and power (New dwellings), 2010 edition. HM Government 2010.

http://www.planningportal.gov.uk/uploads/br/BR_PDF_AD_L1A_2010_V2.pdf

Skotlanti: Technical Handbooks - Domestic Section 6 Energy, 6.2.1: Building Insulation Envelope, Maximum U-values. The Scottish Government, Built Environment 2011.

<http://www.scotland.gov.uk/Resource/Doc/217736/0097011.pdf>

USA: Residential Prescriptive Requirements. IECC (International Energy Conservatory Code) 2009. <http://energycode.pnl.gov/EnergyCodeReqs/>

Status of State Energy Code Adoption: <http://www.energycodes.gov/adoption/states>

Kanada: National Model Construction Codes.

http://www.nationalcodes.nrc.gc.ca/eng/national_codes_list.html

Japani: Design and Construction Guidelines on the Rationalization of Energy Use for Houses (DCGREUH) 1999. Via Evans, M., Shui, P., Takagi, G.: Country Report On Building Energy Codes in Japan. 2009. Pacific Northwest, National Laboratory/U.S. Department of Energy.

http://www.pnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-17849.pdf

Liite 5 Eri maiden U-arvoihin liittyvää lainsäädäntöä ja standardeja (2/2)

Venäjä: СНиП 23-02-2003. СТРОИТЕЛЬНЫЕ НОРМЫ И ПРАВИЛА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ТЕПЛОВАЯ ЗАЩИТА ЗДАНИЙ (Thermal Performance of the Buildings). 5 ТЕПЛОВАЯ ЗАЩИТА ЗДАНИЙ: Сопротивление теплопередаче элементов ограждающих конструкций. Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2004.

http://www.minregion.ru/upload/documents/2011/10/311011/311011_svod_pravila.pdf

Ruotsi, passiivitalot: Kravspecifikation för nollenergihus, passivhus och minienergihus, Bostäder. Forum för Energieffektiva Byggnader (FEBY) 2012.

[http://www.nollhus.se/dokument/Kravspecifikation%20FEBY12%20-](http://www.nollhus.se/dokument/Kravspecifikation%20FEBY12%20-%20bostader%20sept.pdf)

[%20bostader%20sept.pdf](http://www.nollhus.se/dokument/Kravspecifikation%20FEBY12%20-%20bostader%20sept.pdf)

Norja, passiivitalot: NS 3700:2010. Kriterier for passivhus og lavenergihus –

Boligbygninger. Standard Norge 2010. [http://www.standard.no/no/Sok-og-](http://www.standard.no/no/Sok-og-kjop/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductId=422901)

[kjop/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductId=422901](http://www.standard.no/no/Sok-og-kjop/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductId=422901)

**Talonrakennustekniikan tutkimusraportit v. 1998 – 2013**

- 161 Heinisuo, M. & Partanen, M., Modeling of Car Fires with Sprinklers. TTY 2013. 63 p + 11 app.
- 160 Lahdensivu, J., Suonketo, J., Vinha, J., Lindberg, R., Manelius, E., Kuhno, V., Saastamoinen, K., Salminen, K. & Lähdesmäki, K., Matalaenergia- ja passiivitalojen rakenteiden ja liitosten suunnittelu- ja toteutusohjeita. TTY 2012. 121 s. + 1 liites. 45 €
- 159 Vinha, J., Laukkarinen, A., Mäkitalo, M., Nurmi, S., Huttunen, P., Pakkanen, T., Kero, P., Manelius, E., Lahdensivu, J., Köliö, A., Lähdesmäki, K., Piironen, J., Kuhno, V., Pirinen, M., Aaltonen, A., Suonketo, J., Jokisalo, J., Teriö, O., Koskenvesa, A. & Palolahti, T., Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. TTY 2013. 354 s. + 43 liites. 90 €
- 158 Boström, S., Uotila, U., Linne, S., Hilliaho, K. & Lahdensivu, J., Erilaisten korjaustoimien vaikutuksia lähiökerrostalojen todelliseen energiankulutukseen. TTY 2012. 77 s. 34 €
- 157 Bzdawka, K. & Heinisuo, M., Optimization of Planar Tubular Truss with Eccentric Joint Modeling. TUT 2012. 29 p. + 1 app. 34 €
- 156 Ronni, H. & Heinisuo, M., Test Report, End Plate Joints of Steel Tubes, Biaxial Bending in Fire. TUT 2011. 34 p. + 5 app. 34 € (in Finnish).
- 155 Perttola, H. & Heinisuo, M., Test Report, End Plate Joints of Steel Tubes, Biaxial and Weak Axis Bending. TUT 2011. p. + 58 app. 17. 34 €
- 151 Salminen, M., Shear Buckling Resistance of Thin Metal Plate at Non-Uniform Elevated Temperatures. TUT 2010. 107 p. + 25 app. 34 €
- 150 Piironen, J. & Vinha, J., Vakiotehoisen kuivanapitolämmityksen vaikutus hirsimökkien lämpö- ja kosteusteknisessä toimintaan. TTY 2010. 79 s. + 16 liites. 34 €
- 149 Ronni, H. & Heinisuo, M., Test Report, End Plate Joints of Steel Tubes, Strong Axis Bending. TUT 2010. 33 p. + 19 app. 34 €
- 148 Lahdensivu, J., Varjonen, S., Köliö, A., Betonijulkisivujen korjausstrategiat. TTY 2010. 79 s. 34 €
- 147 Bzdawka, K., Composite column – calculation examples. TUT 2010. 54 p. 34 €
- 146 Bzdawka, K., Optimisation of a steel frame building. TUT 2009. 104 p. + 38 app. 34 €
- 145 Leivo, V., Ohje uimahallien ja kylpylöiden lattioiden liukkauden ehkäisemiseen. TTY 2009. 20 s.
- 144 Leivo, V., Uimahallien laattalattioiden liukkaus. TTY 2009. 51 s. + 7 liites.
- 143 Vinha, J., Viitanen, H., Lähdesmäki, K., Peuhkuri, R., Ojanen, T., Salminen, K., Paajanen, L., Strander, T. & Iitti, H., Rakennusmateriaalien ja rakenteiden homehtumisriskin laskennallinen arviointi. TTY 2013. Julkaisematon.
- 142 Rauhala, J. & Kylliäinen, M., Eristerapatun betoniseinän ilmaaänen eristävyys. TTY 2009. 119 s. + 83 liites. 42 €
- 141 Aho, H. & Korpi, M. (toim.), Vinha, J., Lindberg, R., Mattila, J., Lahdensivu, J., Hietala, J., Suonketo, J., Salminen, K. & Lähdesmäki, K., Ilmanpitävien rakenteiden ja liitosten toteutus asuinrakennuksissa. TTY 2009. 100 s. 42 €
- 140 Vinha, J., Korpi, M., Kalamees, T., Jokisalo, J., Eskola, L., Palonen, J., Kurnitski, J., Aho, H., Salminen, M., Salminen, K. & Keto, M., Asuinrakennusten ilmanpitävyys, sisäilmasto ja energiatalous. TTY 2009. 148 s. + 19 liites. 42 €



- 139 Leivo, V. & Rantala, J., Maanvastaisten rakenteiden mikrobiologinen toimivuus. TTY 2006. 57 s. + 55 liites. 34 €
- 138 Heinisuo, M. & Aalto, A., Stiffening of Steel Skeletons Using Diaphragms. TUT 2006. 31 p. 7 app. 34 €
- 137 Kylliäinen, M., Talonrakentamisen akustiikka. TTY 2006. 205 s. 42 €
- 136 Varjonen, S., Mattila, J., Lahdensivu, J., Pentti, M., Conservation and Maintenance of Concrete Facades Technical Possibilities and Restrictions. TUT 2006. 29 p.
- 135 Heinisuo, M. & Ylihärsilä, H., All metal structures at elevated temperatures. TUT 2006. 54 p. + 37 app. 34 €
- 134 Aho, H., Inha, T. & Pentti, M., Paloturvallinen rakentaminen EPS-eristeillä. TTY 2006. 106 s. + 38 liites. 42 €
- 133 Haukijärvi, M., Varjonen, S. & Pentti, M., Julkisivukorjausten turvallisuus. TTY 2006. 25 s. + 111 liites.
- 132 Heinisuo, M. & Kukkonen, J., Design of Cold-Formed Members Following New EN 1993-1-3. TUT 2005. 41 p. 34 €
- 131 Vinha, J., Korpi, M., Kalamees, T., Eskola, L., Palonen, J., Kurnitski, J., Valovirta, I., Mikkilä, A. & Jokisalo, J., Puurunkoisten pientalojen kosteus- ja lämpötilaolosuhteet, ilmanvaihto ja ilmatiiviys. TTY 2005. 102 s. + 10 liites. 42 €
- 130 Vinha, J., Käkelä, P., Kalamees, T., Valovirta, I., Puurunkoisten ulkoseinärakenteiden lämpö- ja kosteustekninen toiminta diffuusion kannalta tarkasteltuna. Julkaisematon.
- 129 Vinha, J., Valovirta, I., Korpi, M., Mikkilä, A. & Käkelä, P., Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona. TTY 2005. 101 s. + 211 liites. 42 €
- 128 Leivo, V., Rantala, J., Lattialämmitetyn alapohjarakenteen rakennusfysikaalinen toiminta. TTY 2005. 140 s. 34 €
- 127 Lahdensivu, J., Luonnonkiviverhottujen massiivitiiliseinien vaurioituminen ja korjausperiaatteet. TTY 2003. 156 s. + 9 liites. 34 €
- 126 Leivo, V., Hirsirakennuksen yläpohjan tiiviys – vaikutus lämpöenergiankulutukseen. TTY 2003. 63 s.
- 125 Kylliäinen, M., Uncertainty of impact sound insulation measurements in field. TUT 2003. 63 p. + 50 app. 34 €
- 124 Myllylä, P. ja Lod, T. (toim.), Pitkäikäinen puurakenteinen halli, toimiva kosteustekniikka ja edullinen elinkaari. TTY 2003. 143 s. + 6 liites. 34 €
- 123 Mattila, J., Pentti, M., Suojaustoimien tehokkuus suomalaisissa betonijulkisivuissa ja parvekkeissa. TTY 2004. 69 s. 42 €
- 122 Leivo, V., Rantala, J., Moisture Behavior of Slab-on-Ground Structures. TUT 2003. 100 p. + 12 app. 34 €
- 121 Leivo, V., Rantala, J., Maanvastaaiset alapohjarakenteet – kosteustekninen mitoittaminen ja korjaaminen. TTKK 2002. 33 s. + 11 liites.
- 120 Leivo, V., Rantala, J., Maanvastaisten alapohjarakenteiden kosteustekninen toimivuus. TTKK 2003. 106 s. + 13 liites. 34 €
- 119 Lindberg, R., Wahlman, J., Suonketo, J., Paukku, E., Kosteusvirtatutkimus. TTKK 2002. 92 s. + 3 liites. 34 €
- 118 Hietala, J., Kelluvan betonilattian kaareutuminen, osa II. TTY 2003. 58 s. + 12 liites. 30 €



- 117 Vinha, J., Käkelä, P., Kalamees, T., Comparison of the Moisture Behaviour of Timber-Framed Wall Structures in a One-Family House. Julkaisematon.
- 116 Vinha, J., Käkelä, P., Kalamees, T., Puurunkoisten seinärakenteiden kosteusteknisen toiminnan vertailu omakotitalossa. TTKK 2002. 54 s. + 11 liites. 34 €
- 115 Junttila, T., Venäjän rakennusalan säädöstö ja viranomaishallinto, osa I ja II TTKK 2001. 97 s. 34 €
- 114 Junttila, T. (toim.), Venäjän rakennusalan tuotekortit. TTKK 2001. 63 s. 34 €
- 113 Junttila, T., Lod, T., Aro, J., Rakennusinvestointihankkeen toteuttaminen Moskovassa. TTKK 2001. 112 s. + 11 liites. 34 €
- 112 Junttila, T. (toim.), Venäjän rakentamisen oppikirja. Osa B: Talonrakennustekniikka. TTKK 2001. 174 s. 34 €
- 111 Junttila, T. (toim.), Venäjän rakentamisen oppikirja. Osa A: Liiketoimintaympäristö ja rakennushankkeen johtaminen. TTKK 2001. 173 s. + 21 liites. 34 €
- 110 Юннтила, Т. (под ред.), Управление недвижимостью в России. Теория и практические примеры. Технический университет Тампере 2001. 356 стр. + приложения на 33 стр. 34 €
- 109 Junttila, T., (toim.), Kiinteistöjohtaminen Suomessa ja Venäjällä. Edellytykset kiinteistöalan yhteistyölle. TTKK 2001. 293 s. + 54 liites. 34 €
- 108 Hietala, J., Kelluvan betonilattian kaareutuminen. TTKK 2001. 80 s. + 7 liites. 34 €
- 107 Binamu, A., Lindberg, R., The Impact of Air Tightness of The Building Envelope on The Efficiency of Ventilation Systems with Heat Recovery. TTKK 2001. 62 p. + 7 app. 25 €
- 106 Leivo, V., Rantala, J., Maanvaraisten alapohjarakenteiden kosteuskäyttäytyminen. TTKK 2000. 124 s. 34 €
- 105 Junttila, T. (toim.), Venäjän federaation kaavoitus- ja rakennuslaki. TTKK 2000. 49 s. 34 €
- 104 Niemelä, T., Vinha, J., Lindberg, R., Carbon Dioxide Permeability of Cellulose-Insulated Wall Structures. TUT 2000. 46 p. + 9 app. 25 €
- 103 Vinha, J., Käkelä, P., Water Vapour Transmission in Wall Structures Due to Diffusion and Convection. TUT 1999. 110 s. 34 €
- 101 Pessi, A-M., Suonketo, J., Pentti, M., Raunio-Lehtimäki, A., Betonielementtijulkisivujen mikrobiologinen toimivuus. TTKK. 1999. 88 s. + 6 liites. 42 €
- 100 Pentti, M., Haukijärvi, M., Betonijulkisivujen saumausten suunnittelu ja laadunvarmistus. TTKK 2000. 2. täydennetty painos. 78 s. + 3 liites. 42 €
- 99 Torikka, K., Hyypöläinen, T., Mattila, J., Lindberg, R., Kosteusvauriokorjausten laadunvarmistus. TTKK 1999. 106 s. + 37 liites. 34 €
- 98 Mattila, J., Peuhkurinen, T., Lähiökerrostalon lisärakentamishankkeen tekninen esiselvitysmenettely. Korjaus- ja LVIS-tekninen osuus. TTKK 1999. 48 s.
- 97 Kylliäinen, M., Keronen, A., Lisärakentamisen rakennetekniset mahdollisuudet lähiöiden asuinkerrostaloissa. TTKK 1999. 59 s. + 37 liites. 34 €
- 96 Vinha, J., Käkelä, P., Vesihöyryn siirtyminen seinärakenteissa diffuusion ja konvektion vaikutuksesta. TTKK 2001. 3 painos. 81 s. + 29 liites. 34 €
- 95 Leivo, V. (toim.), Opas kosteusongelmiin – rakennustekninen, mikrobiologinen ja lääketieteellinen näkökulma. TTKK 1998. 157 s. 25 €
- 94 Pentti, M., Hyypöläinen, T., Ulkoseinärakenteiden kosteustekninen suunnittelu. TTKK 1999. 150 s. + 40 liites. 42 €
- 93 Lepo, K., Laatu järjestelmän kelpoisuus. TTKK 1998. 101 s. + 50 liites.
- 92 Berg, P., Malinen, P., Leivo, V., Internal Monitoring of The Technology Programme for Improving Product Development Efficiency in Manufacturing Industries – Rapid Programme. TUT 1998. 81 s. + 93 liites.



- 91 Berg, P., Salminen, K., Leivo, V., Nopeat tuotantojärjestelmät teknologiaohjelman painoalueet vuosille 1998-2000 sekä ohjelman arviointi- ja ohjaussuunnitelma. TTKK 1998. 55 s. + 37 liites.
- 90 Lindberg, R., Keränen, H., Teikari, M., Ulkoseinärakenteen vaikutus rakennuksen energiankulutukseen. TTKK 1998. 34 s. + 26 liites.
- 89 Pentti, M., Huttunen, I., Vepsäläinen, K., Olenius, K., Betonijulkisivujen ja parvekkeiden korjaus. Osa III Korjaushanke. TTKK 1998. 124 s. + 23 liites. 42 €

Tutkimusraportin hinta: 20 €, ellei toisin ole mainittu. Oikeus hinnanmuutoksiin pidätetään. Hintoihin lisätään alv 10 %.

**Myynti: Juvenes Teknillisen Yliopiston Kirjakauppa, TTY:n
Rakennustalo, Korkeakoulunkatu 5, 33720 Tampere, Puh. 0207 600 394
tty.kampuskauppa@juvenes.fi tai TTY-Säätiö, Terttu Mäkipää, terttu.makipaa@tut.fi**

Tampereen teknillinen yliopisto
PL 527
33101 Tampere

Tampere University of Technology
P.O.B. 527
FI-33101 Tampere, Finland