



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**ANSSI LAUKKARINEN  
TUULETTUVIEN YLÄPOHJIEN LÄMPÖ- JA KOSTEUS-  
TEKNINEN TOIMINTA NYKYISESSÄ JA TULEVAISUUDEN  
ILMASTOSSA**

Diplomityö

Tarkastaja: Professori Juha Vinha  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Tuotantotalouden ja rakentamisen  
tiedekuntaneuvoston kokouksessa  
9.10.2013



# TIIVISTELMÄ

**ANSSI LAUKKARINEN:** Tuulettuvien yläpohjien lämpö- ja kosteustekninen toiminta nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 82 sivua + 25 liitesivua

Lokakuu 2015

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: Professori Juha Vinha

Avainsanat: Tuulettuva yläpohja, lämpö- ja kosteustekninen toiminta, suomalainen home-malli

Tämän diplomityön laskentatarkastelut on tehty Tampereen teknillisen yliopiston rakennusfysiikan tutkimusryhmässä, osana kansallista FRAME-hanketta. Diplomityön pääasiallisena tarkoituksena on ollut arvioida laskennallisesti U-arvojen pienentämisen sekä ilmastonmuutoksen vaikutuksia tuulettuvien kattoristikko-yläpohjien lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan sekä tunnistaa niitä toimenpiteitä, joilla näiden rakenteiden toiminta saataisiin turvattua sekä nykyisissä että tulevaisuuden ilmasto-olosuhteissa Suomessa.

Tarkastelut on tehty käyttäen rakennusfysiikan tutkimusryhmässä jo aikaisemmin kehitettyä rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmää, joka käytännössä tarkoittaa erilaisten lähtötietojen ja tarkasteluperiaatteiden kokoelmaa. Analysointimenetelmän ideana on määrittää laskennallisesti rakenteiden kriittisten pisteiden lämpötila- ja kosteusolosuhteet rakennusfysikaalisesti mitoitettavissa sisä- ja ulkoilman olosuhteissa ja tämän jälkeen arvioida näitä olosuhteita erilaisten toimintakriteerien (vaurioitumismekanismien) ja näille asetettavien raja-arvojen avulla.

Tehtyjen tarkastelujen perusteella yläpohjan päälämmöneristekerroksen kasvattaminen laskee lämmöneristeen ulkopuolisten rakenneosien lämpötilaa ja tätä kautta kasvattaa homeriskiä näissä rakenteen osissa. Ennustettu ilmastonmuutos kasvattaa ulkoilman homehtumiselle alttiiden olosuhteiden määrää, mistä syystä ennustetut tulevaisuuden olosuhteet ovat rakenteille nykyilmastoa haastavammat.

Tuulettuvien kattoristikko-yläpohjien lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa on kuitenkin mahdollista parantaa monin eri tavoin. Tehdyissä tarkasteluissa tehokkaimmiksi menetelmiksi osoittautuivat homehtumisen suhteen kestävien materiaalien sekä lämpöä eristävän aluskatteen käyttäminen. Molemmilla tavoilla rakenteille laskettu homeindeksi saatiin kaikissa tarkastelluissa tilanteissa laskemaan alle asetetun

raja-arvon ( $M < 1$ , eli ei homeenkasvua).

Myös katolle osuvan auringonsäteilyn määrän, yläpohjarakenteen sisäpinnan vesihöyrynvastuksen, päälämmöneristekerroksen kosteuskapasiteetin kasvattaminen sekä päälämmöneristekerroksen merkittävä ohentaminen ja ilmastonmuutoksen hillitseminen parantavat tuulettuvien kattoristikkoylepohjien kosteusteknistä toimintaa.

Työn aikana on noussut esille useita toimenpiteitä, joilla laskentatarkastelujen tarkkuutta saataisiin edelleen parannettua. Näitä ovat muun muassa tarkempien rakennemallien käyttäminen, taivaan pitkäaaltoisen säteilyn tarkempi huomioon ottaminen, yläpohjan ilmatilan ilmanvaihtuvuuden tarkempi laskenta, erilaisten ilma- ja sadevuotojen vaikutusten arvioiminen, tarkempien materiaalmallien käyttäminen sekä rakenteissa mahdollisesti olevien home- tai mikrobivaurioiden synnyttämän sisäilmahaitan arviointi.

## ABSTRACT

**ANSSI LAUKKARINEN:** Hygrothermal behaviour of cold attics in the current and future climates

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 82 pages + 25 app. pages

October 2015

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Structural Design

Examiner: Professor Juha Vinha

Keywords: Cold attics, hygrothermal behaviour, the Finnish mould growth model

The simulation studies of this thesis have been done in the Building Physics research group in Tampere University of Technology (TUT), as a part of a national FRAME-project. The main goal of this work has been to numerically evaluate the effects from decreasing U-value and the predicted climate change on the hygrothermal behaviour of ventilated cold attics. An important goal has been also to identify those actions that would best improve the heat and moisture behaviour of the cold attics in the current and future climate in Finland.

The evaluations have been made using the moisture analysis method that has been previously developed in the Building Physics research group in TUT. The analysis method consists of the input data and methods to numerically evaluate the hygrothermal acceptability of a certain structure. The main idea of the method is to use numerical simulations to find out the temperature and relative humidity conditions inside different structures in critical indoor and outdoor conditions. The T/RH conditions are then evaluated with different performance criteria and their suitably set limit values.

Based on the studies made, increasing the insulation thickness of the attic floor decreases the temperature of the exterior parts of the attic and this way also increases the risk for mould growth. The predicted climate change increases the amount of outdoor air conditions susceptible for mould growth, which makes the predicted future conditions more demanding for the envelope structures.

It is however possible to improve the hygrothermal behaviour of the ventilated cold attics in multiple ways. In this study the most effective ways to decrease the risk for mould growth were to use more mould resistant materials or thermally insulating roof underlay in the structure. Both ways were able to decrease the maximum value of the calculated mould index under the set limit ( $M < 1$ , meaning no mould growth

is allowed).

Also increasing the amount of solar radiation on the roof, the water vapour resistance of the interior surface or the moisture capacity of the main insulation layer improved the hygrothermal behaviour of the analyzed structures. Also substantial decrease in the attic insulation layer thickness or the mitigation of climate change had similar effect.

Multiple actions have come up during the work that would allow the accuracy of the numerical studies to be improved. These include e.g. using more accurate models for geometry, long-wave atmospheric radiation, attic ventilation rate and material properties, taking different air and rain leakages into account and using different methods to evaluate the actual detrimental effects from mould and microbial damages to the indoor air quality.

## ALKUSANAT

Kirjan *The Feynman Lectures on Physics: The New Millennium Edition* alkusanoissa on esitetty seuraava lyhyt tarina: Arvostettu fyysikko Richard Feynman oli erään kurssin luennossaan esittänyt virheellisen lausekkeen, jota yksi opiskelijoista oli sittemmin käyttänyt toisen kurssin tentissä. Opiskelija ei ollut saanut tenttitehtävästä pisteitä, mistä hän sitten ilmoitti Feynmanille. Tämä vastasi hänelle kirjeitse:

Ohjaajasi oli oikeassa, kun ei antanut sinulle pisteitä kyseisestä tehtävästä. Tieteessä tulee uskoa logiikkaa ja huolellisesti määriteltyjä perusteluja, eikä auktoriteetteja. (...) En ole varma, mitä tapahtui, mutta mokasin, ja niin teit myös sinä, kun uskoit minua.

Tämä lyhyt tarina on minulle hauska muistutus siitä, että vaikka pyrkisimme tekemään asiat hyvin, niin siitä huolimatta me kaikki teemme virheitä aina silloin tällöin. Oman osaamisen kehittämällä ja yhteistyöllä pystymme kuitenkin ratkomaan vastaan tulevia tilanteita.

Haluan kiittää FRAME-hankkeen rahoittajia, jotka mahdollistivat hankkeen toteuttamisen ja siten myös oman työskentelyni siinä. Kiitokset kuuluvat myös rakennusfysiikan professorille Juha Vinhalle mahdollisuudesta työskennellä rakennusfysiikkaan liittyvien mielenkiintoisten aiheiden parissa. Paljon kiitoksia myös rakennustekniikan laitoksen työntekijöille, jotka ovat olleet merkittävällä tavalla luomassa mukavaa työilmapiiriä.

Suuret kiitokset kuuluvat myös vanhemmilleni ja ystävilleni, jotka ovat tukeneet ja kannustaneet minua opiskelussa, työssä ja vapaa-ajassa. Suurimmat kiitokset kuuluvat kuitenkin vaimolleni Reijalle, tuot jokaiseen päivääni iloa ja hyvää mieltä.

Tampereella, 28.9.2015

Anssi Laukkarinen





# SISÄLLYS

1. Johdanto . . . . .	1
1.1 Tutkimuksen tausta . . . . .	1
1.1.1 Taustalla vaikuttavat megatrendit . . . . .	1
1.1.2 Rakennusfysiikka tieteenalana . . . . .	3
1.1.3 FRAME-hanke (Future Envelope Assemblies and HVAC solutions) . . . . .	4
1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja sisältö . . . . .	6
1.3 Tutkimuksen rajaukset . . . . .	6
2. Teoreettinen tausta . . . . .	7
2.1 Yleistä . . . . .	7
2.1.1 Atomit ja aine . . . . .	7
2.1.2 Kontinuumimekaniikka . . . . .	9
2.1.3 Säilymislait . . . . .	10
2.1.4 Matemaattiset merkinnät . . . . .	10
2.2 Ilman, kosteuden ja lämmön siirtyminen . . . . .	12
2.2.1 Ilman siirtyminen . . . . .	12
2.2.2 Kosteuden siirtyminen . . . . .	13
2.2.3 Lämmön siirtyminen . . . . .	18
2.3 Ilman, kosteuden ja lämmön varastoituminen . . . . .	25
2.3.1 Ilman varastoituminen . . . . .	25
2.3.2 Kosteuden varastoituminen . . . . .	26
2.3.3 Lämmön varastoituminen . . . . .	29
2.4 Homemalli . . . . .	30
2.5 Yhteenvedo rakennusfysiikan laskentatarkastelujen perusolettamuksista . . . . .	33
2.6 Stokastinen ja deterministinen laskenta . . . . .	35
3. Yleiskuvaus tuulettuvien yläpohjien kosteusteknisestä toiminnasta . . . . .	39
3.1 Yleistä . . . . .	39
3.2 Yläpohjan kosteuslähteet . . . . .	40

3.3	Yläpohjan tuuletuksen toiminta . . . . .	40
3.4	Rakenteelliset toimenpiteet . . . . .	42
4.	Tutkimusmenetelmät . . . . .	45
4.1	Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden kenttämittaukset . . . . .	45
4.2	Mittaustulosten ja laskennan vertaileminen . . . . .	48
4.2.1	Yleistä mittaus- ja laskentatulosten vertailemisesta . . . . .	48
4.2.2	Kenttämittausten mallintaminen . . . . .	49
4.3	Rakenteiden kosteustekninen toiminta mitoittavissa olosuhteissa . . . . .	50
5.	Tulokset . . . . .	53
5.1	Kenttämittauskohteiden mittaus- ja mallinnustulokset . . . . .	53
5.2	Rakenteiden toimivuus mitoittavissa olosuhteissa . . . . .	57
6.	Virhearviointi . . . . .	67
6.1	Yleistä . . . . .	67
6.2	Materiaalikokeiden tarkkuus . . . . .	69
6.3	Rakenteiden simulointien tarkkuus . . . . .	71
7.	Päätelmät . . . . .	73
	Lähteet . . . . .	77

LIITE 1: Ulkoilman olosuhteet

LIITE 2: Delphin-ohjelmassa käytetyt materiaaliominaisuudet

## TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

Auringonsäteily	Yleistermi, jolla tarkoitetaan Auringosta lähtöisin olevaa sähkömagneettista säteilyä
Diffuusi säteily	Auringonsäteily, jonka intensiteetti on sama sekä vaaka- että pystypinnoille
Emissiviteetti	Pinnan kyky emittoida lämpösäteilyä
Globaali säteily	Vaakapinnalta mitattu suoran ja diffuusin säteilyn summa
Parannettu homemalli	VTT:n ja TTY:n yhdessä kehittämä parannettu malli eri materiaalien pinnoilla kasvavan homeen määrän laskemiseksi
Pitkäaaltoinen säteily	Sähkömagneettinen säteily, jonka lähde on huonelämpötila-alueella
Suora säteily	Suoraan Auringosta tuleva säteily, joka ei ole heijastunut esimerkiksi pilvistä tai ilmakehästä



## LYHENTEET JA MERKINNÄT

$n$	Ilmanvaihtuvuus, tässä termillä tarkoitetaan tarkasteltavan ilmatilan tuloilmavirran ja ilmatilavuuden suhdetta, 1/h
$s_d$	Suhteellinen diffuusiovastus, tarkoittaa sitä paikallaan olevan ilmakerroksen paksuutta, jolla on yhtä suuri vesihöyrynvastus kuin tarkasteltavalla materiaalikerroksella, m
$M$	Homeindeksi, kuvaa homemallin mukaan laskettua materiaalin pinnalla olevan homekasvuston määrää, -
$U$	Lämmönläpäisykerroin eli U-arvo, kuvaa vakio-olosuhteissa rakenteen läpi siirtyvän lämmön määrää pinta-ala-, lämpötilaero- ja aikayksikköä kohden, W/(m <sup>2</sup> K)
$\lambda$	Lämmönjohtavuus, kuvaa kuinka helposti lämpöä siirtyy materiaalin läpi, W/(mK)
$\mu$	Diffuusiovastuskerroin, määritetään paikallaan olevan ilman ja materiaalin vesihöyrynläpäisevyyden osamääränä, -
$\delta$	Vesihöyrynläpäisevyys, kuvaa kuinka helposti vesihöyry siirtyy materiaalin läpi, m <sup>2</sup> /s tai kg/(m <sup>2</sup> sPa)



# 1. JOHDANTO

Tämän luvun tarkoituksena on esitellä perusteet tutkimuksen taustalla vaikuttavista ajureista ja näihin liittyvistä näkökulmista. Taustojen kartoittaminen mahdollistaa pitkäjänteisen tavoitteenasettelun ja tulosten hahmottamisen osana laajempaa kokonaisuutta.

## 1.1 Tutkimuksen tausta

### 1.1.1 Taustalla vaikuttavat megatrendit

Megatrendit ovat maailmanlaajuisia ilmiöitä, jotka muokkaavat taloutta, yhteiskuntaa ja yksilöä. Megatrendien tunnistaminen ja käsittely on hyödyllistä, koska ne ohjaavat ja myös määrittävät toimintaa monella eri tavalla. Ne myös auttavat keskustelun käynnistämisessä eri asioista päätettäessä.

Yhteiskuntaan vaikuttavia megatrendejä voidaan nimetä ja jaotella eri tavoin, mutta useat jaottelut (EEA 2011, Frost et Sullivan 2012, Hajkowicz, Cook & Littleboy 2012, Sitra 2013, KPMG 2013, Credit Suisse 2014, pwc 2014, Glenn, Gordon & Florescu 2014) sisältävät seuraavat kohdat:

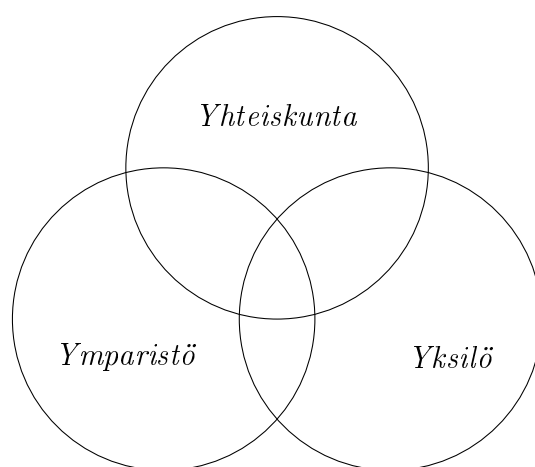
1. Väestörakenteen muutokset (väestönkasvu ja muuttoliikenne, kaupungistuminen, tietotyön lisääntyminen sekä eliniän odotteen pidentyminen),
2. globaali maailmantalous (kehittyvien markkinoiden nousu, julkisen sektorin velka ja globaalin talouden keskinäiset riippuvuudet),
3. kestävä kehitys (luonnonvarojen riittävyys, sopeutuminen uusiin olosuhteeseen, digitalisaatio ja teknologian kehitys).

Isoja trendejä ovat myös sosiaalinen media, terveys- ja hyvinvointiteknologia, teollinen internet sekä tietoturvallisuus näitä leikkaavana teemana. Edellä esitetyt kohdat sisältävät periaatteellisella tasolla myös jaottelun sosiaaliseen, toiminnalliseen ja taloudelliseen näkökulmaan.

Väestöllinen huoltosuhde määritellään alle 15- ja vähintään 65-vuotiaiden määränä 15–64-vuotiaiden lukumäärää kohti (prosentteina). Käynnissä oleva väestön ikään-tyminen on jo muuttanut kyseistä indikaattoria ja tulee vielä muuttamaan sitä seuraavien 15 vuoden aikana, jolloin huoltosuhteen on ennustettu kasvavan vuoden 2010 tasosta 52 arvoon 71 vuonna 2030.

Eri ryhmien lukumäärissä muutokset ovat noin 49 000 henkilön kasvu lasten ja nuorten (<15) lukumäärässä, 131 000 henkilön pienenemistä työikäisten aikuisten (> 15 ja < 65) lukumäärässä ja 555 000 henkilön kasvua vähintään 65-vuotiaiden lukumäärässä (Tilastokeskus 2012, Tilastokeskus 2015). Rakennettu ympäristö pystyy omalta osaltaan vaikuttamaan myös tämän muutoksen seurauksiin erilaisten teknisten, taloudellisten ja sosiaalisten mekanismien kautta.

Rakennusten energiatehokkuuden parantaminen ja energiankulutuksen pienentäminen ovat kytköksissä useaan edellä mainittuun ilmiöön. Ne toimivat ajureina monille muutoksille rakennusten suunnittelussa, rakentamisessa ja ylläpidossa. On hyvä tiedostaa, että rakennusten energiankulutusta on aina tarpeen arvioida yhtä aikaa useasta eri näkökulmasta, joista seuraavassa on esitetty jaottelu ympäristön-, yhteiskunnan- ja yksilön näkökulmaan (Kuva 1.1) <sup>1</sup>.



**Kuva 1.1** Rakennusten energiankulutusta voidaan tarkastella ympäristön, yhteiskunnan ja/tai yksilön näkökulmista.

Ympäristön näkökulmasta katsottuna kyse on ihmisten ekologisesta jalanjäljestä suhteessa luonnon uusiutumiskykyyn. Muutamilla valtioilla, kuten Suomella ja muilla Pohjoismailla, Uruguaylla, Argentiinalla, Kanadalla, Australialla ja Uusi-Seelannilla on suuri ekologinen jalanjälki, mutta samalla myös poikkeuksellisen korkea biokapasiteetti (Niccolucci, Tiezzi, Pulselli & Capineri 2012). Kuitenkin keskimäärin vuonna

<sup>1</sup>Näkökulmien jaottelu on sovellettu Kimmo Lylykankaan esitysmateriaalien pohjalta.



2008 ihmisten yhteenlaskettu ekologinen jalanjälki ylitti olemassa olevan biokapasiteetin 1,5-kertaisesti (WWF 2012), eli ihmiset kuluttavat uusiutuvia luonnonvaroja nopeammin kuin mitä ne uusiutuvat.

Yhteiskunnan näkökulmasta energiankulutus vaikuttaa esimerkiksi valtiontalouden vaihtotaseeseen ja poliittisiin neuvotteluihin tuontimaiden kanssa. Esimerkiksi Suomi on tällä hetkellä kiinteiden fossiilisten polttoaineiden, raakaöljyn, maakaasun, ydinpolttoaineen ja sähkön nettotuojana (eurostat 2012, eurostat 2014, Tilastokeskus 2014). Toisaalta Suomella on omavaraisuutta uusiutuviissa polttoaineissa sekä Suomi on jalostettujen polttoaineiden nettoviejä.

Yksittäisen henkilön kannalta energiankulutuksen vähentäminen pienentää energialaskua rakennuksen käytön aikana. Uutta rakennusta suunniteltaessa ja rakennettaessa on tärkeää arvioida rakennuksen käytölle asetettavia tavoitteita suhteessa eri tavoitteisiin, kuten investointi- ja elinkaarikustannuksiin sekä rakennuksen tekniseen ja toiminnalliseen laatuun.

Rakennusten energiankulutuksen pienentämiselle voidaan edellä esitettyjen kohtien pohjalta esittää useita hyviä perusteluja. Jotta energiankulutuksen pienentäminen ja energiatehokkuuden parantaminen voidaan tehdä mielekkäästi, tulee myös muiden asioiden toteuttamisesta varmistua samanaikaisesti. Rakennusfysiikan kannalta keskeisiä asioita ovat rakenteiden kosteustekninen toiminta ja laadukkaat sisäilman olosuhteet, jotka asettavat rakennusten suunnittelulle, rakentamiselle ja käytölle teknisiä ja taloudellisia reunaehtoja.

### 1.1.2 Rakennusfysiikka tieteenalana

Historiallisesti perimmäinen syy rakennusten tekemiselle on ollut suojan saaminen ulkoilman olosuhteilta, eli toisin sanoen suojaisan ja terveellisen sisäympäristön muodostaminen. Vaatimusten määrä ja niiden taso ovat aikojen saatossa kasvaneet ja nykyaikaisille rakennuksille asetetaan useita terveellisyyteen ja turvallisuuteen liittyviä vaatimuksia. Rakennusten tulee esimerkiksi kestää riittävän suuret mekaaniset kuormat, olla palo- ja pelastustilanteissa turvallisia, muodostaa lämpötila-, valaistus- ja ääniolosuhteiltaan miellyttävä sisäympäristö sekä omata alhainen energiankulutus ja laadukas sisäilma. Rakennusten tulee myös olla toiminnallisesti laadukkaita, mahdollistaa käyttötarpeiden ja -tapojen muutokset tulevaisuudessa, olla helposti ylläpidettäviä sekä esteettisesti miellyttäviä. Rakennukset tehdään lähtökohtaisesti käyttäjiä ja heidän tarpeitaan varten. Parhaassa tilanteessa eri tavoitteet saavutetaan kustannuksiltaan edullisesti, pienin ympäristövaikutuksin ja eri osapuolten kannalta yksinkertaisesti.

Rakennusfysiikka tutkii erityisesti lämmön, kosteuden ja ilman liikkeitä ja niiden vaikutuksia rakennuksissa ja niiden rakenteissa. Kuten edellisen kappaleen luettelosta voidaan päätellä, on moni rakennusfysiikan käytännön sovellus vahvasti liitoksissa myös muihin suunnittelu- ja tutkimusalueisiin. Esimerkiksi rakenteiden kosteustekninen toiminta on kytköksissä sisäilman laatuun, rakenteiden kantavuuteen, palotekniseen toimintaan, akustiikkaan ja kustannustehokkuuteen. Rakennusten energiankulutus taas sisältää paljon yhteistä esimerkiksi LVI-tekniikan kanssa. Tyypillinen rakennusfysiikan muista aloista erottava erityispiirre on kosteuden käyttäytymisen tarkasteleminen rakennuksen vaipparakenteissa. Yleisesti ottaen rakenteiden kosteusteknisen toiminnan tunteminen ja hallinta ovat edellytyksiä terveellisille, turvallisille ja kustannustehokkaille rakennuksille.

Rakennusfysiikan päätutkimusmenetelmät voidaan jakaa kenttä- ja laboratoriomitauksiin sekä laskennallisiin tarkasteluihin. Jokaisessa menetelmässä on omat vahvuutensa ja heikkoutensa. Esimerkiksi kenttämittauksin saadaan tietoa todellisista olosuhteista, mutta tulosten syy-seuraussuhteiden tunnistaminen voi olla hankalaa, minkä lisäksi tapauskohtaiset erityispiirteet vaikuttavat tuloksiin. Laboratoriokokeissa pystytään testaamaan todellisia rakenteita hallituissa olosuhteissa, mutta yksinkertaistettujen olosuhteiden edustavuudesta ei välttämättä voida varmistua vaihteleviin kenttäolosuhteisiin verrattuna. Laskennallisissa tarkasteluissa taas voidaan edullisesti ottaa mukaan useita monimutkaisiakin ilmiöitä, mutta ongelmana ovat usein lähtötietojen puutteet sekä edelleen epävarmuus tulosten tulkinnasta. Rakennusfysiikan tutkimus käyttää kaikkia päätutkimusmenetelmiä muun muassa uusien hyvien ratkaisujen löytämiseksi ja suunnittelumenetelmien tarkentamiseksi. Rakennusfysikaalinen suunnittelu pyrkii varmistamaan asetettujen tavoitteiden saavuttamisen tehokkaasti ja turvallisesti.

### **1.1.3 FRAME-hanke (Future Envelope Assemblies and HVAC solutions)**

Edellä kuvattuihin asioihin vaikuttamiseksi Euroopan unioni (EU) on laatinut EU-lainsäädäntöä, jossa asetetaan vaatimuksia jäsenvaltioille. Näihin kuuluu muun muassa rakennusten energiatehokkuusdirektiivi (European Parliament and the Council of the European Union 2010, EPBD-direktiivi), jossa jäsenvaltioita edellytetään määrittelemään lähes nollaenergiarakennusten (nZEB) vaatimukset ja niiden toteuttamiseen siirtymisen aikataulu. Tämän lisäksi rakennuksiin liittyvä lainsäädäntö koskee muun muassa uusiutuvan energian käyttämistä, valaistuksen ja talotekniikan energiankulutusta sekä rakennusten energiatehokkuuteen perustuvaa luokittelua. Eri vaatimusten toteuttamiselle on annettu omat aikataulunsa.

Ennen vuonna 2010 annettuja suomalaisia uusia energiamääräyksiä Ympäristöministeriö tilasi sekä Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) Rakennustekniikan laitokselta että tämän jälkeen teknologian tutkimuskeskukselta VTT:ltä selvitykset rakenteiden energiatehokkuuden parantamisen ja ilmastonmuutoksen vaikutuksista rakenteiden kosteustekniseen toimintaan (Vinha, Lindberg, Pentti, Mattila, Lahdensivu, Heljo, Suonketo, Leivo, Aho, Lähdesmäki & Aaltonen 2008, VTT 2008). Loppupäätelmät näissä kahdessa lausunnossa olivat erilaiset.

TTY:n lausunnossa kiinnitetään huomiota useassa tilanteessa tapahtuvaan rakenteiden kosteusteknisen toiminnan heikkenemiseen, rakennetyyppien ja tuotantotekniikoiden muuttumiseen, rakenteiden sisäiseen konvektioon sekä rakennusten routasuojauksen ja jäähdystystarpeen kasvamiseen. VTT:n lausunnossa nimetään massiivirakenteiden sisäpuolinen lämmöneristys, hyvin sisäpuolelta eristetyt ja höyrynsuluttomat hirsiseinät sekä eristerapatut rakenteet riskejä sisältäviksi ratkaisuksi, mutta yleisesti ottaen rakenteiden kosteusteknisen toiminnan ei katsota rajoittavan lämmöneristystason parantamista noin 30. . . 40 %:lla vuoden 2007 määräystasoon (RakMK C3 2007) verrattuna (VTT 2008, s. 1).

Näiden lausuntojen jälkeen käynnistettiin TTY:n rakennusfysiikan tutkimusryhmän vetämä FRAME-tutkimushanke, jossa edellä esitettyjä seikkoja tutkittiin tarkemmin. Vuosina 2009–2012 toteutetun tutkimushankkeen tavoitteena oli saada aikaisempaa tarkempaa tietoa lämmöneristyspaksuuksien kasvattamisen sekä ilmastonmuutoksen vaikutuksista rakenteiden kosteustekniseen toimintaan, rakennusten sisäilman olosuhteisiin ja energiankulutukseen Suomen ilmastossa. Hankkeen tutkimusosapuolia olivat TTY:n rakennustekniikan laitoksen (rakennetekniikan sekä rakennustuotannon ja -talouden yksiköiden) lisäksi Aalto-yliopiston Energiatekniikan laitos (LVI-teknikka) ja Mittaviiva Oy. Hankkeen rahoittajina olivat TEKES, Ympäristöministeriö, Rakennusteollisuus RT ry:n toimialaliitot sekä yksittäisinä yrityksinä Finnfoam Oy, Suomen Kuitulevy Oy ja Fibratus Oy.

Hankkeessa toteutettujen tutkimusten pohjalta laadittiin kaksi loppuraporttia, joista toinen sisälsi tutkimusosion kuvauksen ja toisessa annettiin ohjeita matalaenergia- ja passiivirakenteiden ja -liitosten kosteusteknisesti turvalliseen toteuttamiseen (Vinha, Laukkarinen, Mäkitalo, Nurmi, Huttunen, Pakkanen, Kero, Manelius, Lahdensivu, Köliö, Lähdesmäki, Piironen, Kuhno, Pirinen, Aaltonen, Suonketo, Jokisalo, Teriö, Koskenvesa & Palolahti 2013, Lahdensivu, Suonketo, Vinha, Lindberg, Manelius, Kuhno, Saastamoinen, Salminen & Lähdesmäki 2012).

Tässä diplomityössä tehdyt tuulettuvien yläpohjien tarkastelut on tehty osana FRAME-tutkimushanketta. Simulointitarkastelujen tulokset on raportoitu aikaisemmin tut-

kimushankkeen loppuraportissa (Vinha et al. 2013), joita on tässä diplomityössä täydennetty johdannolla, teoriaosiolla ja kirjallisuuskatsauksella.

## 1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja sisältö

Tarkastelujen tavoitteena on ollut selvittää lämmöneristyksen lisäyksen ja ilmastonmuutoksen vaikutus tuulettuvien kattoristikoyläpohjien lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan. Näiden lisäksi on selvitetty myös muiden rakenteellisten muutosten vaikutuksia yläpohjan olosuhteisiin.

Laskentatarkastelut perustuvat TTY:n rakennusfysiikan tutkimusryhmässä kehitettyyn rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmään (Vinha 2007), jota on täydennetty ja tarkennettu FRAME-hankkeen yhteydessä (Vinha et al. 2013, Vinha 2014). Analysointimenetelmän ideana on tarkastella rakenteiden rakennusfysikaalista toimintaa mitoittavissa ulko- ja sisäilman olosuhteissa, minkä jälkeen rakenteiden toimintaa arvioidaan erilaisten toimintakriteerien ja niille valittujen raja-arvojen perusteella.

Tutkimuskysymysten ja -menetelmien valinta ovat seuranneet FRAME-hankkeen toteutussuunnitelmasta. Tämän diplomityön ulkopuolella on toteutettu myös tuulettuvien yläpohjien lämpötilan ja suhteellisen kosteuden kenttämittauksia, jotka joiden raportointi kansainvälisissä tieteellisissä julkaisuissa ja konferensseissa on kesken (Laukkarinen, Lähdesmäki & Vinha 2015).

## 1.3 Tutkimuksen rajaukset

Tässä diplomityössä ei tarkastella esimerkiksi rakennusten arkkitehtuuriin tai rakenteiden kantavuuteen, palotilanteen käyttäytymiseen, akustiikkaan tai materiaalivalintojen ekologisuuteen liittyviä asioita. Myöskään eri ratkaisujen taloudellisuutta tai niiden vaikutuksia sisäilman olosuhteisiin ei tarkastella.

## 2. TEOREETTINEN TAUSTA

### 2.1 Yleistä

#### 2.1.1 Atomit ja aine

Kaikki aine muodostuu pienistä hiukkasista (atomeista), joissa sähkövaraukseltaan positiivista ydintä ympäröi negatiivisesti varautuneiden elektronien pilvi. Vaikka kummallakaan ei ole tarkalleen määriteltyjä rajoja, on molempien koolle kuitenkin määritetty likimääräisiä arvoja. Atomiytimien säde on suuruusluokkaa  $1,6 \dots 6$  fm (Angeli & Marinova 2013), kun taas atomien säde on suuruusluokkaa  $0,04 \dots 0,4$  nm (Ghosh, Biswas, Chakraborty, Islam & Rajak 2008).

Sähkömagneettisen vuorovaikutuksen vuoksi positiiviset ja negatiiviset varaukset vetävät toisiaan puoleensa, mutta tästä huolimatta elektronit eivät kuitenkaan vajoa atomien ytimeen. Tämä voidaan selittää esimerkiksi Heisenbergin epätarkkuusperiaatteen avulla: Jos elektronit vajoaisivat ytimeen, niiden sijainti tiedettäisiin, mikä ei kuitenkaan ole epätarkkuusperiaatteen mukaan mahdollista. Toisaalta erimerkkiset varaukset pitävät partikkeleita yhdessä, jolloin elektronien lopullinen sijainti ytimen ympärillä joudutaan lopulta kuvaamaan tilastollisten menetelmien avulla. Atomiytimessä vaikuttava vahva vuorovaikutus pitää positiivisesti varautuneet hiukkaset yhdessä, mutta sen vaikutus kuitenkin laskee nopeasti etäisyyden kasvaessa atomiytimen suuruusluokkaa suuremmaksi.

Aineiden kemiallinen käyttäytyminen riippuu merkittävästi atomien uloimmilla elektronikuorilla (energiatasoilla) olevista elektroneista eli valenssielektroneista. Elektronikuorille mahtuvien elektronien maksimimäärä on  $2n^2$ , missä  $n$  on elektronikuoren järjestysnumero ytimestä päin lukien ( $n = 1, 2, \dots$ ). Elektronikuorien lukumäärä ja energiatasot voidaan johtaa Schrödingerin aaltoyhtälön ratkaisusta (Young & Freedman 2000).

Atomit pyrkivät saamaan elektronikuorensa täyteen ytimen läheisyydestä lukien. Tämä on mahdollista esimerkiksi muodostamalla molekyylejä, joissa osa atomin ulommaisista elektroneista on jaettu muiden atomien kanssa. Esimerkki tällaisesta

kovalenttisesta (huom. ko-valenssi) sidoksesta esiintyy vedessä ( $\text{H}_2\text{O}$ ), missä kaksi vetyatomia ja yksi happiatomi muodostavat yhdessä hieman v-kirjaimen muotoisen rakenteen.

Vesimolekyyli on kokonaisvaraukseltaan neutraali, mutta vety-happi-rakenteen muodosta johtuen sen osat ovat hieman eri tavoin varautuneita. Happiatomin puoli on molekyylissä negatiivisesti varautunut ja vetyatomien puoli positiivisesti varautunut (Young & Freedman 2000, s. 691). Nämä eri merkkiset varaukset vetävät vierekkäisten vesimolekyylien vastakkaisesti varautuneita osia puoleensa. Koska liitoksessa vety liittyy elektronegatiivisempaan (suuremman negatiivisen varauksen omaavaan) happeen, nimitetään liitosta vetysidokseksi, joka on yhdentyypinen Van der Waals -sidos. Vesimolekyylissä happiatomin ja vetyatomien välinen etäisyys on noin 0,1 nm ja vierekkäisten vesimolekyylien happiatomien välinen etäisyys on noin 0,3 nm (Huang, Zhang, Ma, Li, Zhou, Zhou, Zheng & Sun 2013).

Veden korkea kiehumispiste ( $100^\circ\text{C}$ ) on seurausta vesimolekyylien välisistä vetysidoksista. Ne ovat kuitenkin heikompia kuin vesimolekyylin sisällä vaikuttavat kovalenttiset sidokset, eli tällöin esimerkiksi vettä keitetessä vesimolekyylit irtoavat toisistaan ennen kuin vesimolekyylien sisäiset koossa pitävät voimat ylittyvät.

Saman aineen neste- ja kaasufaasien rajapinnassa atomit siirtyvät jatkuvasti molempiin suuntiin. Tasapainotilanteessa kaasumuodossa olevia atomeja siirtyy nesteeseen yhtä paljon kuin nesteestä irtoaa kaasuksi. Nesteestä irtoavat atomit sisältävät keskimääräistä enemmän liike-energiaa, eli jäljelle jäävillä on keskimääräistä vähemmän energiaa ja näin ollen haihtuminen laskee nesteen lämpötilaa. Toisaalta taas kaasufaasissa olevilla atomeilla on nestefaasissa olevia atomeita enemmän liike-energiaa, jolloin kaasun tiivistyminen nesteeksi luovuttaa lämpöä. Tasapainotilanteessa atomien nettoliike on nolla, jolloin myöskään rajapinnan lämpötila ei muutu. (Feynman, Leighton, Sands, Gottlieb & Pfeiffer 1963, 2006 ja 2013, Vol. I)

Ympäröivien olosuhteiden ja sitä kautta myös atomien liike-energian muuttuessa aineen rakenne voi muuttua ja aine vaihtaa faasia. Esimerkiksi vettä lämmitettäessä partikkelien liike-energia kasvaa ja vesipinnasta irtoavien vesimolekyylien määrä lisääntyy suhteessa ilmasta vesipintaan tarttuviin molekyyliin. Toisaalta jos vesi tai jääpinnan vieressä oleva ilma ei ole kyllästystilassa, haihtuu siihen vettä hiljalleen lämpötilasta riippumatta.

Lämpötilan laskiessa vesi voi jäätymä, jolloin vesimolekyylien väliset vetysidokset järjestyvät tarkemmin määräytyvään muotoon. Atomien järjestyksen muuttaminen edellyttää jäätymisen alussa ylimääräistä energiaa uuden faasin pinnan muodostamiseksi. Ensimmäisten jäätymisydinten muodostumisen (engl. nucleation) jälkeen

prosessi voi jatkua itseksensä (engl. clustering), kunhan ympäröivät olosuhteet ovat edelleen prosessille suotuisat. Vesimolekyylien liikkeen hidastuminen vapauttaa molekyylien liike-energiaa, joka hidastaa veden jäätymistä. Vesihöyryn kondensoitumista voidaan kuvata vastaavanlaisella prosessilla, jossa vesipisarat kasvavat muodostuneiden tiivistymisydinten ympärille. Yleisesti ottaen tiivistymis-/jäätymisytimien muodostumiselle ja vastaavien prosessien etenemiselle on olemassa useita eri mahdollisuuksia eri tilanteisiin liittyen.

## 2.1.2 Kontinuumimekaniikka

Edellä esitetyt atomitason tarkastelut muodostavat pohjan kaikkien rakennusfysiikan ilmiöiden selittämiseksi. Partikkelien lukumäärän ja niiden erilaisten ominaisuuksien, todennäköisyyteen perustuvien laskentamallien ja lähtötietojen keräämisen haasteellisuuden vuoksi rakennusfysiikan laskentatarkasteluissa ainetta tarkastellaan kuitenkin makroskooppisella tasolla.

Kontinuumioletuksessa aine ja sen ominaisuudet käsitetään jatkuviksi suureiksi. Kuten edellä on tullut esille, voidaan materiaalin nähdä muodostuvan yksittäisistä kappaleista, jotka ovat vuorovaikutuksessa keskenään. Tällöin tarkasteltaessa atomien kokoluokassa olevaa tilavuutta, vaihtelee tarkastelutilavuudessa olevien partikkelien lukumäärä ja näin ollen myös esimerkiksi materiaalin tiheys. Tarkastelutilavuuden kasvaessa tiheyden vaihtelut kuitenkin tasaantuvat, sillä atomeja jää tarkastelualkioon keskimäärin jatkuvasti yhtä monta, eivät pienet vaihtelut enää juurikaan vaikuta tarkastelukappaleen massaan. Näin ollen tarkasteluresoluutiota kasvattamalla päästään tilanteeseen, jossa voidaan käyttää keskimääräisiä arvoja ja likimääräisyyksiä, vaikka niiden todellinen fysikaalinen tausta olisikin jokin toinen. Kontinuumioletus on hyvin yleinen insinööritieteissä.

Atomien mittakaavan lisäksi kontinuumioletusta käytetään myös materiaalien huokoskokoluokan ilmiöiden matemaattinen kuvaamiseen. Useat rakennusmateriaalit sisältävät ainakin yhtä tai useampaa runkoainetta, ilmaa ja vettä. Esimerkiksi betoni muodostuu liimana toimivasta sementistä, tietyn kokojakauman omaavasta runkoaineesta sekä huokoset täyttävästä ilmasta ja vedestä. Kosteuden oletetaan liikkuvan huokosissa, kun taas runkoaines oletetaan umpinaiseksi. Käytännössä huokosverkoston rakennetta ei kuitenkaan tunneta ja kuten edellä esitetystä voidaan päätellä, sen muotojen kuvaaminen riippuu myös tarkastelun mittakaavasta. Näin ollen erilaiset materiaaliominaisuudet sekä laskennan tila- ja virtaussuureet keskiarvoistetaan ja jaetaan koko tarkasteltavalla tilavuudelle. Kontinuumioletus mahdollistaa materiaaleissa tapahtuvien lämmön- ja kosteudensiirron ilmiöiden kuvaamisen jatkuvien osittaisdifferentiaaliyhtälöiden avulla.

### 2.1.3 Säilymlait

Aineen, energian ja liikemäärän säilymlait muodostavat kontinuumioletuksen lisäksi toisen tärkeän perustan rakennusfysiikan laskentatarkastelujen tekemiselle. Niiden avulla yksittäisiä ilmiöitä kuvaavat kaavat saadaan koottua yhteen yhtälöryhmiksi, jolle voidaan lähteä hakemaan ratkaisua.

Seuraavat kolme säilymlakia muodostavat perustan rakennusfysiikan laskentatarkastelujen tekemiselle:

- Ainetta ei synny tyhjästä, eikä sitä häviä tyhjyyteen
- Energia voi muuttua muotoaan, mutta sitä ei synny tyhjästä eikä sitä häviä tyhjyyteen
- Liikemäärän summa säilyy suljetussa systeemissä vakiona.

Liikemäärän säilyminen käsittää sekä liikemäärän (engl. linear momentum) että pyörimisliikemäärän (engl. angular momentum) säilymisen, joista jälkimmäistä ei kuitenkaan juurikaan tarvita rakennusfysiikkaan liittyviä hallitsevia yhtälöitä muodostettaessa.

Suhteellisuusteorian esittämän aineen ja energian yhteyden myötä energian säilymlain voidaan katsoa kattavan myös aineen säilyminen, mutta edellä esitetty jako soveltuu rakennusfysiikan tarkasteluihin paremmin. Yleisesti ottaen nykyinen hiukkasfysiikka tuntee myös muita säilymlakeja sekä ehdokkaita niiksi.

### 2.1.4 Matemaattiset merkinnät

Kolmiulotteisessa karteesisessä koordinaatistossa nabla-symbolia ( $\nabla$ ) käytetään kuvaamaan seuraavaa matemaattista merkintää (del-operaattoria, kaava 2.1).

$$\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \vec{e}_x + \frac{\partial}{\partial y} \vec{e}_y + \frac{\partial}{\partial z} \vec{e}_z \quad (2.1)$$

missä

$\nabla$	on del-operaattoria kuvaava nabla-symboli
$\frac{\partial}{\partial x}$	osittaisderivaattaoperaattori x-akselin suhteen (ja vastaavasti muiden akselien suhteen) ja
$\vec{e}_x$	on karteesisen koordinaatiston yksikkökantavektori x-akselin (ja vastaavasti muiden akselien) suhteen.



Edellä olevan matemaattisen merkintätavan avulla voidaan määritellä skalaarikentän gradientti (kaava 2.2).

$$\nabla f = \frac{\partial f}{\partial x} \vec{e}_x + \frac{\partial f}{\partial y} \vec{e}_y + \frac{\partial f}{\partial z} \vec{e}_z \quad (2.2)$$

missä

$f$  on jokin tarkasteltava skalaarikenttä (esim. lämpötila tai paine).

Skalaarikentän gradientti on vektorikenttä, jonka jokainen piste kuvaa skalaarikentän vastaavan pisteen suurimman kasvun suuntaa ja kasvun suuruutta. Esimerkiksi jos lämpötilakenttä voitaisiin jossain tilanteessa kuvata lausekkeella  $T(x) = T_0 - 2x$ , niin tällöin kyseisen lämpötilakentän gradientti olisi  $\nabla T = \vec{e}_x \frac{\partial}{\partial x} T(x) = -2\vec{e}_x$ , eli gradientti osoittaa kasvavan lämpötilan suuntaan. Esimerkiksi kuvattaessa lämmön johtumista Fourier'n lailla tai vesihöyryn diffuusiota Fick'n lailla, käytetään skalaarikentän gradienttia lämpö-/diffuusiovirran laskemisessa.

Vektorikentän divergenssi on skalaarisuure ja tarkoittaa rakennusfysiikan näkökulmasta tiettyyn tarkastelupisteeseen tulevien ja siitä lähtevien virtauksien erotusta. Jos tarkasteltava vektorikenttä kirjoitetaan muodossa  $\vec{q} = q_x \vec{e}_x + q_y \vec{e}_y + q_z \vec{e}_z$ , niin kyseisen vektorikentän divergenssi voidaan kirjoittaa kaavan 2.3 mukaisesti.

$$\operatorname{div}(\vec{q}) = \nabla \cdot \vec{q} = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \quad (2.3)$$

missä

$\nabla \cdot$  on divergenssi-operaattori ja  
 $q_x$  tarkoittaa vektorikentän  $\vec{q}$  x-akselin suuntaista komponenttia (ja vastaavasti muiden akselien suhteen).

Divergenssin integraali tarkastelun alueen yli vastaa tarkastelun alueen reunojen yli tapahtuvien virtausten integraalia (Gaussin divergenssiteoreema). Toisin sanoen tämä tarkoittaa sitä, että tarkastelun alueen reunojen yli siirtyvä nettomääräinen energiavirta vastaa energian määrän muutosnopeutta tarkastelun alueessa.

Vektorikentän divergenssin arvo on positiivinen tarkastelupisteestä pois menevälle virtaukselle. Esimerkiksi jos lämpötila jossain rakenteessa tietyllä ajanhetkellä noudattaisi lauseketta  $T(x) = T_0 - 2x - 3x^2$  ja lämpövirran lauseke olisi vastaavasti  $\vec{q}(x) = -\lambda \nabla T(x) = -\lambda(-2 - 6x)\vec{e}_x$ , niin tällöin divergenssi olisi  $-\lambda \frac{\partial}{\partial x}(-2 - 6x) = 6\lambda$ . Koska lämmönjohtavuus saa positiivisia arvoja, niin näin ollen kaikista rakenteen pisteistä virtaa enemmän lämpöä pois kuin mitä tulee tilalle ja lämpötila rakenteessa laskee. Jos lämpötilaa kuvaavassa polynomilausekkeessa olisi myös korkeamman asteen termejä, niin tällöin divergenssin arvo muuttuisi rakenteen eri pisteissä.

## 2.2 Ilman, kosteuden ja lämmön siirtyminen

Tässä luvussa esitetään tässä työssä käytössä olleet lämmön ja aineen siirtymistä kuvaavat kaavat. Niiden sekä Gaussin divergenssilauseen avulla saadaan luvussa 2.1.3 esitetyt massan, energian ja liikemäärän lait kirjoitettua matemaattiseen muotoon.

Luvut ovat vahvasti sidoksissa toisiinsa, sillä esimerkiksi aineen siirtyminen tarkoittaa aina myös energian siirtymistä. Näin ollen selkeämmän esitystavan saavuttamiseksi ilman ja kosteuden siirtyminen käsitellään seuraavassa ennen lämmön siirtymisen käsittelyä.

### 2.2.1 Ilman siirtyminen

Konvektiolla tarkoitetaan yleisesti ottaen aineen siirtymistä paikasta toiseen, mutta eri yhteyksissä sillä saatetaan viitata myös virtaavan aineen kuljettamaan lämpöön tai aineeseen tai näiden vaikutuksiin. Rakennusfysiikassa useilla aineen siirtymismuodoilla on omat nimityksensä, mistä syystä tässä diplomityössä konvektiolla tarkoitetaan vain ilman liikkeitä rakennusmateriaaleissa, rakenteiden raoissa ja tuuletusväleissä sekä sisä- ja ulkoilmassa.

Ilman virtaus jaetaan laminaariseen, turbulenttiin sekä näiden välimuotoon (engl. mixed). Laminaarinen virtaus voidaan käsittää luonteeltaan lineaariseksi, missä virtauskentän virtausviivat eivät leikkaa toisiaan. Sen sijaan turbulenttinen virtaus on voimakkaasti epälineaarista ja vaikeasti mallinnettavaa. Tapauksesta riippuen virtaus voidaan tarkastella joko yksiaineisen materiaalin liikkeenä tai usean komponentin yhdistelmänä (monifaasivirtaus tai virtaus huokoisessa aineessa). Tässä diplomityössä ilman liikkeet yläpohjassa on käsitelty yksinkertaistettuna ilmanvaihtuvuutena, joka määritellään kaavan 2.4 mukaisesti.

$$n = \frac{R}{V} \quad (2.4)$$

missä

$n$	on tarkasteltavan ilmatilan ilmanvaihtuvuus, 1/h
$R$	on ilmatilassa olevan ainoan ilmavirtauksen tilavuusvirta, $\text{m}^3/\text{h}$
$V$	on ilmatilan ilmatilavuus, $\text{m}^3$ .

Perustapauksessa kaava 2.4 kuvaa ilmavirtauksia kahden tilan välillä. Ilmanvaihtuvuus voidaan määritellä esimerkiksi tuulettuvan yläpohjan ilmatilan ja ulkoilman välille, jolloin ilman massa-/tilavuusvirta ulkoilmasta tuulettuvaan yläpohjaan on yhtä suuri kuin tuulettuvasta yläpohjasta ulkoilmaan. Ilman virtaukselle ei määritellä fyysisiä tulo- ja poistoreittejä, vaan ilmamassa käsitellään yksittäisenä pisteenä,

jolla on tietty lämpö- ja kosteuskapasiteetti, lämpötila, paine ja niin edelleen.

## 2.2.2 Kosteuden siirtyminen

### Kosteuslähteet

Jotta lämpöä tai ainetta voi siirtyä, tulee tarkasteltavan tilasuureen kahden tarkastelupisteen välillä esiintyä potentiaaliero. Ilmiöstä riippuen tämä voi olla esimerkiksi lämpötila- tai paine-ero. Kosteuden siirtymisen näkökulmasta vesihöyry- tai vesipitoisuuseroja synnyttävät ja ylläpitävät kosteuslähteet rakennuksissa on kuvattu taulukossa 2.1.

*Taulukko 2.1 Rakenteiden ulkopuoliset kosteuslähteet.*

	<b>Vesihöyry</b>	<b>Vesi</b>	<b>Jää</b>
<b>Ulkoilma</b>	Ulkoilman sisältämä vesihöyry	Sade	Lumisade ja vastaavat
<b>Sisäilma</b>	Rakennuksen käytöstä aiheutuvat kosteuslähteet	Pesuedet ja putkivuodot	Pakastimet, pakasvarastot
<b>Maa</b>	Huokosilmassa oleva kosteus	Pohjavesi	Routa, jäälinssit

Nestemäisenä vetenä pystyy siirtymään nopeasti suuria määriä kosteutta, mistä syystä sen haitallisen liikkumisen estäminen on rakennusfysikaalisen suunnittelun ensisijaisia tehtäviä. Materiaalien kosteuspitoisuuden pitäminen alhaisella tasolla edellyttää useissa tilanteissa myös muissa muodoissa olevan kosteuden huomioon ottamista.

### Diffuusio

Diffuusio voidaan määritellä partikkelien satunnaisen liikkeen aiheuttamaksi tarkasteltavan potentiaalilin tasaantumisprosessiksi väliaineessa. Diffuusioilmiöitä ovat esimerkiksi lämmön johtuminen ja vesihöyryn diffuusio. Vesihöyryn diffuusiosta ilmassa olevat vesimolekyylit pyrkivät tasaantumaan mahdollisimman tasaisesti käytävissä olevaan tilavuuteen ja tätä varten tapahtuu nettomääräistä vesimolekyylien liikettä laskevan pitoisuusgradientin suuntaan.

Vesihöyryn diffuusio jonkin toisen materiaalin läpi voidaan kuvata matemaattisesti

Fick'n lain avulla (kaava 2.5):

$$\vec{g}_{dif} = -\delta_{\nu,mat} \nabla \nu \quad (2.5)$$

missä

$\vec{g}_{dif}$	on diffuusiovirran tiheys, kg/(m <sup>2</sup> s)
$\delta_{\nu,mat}$	on väliaineen vesihöyrynläpäisevyys, m <sup>2</sup> /s ja
$\nu$	on vesihöyrypitoisuus (tai kosteuspitoisuus), kg/m <sup>3</sup> .

Eri materiaaleissa vesihöyrynläpäisevyys voi olla joko samanlainen tai erilainen eri suuntiin (isotrooppisuus/anisotrooppisuus). Materiaalien vesihöyrynläpäisevyys voidaan kuvata myös diffuusiovastuskertoimen (kaava 2.6) tai suhteellisen diffuusiovastuksen (kaava 2.7) avulla:

$$\delta_{\nu,mat} = \frac{\delta_{\nu,air}}{\mu} \quad (2.6)$$

missä

$\delta_{\nu,air}$	on paikallaan olevan ilman vesihöyrynläpäisevyys, noin 0,000 025 m <sup>2</sup> /s ja
$\mu$	on materiaalin diffuusiovastuskerroin, -.

$$s_d = \mu d \quad (2.7)$$

missä

$s_d$	on suhteellinen diffuusiovastus, m ja
$d$	on materiaalikerroksen paksuus, m.

Vesihöyryn siirtyminen materiaalipinnan ja sitä ympäröivän ilman välillä voidaan kuvata kaavan (2.8) avulla.

$$g_{surf} = \beta \Delta \nu \quad (2.8)$$

missä

$g_{surf}$	on kosteusvirta pinnan ja ympäröivän ilman välillä, kg/(m <sup>2</sup> s)
$\beta$	pinnan kosteudensiirtokerroin, m/s ja
$\Delta \nu$	on vesihöyryn pitoisuusero pinnan ja ympäröivän ilman välillä, kg/(m <sup>2</sup> s).

Vesihöyryn siirtyminen pinnan ja ympäröivän ilman välillä voidaan kirjoittaa myös käyttäen vesihöyryn osapainetta ajavana potentiaalierona. Pinnan kosteudensiirtokerroimen käänteisluku on pinnan vesihöyrynvastus. Vapaalle vesipinnalle haihduttava pinta-ala saadaan suoraan veden pinta-alana, mutta huokoiselle materiaalille käytettävät kertoimet ovat jonkinlaisia tehollisia arvoja, koska haihduttavan vesipinnan lisäksi materiaalien rajapinnoilla on myös runkomateriaalin pintaa. Lisäksi huokoisessa materiaalissa myös vesimolekyylien ja runkoaineen väliset voimat voivat vaikuttaa vesimolekyylien irtoamisnopeuteen. Vesihöyryn haihtuminen ja tiivistymi-

nen sitovat ja vapauttavat myös lämpöä.

### **Termodiffuusio**

Ilmassa olevat partikkelit ovat jatkuvasti ilmamolekyylien törmäysten kohteena. Suuren partikkelin tapauksessa törmäyksiä on niin paljon, että niiden vaikutus on käytännössä joka puolelta yhtä suuri. Sen sijaan partikkelin koon pienentyessä ilmamolekyylien törmäyksiä kohdistuu partikkeliin vähemmän ja epäsymmetrisemmin. Epäsymmetriset törmäykset työntävät partikkelin liikkeelle ja tätä liikettä kutsutaan Brownin liikkeeksi (Einstein 1956, Bird 2015).

Jos ilmassa on lämpötilagradientti, osuu yksittäiseen suurempaan partikkeliin enemmän ilmamolekyylejä sen lämpimämmällä puolella kuin viileämmällä puolella. Nämä ilmamolekyylien törmäykset painavat partikkelia alhaisemman lämpötilan (negatiivisen lämpötilagradientin) suuntaan. Ilmassa oleva partikkeli voi olla esimerkiksi pölyhiukkanen, millä voidaan selittää viileiden pintojen likaantumisen. Ilmiö esiintyy myös huonelämmittimien yhteydessä, jossa pölyhiukkaset eivät kulkeudu lämmittimen kuumaan pintaan asti termodiffuusion vaikutuksesta, vaan pysyvät etäämmällä pinnasta. Kuitenkin jos ilman lämpötila tuloilmalämmittimessä on riittävän korkea, nousee hiukkasten lämpötila niin korkealle, että tästä voi muodostua esimerkiksi epämiellyttävää palaneen hajua.

Termodiffuusion vaikutus on oletettu nyt tehdyissä tarkasteluissa pieneksi ja jätetty niistä pois.

### **Knudsenin effuusio ja diffuusio**

Keskimääräinen törmäysväli (engl. mean free path) kuvaa molekyylien kulkemaa keskimääräistä matkaa peräkkäisten törmäysten välillä. Vesihöyrymolekyylien keskimääräinen törmäysväli normaalissa ilmanpaineessa ja 20 °C lämpötilassa on noin 140 nm (Andreas 2005).

Knudsenin effuusiolla tarkoitetaan molekyylien kulkeutumista reiän läpi, jonka halkaisija on pienempi kuin molekyylien keskimääräinen törmäysväli (Fonseca, Gushterov & Dohrn 2014). Vastaavasti Knudsenin diffuusiolla tarkoitetaan molekyylien diffuusiota huokosputkessa, jonka halkaisija on pieni suhteessa molekyylien keskimääräiseen törmäysväliin (Bonilla & Bhatia 2011).

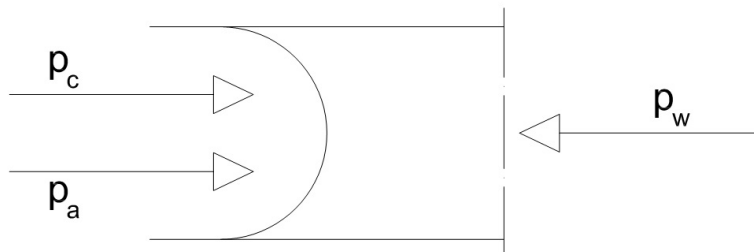
Useimpien rakennusmateriaalien huokoskokojakauma on jatkuva suure, jolloin osas-

sa huokosia tapahtuu myös edellä esitettyä rajoitettua diffuusiota. Kuitenkin esimerkiksi määritettäessä materiaalien vesihöyrynläpäisevyyttä kuppikokeiden avulla, on kokeessa mukana koko huokoskokojakauma, mistä syystä tätä ilmiötä ei yleensä ote- ta erikseen huomioon rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa. Myös tässä työssä tämän ilmiön vaikutuksia ei ole erikseen tarkasteltu.

## Kapillaarisuus

Kapillaarisuudella tarkoitetaan niitä nestemäisen veden siirtymismekanismeja, jois- sa ajavana voimana ovat vesimolekyylien adheesio huokoisen materiaalin pintoihin ja toisaalta vesimolekyylien välinen koheesio toisiinsa. Näitä ovat pintadiffuusio mate- riaalihuokosten pinnalla sekä kapillaarivirtaus vedellä täyttyneissä huokosputkissa. Kapillaarisuuden yhteydessä on hyvä muistaa, että materiaalien huokosrakennet- ta ei käytännössä tunneta tarkasti, vaan veden kapillaarinen siirtyminen kuvataan kontinuumioletuksen pohjalta.

Huokosvettä liikuttavien voimien tasapainoyhtälö voidaan kirjoittaa ympäröivän il- manpaineen, kapillaari-imun ja huokosveden sisäisen paineen avulla. Voimien (pai- neiden) suuntasääntö voidaan valita eri tavoin, mutta kuvassa 2.1 on valittu positiiv- viseksi suunnaksi puristava voima.



**Kuva 2.1** Vapaakappalekuva idealisoidussa huokosputkessa vettä liikuttavista voimista ( $c = \text{kapillaari-imu}$ ,  $a = \text{ilmanpaine}$  ja  $w = \text{veden sisäinen jännitys}$ ). Puristavat voimat on valittu positiivisiksi. Ulkopuolinen vedenpaine on jätetty tarkastelusta pois.

Kuvassa 2.1 olevista voimista on jätetty pois joissakin tilanteissa vaikuttava ulko- puolinen vedenpaine (maassa oleva vapaa vesi, järvet, padot, vuodot, patoumat, jne.).

Vaakasuuntaisten voimien tasapainoyhtälön kautta saadaan tällön kaava 2.9.

$$p_w = p_c + p_a \quad (2.9)$$

missä

$p_w$	on veden sisäinen jännitys, Pa,
$p_c$	on adheesio-koheesio-voimista syntyvä kapillaari-imu ( $\leq 0$ Pa) ja
$p_a$	on ilmanpaine ( $\geq 0$ Pa).

Kaava 2.9 on esitetty esimerkiksi lähteessä (Scheffler 2008, s. 25).

Hyvin pienillä kapillaari-imun arvoilla puristava ilmanpaine voi kompensoida kapillaari-imun vaikutuksen, mistä syystä veden sisäinen jännitys on kapillaari-imua tarkempi nestemäisen veden siirtymisen potentiaali. Huokosveden lopullisen käyttäytyminen riippuu kaikilla reunoilla vaikuttavien voimien yhteisvaikutuksesta, mistä syystä veden sisäisen jännityksen laskentaa varten muodostetaan yhtälöryhmä. Yhdistetyn lämmön- ja kosteuden siirron tarkastelu tuo yhtälöryhmään lisää muuttujia, mutta lopullista yhtälöryhmää ja sen numeerista ratkaisua ei käydä läpi tässä työssä.

Nestemäisen veden siirtymistä materiaalissa kapillaarisesti voidaan kuvata joko kosteuspitoisuuserojen avulla (kapillaarinen kosteusdiffusiviteetti, kaava 2.10) tai vedenpaineerojen avulla (kosteudenjohtavuus, kaava 2.11).

$$\vec{g}_{cap} = -D_{ws} \nabla w \quad (2.10)$$

missä

$\vec{g}_{cap}$	on kapillaarinen kosteusvirta, $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$
$D_{ws}$	on kapillaarinen kosteusdiffusiviteetti tarkasteltavassa materiaalissa, $\text{m}^2/\text{s}$ ja
$w$	on materiaalin kosteuspitoisuus, $\text{kg}/\text{m}^3$ .

$$\vec{g}_{cap} = -k_w \nabla p_w \quad (2.11)$$

missä

$k_w$	on kosteudenjohtavuus tarkasteltavassa materiaalissa, s ja
$p_w$	on vedenpaine materiaalissa, Pa.

Diffusiviteetti-lähestymistavan etuna on materiaaliominaisuuksien helpompi määrittäminen, koska kosteuspitoisuuden muutokset voidaan määrittää punnitsemalla. Toisaalta taas materiaalien kosteuspitoisuus ei ole jatkuva suure materiaalien rajapinnoilla, toisin kuin esimerkiksi vesihöyryn osapaine ja lämpötila materiaalien huokosilmassa sekä niistä seuraava suhteellisen kosteuden ja kapillaari-imun jatkuvuus. Lisäksi esimerkiksi kalsiumsilikaatin kosteudenjohtavuuden on todettu olevan hystereettinen huokosilman suhteellisen kosteuden suhteen, mutta ei materiaalin kosteuspitoisuuden suhteen (Plagge, Scheffler, Grünwald & Funk 2006).

Jos kaava 2.9 sijoitetaan kaavaan 2.11 ja käytetään Kelvinin lakia (kaava 2.25) kapillaari-imun laskemiseksi, niin tällöin kapillaarivirtauksen suunta on korkeammasta suhteellisesta kosteudesta alhaisempaa kohti.

### Kosteuden liikkuminen ilmanvaihtuvuuden mukana

Ilmanvaihtuvuuden mukanaan kuljettama kosteus on tässä työssä käsitelty kaavan 2.12 mukaisesti.

$$G = n\Delta\nu \quad (2.12)$$

missä

$G$  on ilmanvaihtuvuuden aiheuttama kosteuden tuotto ja poisto,  $\text{kg}/(\text{m}^3\text{s})$

$\Delta\nu$  on ilman vesihöyrypitoisuusero yläpohjan ilmatilan ja ulkoilman välillä,  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

Asuintiloista yläpohjaan tulevien vuotoilmavirtojen aiheuttamia kosteuskuormia ei tarkasteltu laskennassa.

### Sade

Yläpohjarakenteiden laskennassa tiilikatteen ulkopintaan kohdistui vaakapinnalle tulevan sadekomponentin mukainen määrä vesisadetta. Vesisade erotettiin laskennan lähtötietoina olevasta kokonaissateesta käyttämällä ehtoa, että sateen ajankohdantana ulkoilman lämpötilan tulee olla vähintään  $0\text{ }^\circ\text{C}$ . Katetta pitkin valuvaa vettä tai vesivuotoja ei tarkasteltu.

## 2.2.3 Lämmön siirtyminen

Lämpöä voi siirtyä sekä ilman nettomääräistä aineen siirtymistä (johtuminen ja säteily) että siirtyvän aineen mukana (diffuusio, kapillaarisuus, konvektio ja sade). Aineen mukana siirtyvä energia käsitellään siirtyvän ainemäärän entalpiasisällön avulla, missä otetaan huomioon sekä faasien että lämpötilan muutoksiin liittyvä aineen sisäenergia. Tällöin tarkasteltava massavirta kerrotaan virtaavan aineen ominaislämpökapasiteetilla ja/tai faasimuutosenergialla, joiden avulla saadaan suoraan laskettua massavirran mukana siirtyvä energiamäärä.



## Johtuminen

Aineen lämpötila kuvastaa atomitason partikkelien liike-energian määrää, sisältäen sekä partikkelien kokonaisliikkeen että sisäisten vapausasteiden mukaiset värähtelyt. Aineen lämpötilan ollessa korkea, siinä olevilla partikkeleilla on suurempi liike-energia kuin alhaisemmassa lämpötilassa olevilla. Partikkelien väliset törmäykset välittävät liike-energiaa korkeamman lämpötilan alueilta matalamman lämpötilan alueille. Monissa metalleissa atomien muodostamat hilat sisältävät vapaita elektroneja, jotka pystyvät myös kuljettamaan energiaa mukanaan. (Young & Freedman 2000, s. 479) Lämmön johtuminen tarvitsee väliaineen edetäkseen, mutta rakennusfysiikan näkökulmasta siinä ei tapahdu aineen nettomääräistä siirtymistä.

Fourierin laki (Kaava 2.13) kuvaa johtumalla siirtyvän lämpövirran tiheyttä homogeenisessa materiaalissa.

$$\vec{q}_{cond} = -\lambda \nabla T \quad (2.13)$$

missä

$\vec{q}_{cond}$	on lämpövirran tiheys, W/m <sup>2</sup>
$\lambda$	on materiaalin lämmönjohtavuus, W/(mK) ja
$T$	on lämpötila, K.

Skalaarikentän gradientti osoittaa suurimman kasvuvauhdin suuntaan. Fourier'n lain mukaan siis lämpötilakentän pisteeseen asetettu lämpövirran tiheysvektori osoittaa negatiivisen gradientin suuntaan, eli kohti lämpötilan suurimman alenemisen suuntaan.

Lämpövirtalevyllä mittaamalla määritetyissä materiaalien lämmönjohtavuuden arvoissa on mukana kaikki lämmön siirtymismuodot, eli johtuminen, säteily ja konvektio sekä aineessa itsessään että sen huokosissa. Näiden suhteelliset osuudet riippuvat muun muassa perusmateriaalin lämmönjohtavuudesta, huokoisuudesta sekä huokoskokojakaumasta. Esimerkiksi suuren huokoisuuden omaavien mineraalivillojen lämmönjohtavuus voi laskea alhaisissa lämpötiloissa säteilylämmönsiirron pienentyessä. Lämmönjohtavuuden lämpötilariippuvuutta ei ole otettu laskentatarkasteluissa huomioon.

Veden lämmönjohtavuus on korkeampi kuin ilmaäytteisten huokosten tehollinen lämmönjohtavuus, joten monien rakennusmateriaalien lämmönjohtavuus kasvaa materiaalin kosteuspitoisuuden noustessa. Laskentaohjelmasta riippuen vaikutus on otettu tyypillisesti huomioon kasvattamalla materiaalien lämmönjohtavuutta niiden kosteuspitoisuuksien ja veden lämmönjohtavuuden suhteessa verrattuna kuiviin materiaaleihin.

## Konvektio

Kapillaarisen kosteuden siirtymisen, diffuusion, ilmavirtauksen konvektion ja sateen mukanaan kuljettama lämpöenergia lasketaan massavirran entalpian avulla. Nyt esitetyissä laskelmissa oletetaan vallitsevan vakiopaine, jolloin laskelmat supistuvat siirtyvän sisäenergian laskemiseksi. Tällöin massavirran tiheys kerrotaan virtaavan aineen tiheydellä, ominaislämpökapasiteetilla sekä virtaavan aineen lämpötilalla, minkä lisäksi otetaan huomioon kosteuden faasimuutokset. Siirtyvä energiamäärä lasketaan aina suhteessa johonkin itse valittuun referenssitasoon.

Lämmönsiirto materiaalin ja ympäröivän ilman rajapinnalla sisältää sekä lämmön johtumisen että konvektion. Ilman käyttäytymiselle materiaalien rajapinnoilla on olemassa erilaisia malleja, mutta perustapauksessa ilman virtausnopeuden oletetaan olevan nolla aivan materiaalin rajapinnalla, mutta kasvavan asteittain ilmakerrokseen päin siirryttäessä. Tällöin lämpö siirtyy johtumalla materiaalista ilmaan, mutta ilmassa kohti siirryttäessä kasvava konvektion määrä tehostaa lämmön siirtymistä pinnan ja ilman välillä. Johtumisen ja konvektion osuudet riippuvat ainakin virtauksen tyypistä (laminaarinen, turbulenti), suunnasta sekä virtaavan aineen ominaisuuksista.

Lämmönsiirto pinnan ja ympäröivän ilman välillä voidaan käsitellä pinnan konvektiivisen lämmönsiirtokerroimen avulla.

$$q_{s,conv} = h_{conv}\Delta T \quad (2.14)$$

missä

$q_{s,conv}$	on lämpövirran tiheys pinnan ja ympäröivän ilman välillä, $W/(m^2)$
$h_{conv}$	on pinnan konvektiivinen lämmönsiirtokerroin, $W/(m^2K)$ ja
$\Delta T$	on lämpötilaero pinnan ja ympäröivän ilman välillä, $K$ .

Tarkasteltavaan laskenta-alueeseen nettomääräisesti tuleva lämpö- tai kosteusvirta voidaan laskentatarkasteluissa käsitellä joko positiivisena tai negatiivisena, sovitusta etumerkkisäännöstä riippuen.

## Säteily

Johtumisen ja konvektion lisäksi kolmas ja viimeinen lämmönsiirtymismekanismi on säteily, joka ei vaadi väliainetta edetäkseen. Yleisesti ottaen säteily voidaan jakaa joko sähkömagneettiseen ja hiukkassäteilyyn sekä toisaalta ionisoivaan ja ionisoimattomaan säteilyyn.

Sähkömagneettinen säteily etenee tyhjiössä valon nopeudella (n. 300 000 km/s). Säteilyä voidaan kuvata sen aallonpituuden tai taajuuden avulla, joiden välillä voidaan tarvittaessa tehdä muunnoksia. Sähkömagneettisen säteilyn ominaisuudet vaihtelevat merkittävästi säteilyn aallonpituudesta (taajuudesta) riippuen.

Sähkömagneettisen säteilyn eteneminen voidaan kuvata matemaattisesti Maxwellin yhtälöiden avulla, jotka liittävät sähkö- ja magnetismin toisiinsa. Yhtälöt myös selittävät, kuinka sähkömagneettisen säteilyn on mahdollista edetä tyhjiössä ilman väliainetta. Yksinkertaistetusti ilmiössä on kyse muuttuvan sähkökentän indusoidusta magneettikentästä, joka taas muuttuessaan vuorostaan induoi sähkökentän. Näin ollen sähkömagneettinen säteily on itseään ylläpitävä mekanismi, jossa sähkö- ja magneettikentät muuttuvat jatkuvasti ollen kohtisuorassa sekä toisiaan että säteilyn etenemissuuntaa vasten. Ilmassa sähkömagneettinen säteily ei etene aivan yhtä hyvin kuin tyhjiössä, mutta ero on rakennusfysiikan näkökulmasta katsottuna pieni.

Sähkömagneettisen säteilyn syntymiseen liittyvien sähkö- ja magneettikenttien muutokset voidaan selittää atomien rakennetta tarkastelemalla. Elektronit voivat sijaita atomien ympärillä elektronikuorilla, joilla ne voivat saada ainoastaan tiettyjä energiatasojen arvoja. Elektronien energiatasot voidaan laskea Schrödingerin yhtälön ratkaisuna saatavien aaltofunktioiden avulla, joissa esiintyvät kertoimet kuvaavat elektronien ja elektronikuorien eri ominaisuuksia (Young & Freedman 2000). Elektronit voivat esimerkiksi absorboidessaan fotonin virittyä korkeammalle energiatasolle, mutta taas palatessaan takaisin alemmalla tasolle vastaavasti emittoida fotonin. Emittoidun fotonin aallonpituus, liike-energia ja liikemäärä riippuvat siitä, minkä elektronikuorien välillä elektroni on liikkunut. Sähkömagneettisen säteilyn synnyn ja etenemisen selittäminen edellyttää säteilyn käsittelyä sekä partikkelien että aaltoliikkeen näkökulmista (aalto-hiukkan-dualismi). Lisäksi elektronien sijainnit tulee käsitellä tilastollisesti jakautuneina suureina (vrt. Heisenbergin epätarkkuusperiaate).

Kaikki pinnat, joiden lämpötila on absoluuttista nolapistettä korkeampi, lähettävät (emittoivat) sähkömagneettista säteilyä. Kiinteillä aineilla ja nesteillä pinnasta lähtevällä säteilyllä on jatkuva aallonpituuden spektri, mutta kaasuilla taas spektrissä voi esiintyä vain tiettyjä aallonpituuden arvoja. Lämpösäteilyllä tarkoitetaan vain osaa jatkuvasta aallonpituusspektristä.

Ideaalisen mustan kappaleen pinnasta lähtevän lämpösäteilyn teho säteilyn aallonpituuden ja pinnan lämpötilan funktiona saadaan laskettua Planckin lain avulla (kaava 2.15):

$$E_{b,\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(\frac{hc}{\lambda kT}) - 1} \quad (2.15)$$

missä

$E_{b,\lambda}$	on mustan kappaleen lähettämä spektrinen säteilyteho, $\text{W}/(\text{m}^2\text{m})$
$h$	on Planckin vakio, $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js
$c$	on valonnopeus tyhjiössä, $c = 2,998 \cdot 10^8$ m/s
$\lambda$	on säteilyn aallonpituus, m
$k$	on Boltzmannin vakio, $k = 1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K ja
$T$	on kappaleen pintalämpötila, K.

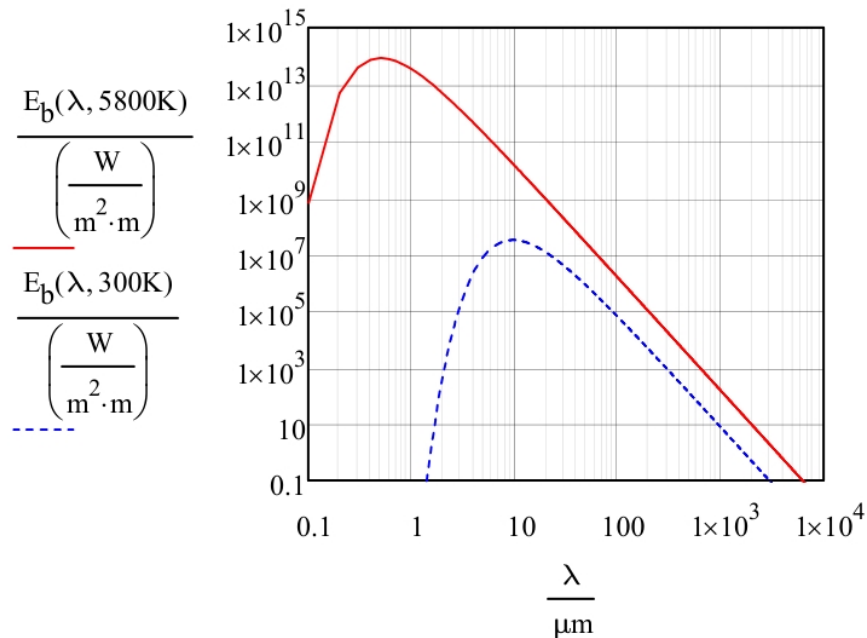
Integroimalla lauseke 2.15 kaikkien aallonpituuksien yli, saadaan laskettua mustan kappaleen pinnasta lähtevä kokonaissäteilyteho (Stefan-Boltzmannin laki, kaava 2.16).

$$E_b = \sigma T^4 \quad (2.16)$$

missä

$E_b$	on mustan kappaleen lähettämä säteilyteho kaikkien aallonpituuksien yli integroituna, $\text{W}/\text{m}^2$
$\sigma$	on Stefan-Boltzmannin vakio, $5,67 \cdot 10^{-8}$ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ .

Kuvassa 2.2 on esitetty kahden mustan kappaleen säteilyintensiteettien jakaumat aallonpituuden funktiona, kun kappaleiden pintalämpötilat vastaavat karkeasti Auringon ja Maan pintalämpötiloja.



**Kuva 2.2** Mustan kappaleen säteilyintensiteetin jakauma aallonpituuden funktiona kahdella eri pintalämpötilalla.

Taulukossa 2.2 on esitetty lämpösäteilyn aallonpituusalueelle ( $0,1 \mu\text{m} \dots 1 \text{mm}$ ) jäävät säteilytyypit (Touloukian & DeWitt 1970) sekä niiden suhteelliset osuudet mus-

tan kappaleen mukaisesta auringonsäteilystä (5800 K). Auringonsäteilyn intensiteetin spektri muuttuu muun muassa säteilyn kulkiessa ilmakehän läpi, mutta arvojen on kuitenkin katsottu kuvastavan auringonsäteilyn koostumusta. Osuudet on laskettu integroimalla Planckin lakia (kaava 2.15) MathCad-ohjelman avulla ja jakamalla tulos Stefan-Boltzmannin lain (kaava 2.16) mukaisella kokonaisteholla. Tulokseksi saatujen prosenttiosuuksien summa ylitti 100 % (100,1 %), mistä syystä arvoista tulee tarkastella ainoastaan niiden suuruusluokkia.

**Taulukko 2.2** Lämpösäteilyn tyypit aallonpituusalueittain, kun säteilyn spektri on laskettu pintalämpötilaltaan 5800 K olevalle ideaaliselle mustalle kappaleelle Planckin lain avulla. UVA-säteilyalueen yläraja on muutettu vastaamaan näkyvän valon aallonpituusalueen alarajaa (0,400  $\mu\text{m}$   $\rightarrow$  0,380  $\mu\text{m}$ ).

Alue	Tyyppi	Aallonpituusalue	Osuus, %
Ultravioletti	UVC	0,1–0,28	2
	UVB	0,28–0,315	2
	UVA	0,315–0,380	6
Näkyvä valo	VIS	0,380–0,780	47
Infrapuna	IRA	0,78–1,4	29
	IRB	1,4–3	12
	IRC	3–1000	2

Taulukosta 2.2 nähdään, että sekä lyhytaaltoisen näkyvän valon (VIS) että pitkäaaltoisen infrapunasäteilyn (IRA–IRC) aallonpituusalueilla saapuu Auringosta merkittävät osuudet (47 % ja 43 %) lämpösäteilyä. Koska ihmissilmä ei havaitse infrapunasäteilyä, ei silmin havaittu pinnan väri välttämättä täysin vastaa pinnan todellista auringonsäteilyn absorptiokerrointa, vaikka kyseistä suuretta paremman tiedon puutteessa usein arvioidaankin tällä perusteella.

Pinnan emissiviteetti kuvaa todellisen säteilijän säteilytehon suhdetta vastaavaan mustan kappaleen säteilytehoon kaavan 2.17 mukaisesti.

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} \quad (2.17)$$

missä

$\varepsilon$  on pinnan emissiviteetti (engl. hemispherical emissivity), - ja  
 $E$  on todellisen kappaleen emittoima säteilyteho,  $\text{W}/\text{m}^2$ .

Yleisessä tilanteessa emissiviteetti on muun muassa aallonpituuden funktio.

Musta kappale on ideaalinen absorboija, joka imee itseensä kaiken siihen tulevan säteilytehon. Todellisilla kappaleilla pintaan tuleva sähkömagneettinen säteily voi pinnan kohdatessaan absorboitua, heijastua tai kulkea materiaalin läpi. Näiden kolmen mekanismin suhteellisten osuuksien summa on yksi verrattuna pinnalle tulevaan

säteilytehoon (kaava 2.18).

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.18)$$

missä

$\alpha$	on pintaan absorboituneen säteilyn suhteellinen osuus
$\rho$	on pinnasta heijastuneen säteilyn suhteellinen osuus ja
$\tau$	on pinnan läpi kulkeneen säteilyn suhteellinen osuus.

Tasapainotilanteessa kappaleen emittoima säteilyteho vastaa kappaleeseen absorboitunutta säteilytehoa. Tästä ehdosta voidaan johtaa niin kutsuttu Kirchoffin laki (2.19).

$$\varepsilon = \alpha \quad (2.19)$$

Yhtälöt 2.18 ja 2.19 kuvaavat säteilykomponenttien tasetta vähintään aallonpituusalueittain tarkasteltuna, mikä useissa rakennusfysiikan tarkasteluissa tarkoittaa säteilyn jakamista lyhyt- ja pitkäaaltoiseen säteilyyn.

Lambertin lain mukaan sen sijaan pinnasta lähtevän säteilyn intensiteetti on suurimmillaan pinnan normaalin vastaisella tasolla, mistä intensiteetin arvo pienenee lopulta nolnaan siirryttäessä pois tästä normaalitasolta pintaa vasten kohtisuorassa olevalle tasolle (ns. kosinilaki). Tyypillisissä rakennusfysiikan tarkasteluissa kuitenkin oletetaan, että pinnasta lähtevän säteilyn intensiteetti on yhtä suuri joka suuntaan säteilevästä pinnasta tarkasteltuna. Tässä työssä on oletettu säteilyn tulevan niin laajoilta pinnoilta, että säteilyn intensiteetin suuntariippuvuutta ei tarvitse ottaa huomioon.

Yhtälössä 2.17 esiintyvä pinnan emittoima säteilyteho ei sisällä kaavassa 2.18 esiintyvää heijastunutta säteilyä, vaan pinnasta (esim. maasta) lähtevää kokonaissäteilyä laskettaessa nämä lasketaan yhteen.

Tarkasteltavan tilanteen geometria vaikuttaa pinnasta toiseen siirtyvän säteilytehon määrään. Esimerkiksi jos vastaanottava pinta on vain pieni osa säteilylähteen ympäristöä, siirtyy vain osa kaavan 2.16 mukaisesta säteilytehosta tähän vastaanottavaan pintaan. Jos taas vastaanottava pinta peittää säteilevän pinnan kokonaan, päättyy kaikki säteilevän pinnan lähettämä säteily tähän vastaanottavaan pintaan. Pinnan 1 näkyvyyskerroin  $F_{12}$  on geometrinen suure, joka kuvaa sitä osaa pinnan 1 lähettämästä säteilytehosta, joka osuu pintaan 2. Tälle suurelle on olemassa kirjallisuudessa erilaisia taulukoita, kuvia ja laskentakaavoja, esimerkiksi (Mills 1999, Incropera, Witt, Bergman & Lavine 2007). Kattopintojen on säteilysuureita laskettaessa oletettu olevan vaakatasossa, jolloin niiden näkyvyyskerroin taivaalle on yksi ( $F_{katto,taivas} = 1$ ).

Näkyvyyskertoimet sekä pintojen emissiviteetit ja pinta-alat on mahdollista yhdistää yhdeksi kaavan 2.20 mukaiseksi kertoimeksi, kts. esim. (Mills 1999, s. 473) ja (Incropera et al. 2007, s. 832).

$$\mathcal{F}_{12} = \left( \frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \frac{A_1}{A_2} \right)^{-1} \quad (2.20)$$

missä

$\mathcal{F}_{12}$  on säteilylämmönsiirron kokonaiskerroin, - ja  
 $A_1$  ja  $A_2$  ovat pintojen 1 ja 2 pinta-alat,  $m^2$ .

Linearisoimalla Stefan-Boltzmannin laki 2.16 ja käyttämällä kaavassa 2.20 esitettyä kokonaissäteilylämmönsiirron kerrointa, saadaan pitkäaaltoisen säteilyn lämmönsiirto ilmoitettua lämpötilojen ensimmäisten potenssien avulla (Kaava 2.21).

$$q_{lw,12} = \mathcal{F}_{12} \sigma \bar{T}_{12}^3 (T_1 - T_2) \quad (2.21)$$

missä

$q_{lw,12}$  on pitkäaaltoisen säteilyn teho pinnasta 1 pintaan 2,  $W/m^2$   
 $T_1$  on pinnan 1 lämpötila, K  
 $T_2$  on pinnan 2 lämpötila, K ja  
 $\bar{T}_{12}$  on pintojen 1 ja 2 lämpötilojen keskiarvo.

Käyttämällä termille  $\mathcal{F}_{12} \sigma \bar{T}_{12}^3$  laskelmissa vakioarvoa saadaan yhtälöryhmien ratkaisua yksinkertaistettua huomattavasti.

Lyhytaaltainen auringonsäteily jaetaan suoraan ja diffuusiin säteilyyn niiden geometrisen erilaisuuden huomioon ottamiseksi. Suora säteily tarkoittaa nimensä mukaisesti suoraan Auringosta pinnalle saapuvaa säteilyä, joka ei ole heijastunut mistään muusta pinnasta. Diffuusi säteily tarkoittaa ilmakehästä sekä muista pinnoista heijastunutta säteilyä (kaava 2.18). Esimerkiksi päivällä pilven tai muun esteen varjostaessa Aurinkoa, ei tällöin varjossa olevalle pinnalle saavu lainkaan suoraa säteilyä, mutta pinnalle voi kuitenkin osua muista pinnoista heijastunutta diffuusia säteilyä. Pintaan absorboituu pinnan absorptiokertoimen (kaava 2.18) mukainen määrä auringonsäteilyä.

## 2.3 Ilman, kosteuden ja lämmön varastoituminen

### 2.3.1 Ilman varastoituminen

Ilma on kaasujen seos, jossa on muun muassa typpeä, happea, argonia, hiilidioksidia ja vettä sekä muita aineita. Eri kaasujen oletetaan noudattavan Daltonin osapaine-

lakia, jolloin ilman kokonaispaine muodostuu yksittäisten komponenttien osapaineiden summana.

Ilman (kaasun) käyttäytymistä voidaan arvioida Machin luvun avulla, joka määritellään kaavan 2.22 avulla.

$$Ma = \frac{r}{r_{sound}} \quad (2.22)$$

missä

$r$  on virtaavan fluidin virtausnopeus, m/s ja

$r_{sound}$  on äänen nopeus tarkasteltavassa aineessa, m/s.

Jos virtaukselle laskettu machin nopeus on noin alle 0,2 ( $Ma < 0,2$ ), niin ilma voidaan käsitellä ideaalikaasun tilanyhtälön avulla. Jos äänennopeus ilmassa on noin 340 m/s, niin tällöin virtausnopeus tarkasteltavissa rakenteissa saisi olla enintään noin 68 m/s. Vaikka ilman virtausnopeus kasvaisikin rakenteissa paikallisesti, niin tämän ehdon on oletettu täyttyvän.

Ideaalikaasun tilanyhtälön käytön lisäksi ilma on oletettu kokoonpuristumattomaksi. Tällöin tarkastelualueeseen tulevat ja sieltä lähtevät ilmamäärät ovat aina yhtä suuret eikä ilman varastoitumista tapahdu (ilmavirtauksen divergenssi on nolla).

## 2.3.2 Kosteuden varastoituminen

### Kosteus ilmassa

Ilma pystyy sitomaan enintään tietyn määrän kosteutta ja tätä määrää kutsutaan kyllästyskosteuspitoisuudeksi ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ). Ilman sisältämän kosteuden määrä voidaan ilmaista myös vesihöyryn osapaineen avulla (Pa), jolloin puhutaan kyllästysosapaineesta. Näiden suureiden välillä voidaan tehdä tarvittaessa muunnoksia ideaalikaasun tilanyhtälön avulla. Delphin-laskentaohjelma käyttää kaavan 2.23 mukaista lauseketta ilman sisältämän vesihöyryn kyllästysosapaineen laskemiseksi.

$$\begin{aligned} p_{\nu,sat}(\theta) &= 288,68 \left( 1,098 + \frac{\theta}{100} \right)^{8,02} & \theta \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C} \\ p_{\nu,sat}(\theta) &= 4,6890 \left( 1,486 + \frac{\theta}{100} \right)^{12,3} & \theta < 0 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (2.23)$$

missä

$p_{\nu,sat}$  on vesihöyryn kyllästysosapaine, Pa ja

$\theta$  on ilman lämpötila,  $^\circ\text{C}$ .

Tämän rajan ylittävä kosteuden määrä pyrkii tiivistymään ilmassa vedeksi. Tiivis-



tyminen edellyttää jonkinlaisen tiivistymisytimen olemassaoloa reaktion käynnistymiseksi.

Suhteellisella kosteudella tarkoitetaan ilman sisältämän vesihöyryn määrän suhdetta maksimiarvoonsa (kyllästyskosteuspitoisuuteen tai -osapaineeseen). Suhteellisen kosteuden määritelmä on esitetty kaavassa 2.24.

$$\varphi = \frac{\nu}{\nu_{sat}} = \frac{p_{\nu}}{p_{\nu,sat}} \quad (2.24)$$

missä

$\varphi$	on ilman suhteellinen kosteus, -
$\nu$	on kosteuspitoisuus, kg/m <sup>3</sup>
$\nu_{sat}$	on ilman kyllästyskosteuspitoisuus, kg/m <sup>3</sup> ja
$p$	on ilman vesihöyryn osapaine, Pa.

Ilman sisältämän kosteuden määrä ilmoitetaan joskus myös massaprosenttina kuivan ilman massaan verrattuna.

Arkikielessä kuivalla ilmalla tarkoitetaan tilannetta, jossa esimerkiksi huoneilman suhteellinen kosteus on talvella alhainen, esimerkiksi noin 20 %RH. Tässä tilanteessa kuivalla ilmalla tarkoitetaan kuitenkin tilannetta, jossa ilman suhteellinen kosteus on 0 %RH.

## Kosteus huokoisessa materiaalissa

Hygroσκοoppisuudella tarkoitetaan materiaalien ominaisuutta sitoa kosteutta ympäröivästä ilmasta ja luovuttaa sitä olosuhteiden muuttuessa takaisin. Yleisesti ottaen ilmiön suuruuteen vaikuttavat muun muassa materiaalien huokoskokojakauma, huokosten ilmaa vasten oleva pinta-ala ja huokosten pintojen ominaisuudet. Hygroσκοoppinen materiaali on hydrofiilinen, eli huokosten pinnoilla muodostuu kemiallisia sidoksia vesimolekyylien ja runkomateriaalin molekyyliden välille, kun taas hydrofobisessa materiaalissa vesimolekyylit ja runkoaineen molekyylit hylkivät toisiaan.

Kun vesihöyryn määrä huokosissa alkaa kasvaa aivan kuivasta tilanteesta liikkeelle lähtien, alkavat vesimolekyylien ja huokosten seinämien väliset adheesiovoimat sitoa vesimolekyylejä huokosilmasta huokosten pintaan. Kun huokosten pinnoilla on vesimolekyylejä enintään vain yhden kerroksen verran puhutaan monomolekylaarisesta adsorptiosta ja tämän jälkeen polymolekylaarisesta adsorptiosta, kun kerroksia on useita.

Vesimolekyylien väliset koheesivoimat ovat seurausta vesimolekyyleissä olevien sähköisten varausten epätasaisesta jakautumisesta molekyylien sisällä, jolloin vierekäiset vesimolekyylit vetävät toisiaan puoleensa. Hygroskooppisissa materiaaleissa adheesio-koheesio-vuorovaikutus synnyttää jatkuvan vedon vesimolekyylien välille, jolloin yksittäiset vesimolekyylit ovat tiukemmin huokoisessa materiaalissa kiinni kuin vapaan vesipinnan tapauksessa. Siinä missä vapaan vesipinnan tasapainotilanne vastaa 100 %RH veden pinnan vieressä olevassa huokosilmassa, muodostuu tasapainotilanne vedolla olevalle vesipinnalle tätä alhaisemmassa ympäröivän ilman suhteellisessa kosteudessa. Tällä tavoin on mahdollista, että hygroskooppisissa materiaaleissa on tasapainotilanteessa vettä huokosissa, vaikka vapaasta vesipinnasta kosteus haihtuisikin ympäröivään ilmaan.

Kelvinin yhtälö (2.25) liittyy toisiinsa kapillaari-imun ja huokosilman suhteellisen kosteuden.

$$\ln(\varphi) = \frac{p_c}{\rho_w R_\nu T} \quad (2.25)$$

missä

$\rho_w$	on veden tiheys, 1000 kg/m <sup>3</sup>
$R_\nu$	on vesihöyryn ominaiskaasuvakio, 461,4 J/(kgK) ja
$T$	on lämpötila tarkastelupisteessä, K.

Esimerkiksi lämpötilan ollessa 273.15 K, vastaa kapillaari-imu -1 MPa karkeasti suhteellista kosteutta 99 % RH.

Laskentatarkastelujen tekemiseksi tulee huokosilman olosuhteiden lisäksi tuntea niiden liittyminen nestemäisen veden määrään materiaalissa. Huokosrakenteen monimutkaisuudesta johtuen kosteuden määrä eri materiaaleissa ja eri tasapaino-olosuhteissa on tarpeen määrittää kokeellisesti.

Yksi tavallinen taustaoletus nykyisissä 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 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.

Materiaalien kosteuspitoisuutta voidaan kuvata joko hygroskooppisen tai kapillaari-

sen 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. Suhteellisen kosteuden ollessa korkea ( $>97\%$  RH), on helpompi käyttää kapillaarista tasapainokosteuskäyrää ja taas esimerkiksi normaalin huoneilman suhteellisen kosteuden alueella hygroskooppista tasapainokosteuskäyrää.

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.

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

Todellisissa materiaaleissa esiintyy materiaalista riippuva määrä tasapainokosteuskäyrien hystereesiä, eli kasvuvan ja kuivuvan materiaalin tasapainokosteuspitoisuudet eroavat toisistaan. Hystereesin lisäksi kosteuden faasimuutokset tapahtuvat huokoisissa materiaaleissa äärellisellä nopeudella, vaikka yleisesti käytössä olevien laskentamallien perusolettamuksissa tämä jätetään tarkasteluista pois. Näitä ilmiöitä ei ole tässä työssä otettu huomioon

### 2.3.3 Lämmön varastoituminen

Delphin-ohjelmassa energian säilymlaki on kirjoitettu tarkastelualueessa olevien aineiden entalpiasisältöjen avulla, missä sisäenergian  $U$  ja entalpian  $H$  välinen erotus oletetaan pieneksi ja jätetään laskentatarkasteluista pois. Tarkasteltavan laskentaelementin olettaminen isotermiseksi mahdollistaa runkoaineen, veden, vesihöyryn ja ilman entalpiasisällön käsittelemisen vain yhden lämpötilan avulla. (Nicolai & Grünewald 2006).

Taseyhtälö voidaan kirjoittaa kaavan 2.26 mukaisessa muodossa.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} ((\rho_{mat}c_{mat} + wc_w + \nu\theta_g c_{p,\nu} + \rho_{a,dry}\theta_g c_{p,a})(T - T_0) + \nu\theta_g h_\nu) \\ = \nabla(q_{cond} + c_w(T - T_0)g_{cap} + h_\nu g_{dif}) + S \quad (2.26) \end{aligned}$$

missä

$\rho_{mat}$	on runkomateriaalin tiheys, kg/m <sup>3</sup>
$c_{mat}$	on runkomateriaalin ominaislämpökapasiteetti, J/(kgK)
$w$	on materiaalin kosteuspitoisuus (veden määrä), kg/m <sup>3</sup>
$c_w$	on veden ominaislämpökapasiteetti, noin 4182 J/(kgK)
$\theta_g$	on kaasulle vapaa tilavuusosuus, m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$c_{p,\nu}$	on vesihöyryn ominaislämpökapasiteetti, noin 1860 J/(kgK)
$\rho_{a,dry}$	on kuivan ilman tiheys, kg/m <sup>3</sup>
$c_{p,a}$	on kuivan ilman ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa, noin 1000 J/(kgK)
$T$	on tarkastelupisteen (-alueen) lämpötila, K
$T_0$	on laskentaa varten valittu referenssilämpötila, K
$h_\nu$	on veden höyrystymislämpö, noin 2260 kJ/kg ja
$S$	on termi muita lämmönlähteitä/-nieluja varten, J/(m <sup>3</sup> s).

Kaavasta (2.26 huomataan, että esimerkiksi vesihöyryn diffuusion lämpötilaeroihin liittyvää tuntuvaa lämpöä ei ole laskennassa mukana, vaan ainoastaan vesihöyryn kuljettama faasimuutosenergia. Sadeveden mukanaan kuljettama lämpöenergia on mukana kosteuden kapillaarivirtauksen termissä. Delphin 5 -ohjelman saatavilla olevassa käyttöoppaan versiossa lähde- ja nielutermit on käsitelty hyvin suppeasti, mutta esimerkiksi lämpösäteilyn vaikutukset on mahdollista ottaa laskelmissa huomioon juuri näiden kautta.

Aineen faasimuutokset eivät ole energian siirtymismuotoja, vaikka esimerkiksi veden haihtuminen onkin sidoksissa myös lämmönsiirtoon. Veden haihtumisen ja kondensoitumisen sitomat ja luovuttamat faasimuutosenergiat olivat laskentatarkastelussa mukana, mutta ei jäätymisen tai sulamisen. Kemialliset reaktiot, kuten betonin hydratoituminen voivat myös vaikuttaa joissain tilanteissa merkittävästi rakenteen lämpötilakenttään, mutta tämän ilmiön vaikutusta ei ollut tarvetta ottaa huomioon nyt tehdyissä laskelmissa.

## 2.4 Homemalli

Homemallin avulla voidaan numeerisesti arvioida pinnalla kasvavan homeen peittoosuutta. Homemallin laskennan tuloksena saadaan homeindeksi  $M$ , joka voi saada

arvoja välillä 0...6. Raja-arvon  $M \geq 1$  tarkoittaa homeen kasvun käynnistymistä, raja-arvo  $M > 3$  tarkoittaa silmin havaittavaa homeenkasvua tai runsasta mikroskooppilla havaittavaa kasvua ja homeindeksin arvo  $M = 6$  tarkoittaa pinnan lähes täyttä peittoa.

Alkuperäinen homemalli kehitettiin puumateriaaleille (Viitanen & Ritschkoff 1991, Hukka & Viitanen 1999), mutta mallia on myöhemmin täydennetty muun muassa homeen kasvun ja taantuman materiaaluokilla (Viitanen, Vinha, Salminen, Ojanen, Peuhkuri, Paaajanen & Lähdesmäki 2010, Ojanen, Viitanen, Peuhkuri, Lähdesmäki, Vinha & Salminen 2010). Tässä työssä homemallia käytettiin kirjoittamalla lähteen (Ojanen et al. 2010) mukaiset laskentakaavat (esitetty seuraavassa) Matlab-funktioksi, jonka avulla kaikki homeindeksit laskettiin.

Jos suhteellinen kosteus on yli kriittisen rajan  $RH_{crit}$ , niin homeen kasvu on mahdollista.

$$RH_{crit} = \max(-0,00267T^3 + 0,160T^2 - 3,13T + 100,0, \quad RH_{min}) \quad (2.27)$$

missä

$RH_{crit}$	on suhteellisen kosteuden alaraja homeen kasvulle, %
$T$	on tarkasteltavan pinnan lämpötila, °C ja
$RH_{min}$	on lämpötilasta riippumaton homeen kasvun käynnistymisen alaraja, %.

Kun homeen kasvu on mahdollista, sen kasvunopeus saadaan laskettua kaavalla

$$\frac{dM}{dt} = \frac{1}{7 \cdot \exp(-0,68 \ln(T) - 13,9 \ln(RH) + 66,02)} k_1 k_2 \left( \frac{1}{24} \right) \quad (2.28)$$

missä

$M$	on tarkasteltavan pinnan homeindeksi (muuttuja), -
$t$	on aika tunteina, h
$RH$	on tarkasteltavan pinnan suhteellinen kosteus, %
$k_1$ ja $k_2$	ovat mallin kertoimia, jotka säätelevät homeindeksin kasvunopeutta.

Kertoimen  $k_2$  lauseke on esitetty kaavassa 2.29.

$$k_2 = \max(1 - \exp(2,3(M - M_{max})), 0) \quad (2.29)$$

missä

$M_{max}$	on suurin mahdollinen homeindeksin arvo, joka voidaan saavuttaa tarkasteltavissa olosuhteissa.
-----------	--

$$M_{max} = A + B \cdot \left( \frac{RH_{crit} - RH}{RH_{crit} - 100} \right) - C \cdot \left( \frac{RH_{crit} - RH}{RH_{crit} - 100} \right)^2 \quad (2.30)$$

missä

$A$ ,  $B$  ja  $C$  ovat laskentamallin kertoimia, -.

Jos suhteellinen kosteus pinnalla on alle kriittisen arvon  $RH_{crit}$  tai jos tarkasteltavan pinnan lämpötila on alle  $0^\circ\text{C}$  tai yli  $50^\circ\text{C}$ , niin homeen kasvu ei ole mahdollista. Tällöin tapahtuu homeen taantumista, joka lasketaan kaavojen 2.31 ja 2.32 avulla.

$$\left. \frac{dM}{dt} \right|_{taantuma} = C_d \cdot \left. \frac{dM}{dt} \right|_{taantuma, puu} \quad (2.31)$$

$$\left. \frac{dM}{dt} \right|_{taantuma, puu} = \begin{cases} -0,032 \cdot \frac{1}{24} & , \text{ kun } t-t_1 < 6 \text{ h} \\ 0 & , \text{ kun } 6 \text{ h} \leq t-t_1 < 24 \text{ h} \\ -0,016 \cdot \frac{1}{24} & , \text{ kun } t-t_1 \geq 24 \text{ h} \end{cases} \quad (2.32)$$

missä

$C_d$  on homeen taantumakerroin, -

$t$  on aika tunteina, h ja

$t_1$  on homeen taatumiseen viimeisin käynnistymisajanhetki, h.

Laskennassa tarvittavat kertoimet on esitetty taulukoissa 2.3 ja 2.4

**Taulukko 2.3** Suomalaisen homemallin kertoimet homeenkasvun käynnistymiselle ja nopeudelle.

Homehtumis-herkkyysluokka	Lyhenne	$k_1$			A	B	C	$RH_{min}, \%$
		$M < 1$	$M \geq 1$					
Erittäin herkkä	HHL1	1	2	1	7	3	80	
Herkkä	HHL2	0,578	0,386	0,3	6	1	80	
Kestävä	HHL3	0,072	0,097	0	5	1,5	85	
Erittäin kestävä	HHL4	0,033	0,014	0	3	1	85	

**Taulukko 2.4** Suomalaisen homemallin taantumakertoimet.

Homeenkasvun-taatumaluokka	Lyhenne	Taatumakerroin
Voimakas taantuma	HTL1	1,0
Merkittävä taantuma	HTL2	0,5
Kohtalainen taantuma	HTL3	0,25
Vähäinen taantuma	HTL4	0,1

Laskentakaavoissa esiintyvän muunnosterman ( $1/24$ ) on tulkittu liittyvän tunnitaitaisen laskenta-askelen käyttöön homemallin laajennustyössä.

Nyt tehdyissä laskentatarkasteluissa käytettiin eri materiaaleille seuraavia luokkia: mineraalivilla HHL3/HTL4, homesuojattu puukuitueriste HHL4/HTL4, muovipohjaiset lämmöneristeet ja aluskatteet HHL3/HTL4, kattotiilet HHL3/HTL4 sekä karkeasahattu puutavara HHL1/HTL2.

Laskenta-ajan merkittävän säästön vuoksi tarkastelut tehtiin suurelta osin käyttäen yksiulotteisia laskentamalleja, joissa ei ollut mukana yläpohjien kantavia puuosia. Tätä puutetta pyrittiin kompensoimaan seuraamalla yläpohjan ilmatilan ylä-, keski- ja alaosien olosuhteita ja määrittämällä näiden tarkastelupisteiden homeindeksit karkeasahatun puutavaran kasvu- ja taantumaluokkien (HHL1/HTL2) mukaisesti. Tämän oletuksen voidaan olettaa olevan pääsääntöisesti varmallalla puolella, koska todellisten rakenteiden puuosien pinnoilla olosuhteet muuttuvat todennäköisesti hitaammin kuin ilmassa. Tällöin puuosien pinnoilla ei esiinny yhtä korkeita suhteellisen kosteuden arvoja kuin ilmassa, jolloin myös homeen kasvu jää vähäisemmäksi. Tästä oletuksesta aiheutuvaa virhettä ei kuitenkaan ole tässä työssä selvitetty.

## 2.5 Yhteenveto rakennusfysiikan laskentatarkastelujen perusolettamuksista

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.

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 jäätymisestä aiheutuvia vaurioitumisilmiöitä on 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.

Ilman ja veden viskositeetti riippuu fluidin lämpötilasta, joten ilmavirran ja kapillaa-

**Taulukko 2.5** Rakennusfysiikan teorian perusolettamuksia tyypillisten laskentatarkastelujen näkökulmasta

	<b>Varastointi</b>	<b>Siirto</b>
<b>Lämpö</b>	Lämpöä varastoituu perusmateriaaliin ja kosteuteen sekä tuntuvana että latenttina lämpönä.	Lämpöä siirtyy johtumalla, säteilemällä ja konvektiolla.
<b>Ilma</b>	Ilma katsotaan usein kokoonpuristumattomaksi kaasuksi, jolloin ilmamäärän muutokset tarkastelupisteessä tapahtuvat nopeasti, eikä varastoitumista oteta huomioon.	Ilma liikkuu lämpötilaerojen, tuulen sekä koneellisesti synnytetyn paine-eron ajamana.
<b>Vesihöyry</b>	Vesihöyryä varastoituu vain (huokos)ilmaan. Materiaalien huokosissa vesihöyry ja vesi ovat paikallisessa tasapainotilanteessa.	Vesihöyry liikkuu diffuusiolla vesihöyryn osapaine-erojen vaikutuksesta ja ilman konvektion mukana kokonaispaineerojen vaikutuksesta.
<b>Nestemäinen vesi</b>	Vettä adsorboituu huokosilmasta materiaalihuokosten pinnoille mono- ja polymeerimolekyylisina 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.
<b>Jää</b>	Suuremmissa huokosissa vesi jäätyy lämpötilan laskiessa 0 °C alapuolelle. Pienemmissä huokosissa paineenalainen vesi voi pysyä sulana vielä tätä alhaisemmissa lämpötiloissa.	Jäätynyt kosteus ei liiku.
<b>Home/mikrobit</b>	Home kasvaa materiaalien pinnoilla. Avoimen huokosverkoston kautta home voi kasvaa myös materiaalien sisällä	Homeet ja niiden aineenvaihduntatuotteet voivat siirtyä rakenteista sisäilmaan erityisesti ilmavuotojen mukana.



risen 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 oletettu olevan yleensä pieni ja suurin vaikutus on ympäröivän ilman suhteellisella kosteudella.

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.

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.

Laskentaohjelmasta riippuen se 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 ruostumista.

## 2.6 Stokastinen ja deterministinen laskenta

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 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 tietyistä 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 laskentamenetelmissä on kehitettävää, jotta osattaisiin eritellä deterministisen laskennan puutteet tarkoituksellisesta stokastisesta laskennasta. Esimerkiksi Kansainvälisen Energiajärjestön pro-

jektissa IEA Annex 41 eri tutkimusryhmät tekivät laskentaa samoilla lähtötiedoilla, mutta silti tuloksissa oli hajontaa. Stokastisilla laskentamenetelmillä olisi kuitenkin mahdollista löytää uusia lähestymistapoja rakennusfysikaalisiin tarkasteluihin. Laskentamenetelmien kartoitusta ja ohjeistusta rakennusfysikaalisiin tarkasteluihin on tutkittu muun muassa Kansainvälisen Energiajärjestön projektissa IEA Annex 55.



### 3. YLEISKUVAUS TUULETTUVIEN YLÄPOHJIEN KOSTEUSTEKNISESTÄ TOIMINNASTA

#### 3.1 Yleistä

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 koon ja sijoittelun osalta on olemassa lisäksi erilaisia ratkaisuja, 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 (vähäisessä määrin) 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.

Painovoimainen ilmanvaihto tarkoittaa ilman vaihtumista ilman tiheyseroista johtuvien paine-erojen ja/tai tuulen vaikutuksesta. Todellisen yläpohjan ilmanvaihtu-

vuuteen vaikuttavat useat tekijät, kuten alueella vallitsevat tuuliolot, maaston paikalliset pinnanmuodot sekä ilmanvaihtoaukkojen suuruus ja suunta. Tuulettuvien yläpohjien ilmanvaihtuvuudesta on olemassa muutamia tutkimuksia, mutta yleisesti hyväksyttyä tapaa siihen ei tällä hetkellä ole.

”Tuulettu yläpohja” -termi viittaa ratkaisuun, missä yläpohjan ilmanvaihtuvuutta voidaan säätää ympäröivistä luonnonoloista riippumatta, eli käytännössä koneellisesti.

### **3.2 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.

Erilaiset sadevuodot voivat muodostaa merkittävän kosteuskuorman yläpohjan rakenteille. Näiden minimointi on ensisijaisen tärkeä rakenteen kosteusteknisen toiminnan edellytys. Yläpohjan kosteuslähteet voidaan luokitella taulukon 2.1 mukaisesti.

Ideaalitalanteessa yläpohjaan ei kohdistu ylimääräisiä kosteuskuormia, jolloin yläpohjan ilmatilan kosteuspitoisuus vastaa ulkoilman kosteuspitoisuutta. Tällöin mitä lämpimämpi tuulettuva yläpohja on ulkoilmaan nähden, sitä alhaisempi on suhteellinen kosteus ja sitä paremmin rakenne toimii kosteusteknisesti.

### **3.3 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 ilmavuotojen mukana, voi ilmanvaihdon kasvattaminen vain kasvattaa ilman virtausta sisäilman ja yläpohjan välillä. Tällöin oikea lähestymistapa olisi ensisijaisesti ilmavuotokohtien etsiminen ja tukkiminen. 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, ilmavuotoja sisätiloista, vesivuotoja uloimman vaipan osan läpi ja lisäksi rakenteet ovat avoinna ulkoilmaan. Tällöin kosteusteknisesti hyvän rakenteen ominaisuuksia ovat hyvä rakennusaikaisen kosteuden kuivumiskyky, ilmatiiviys sisätiloihin, sadeveden pitävyys sekä sieto ulkoilman kosteutta vastaan. Tuulettuvissa kattoristikkoylepohjissa kantavat rakenneosat ovat suojassa sateelta, mutta kosteuksissa ulkoilman kanssa. Tuulettuvan yläpohjan tyyppisen välitilan olosuhteet eivät kuitenkaan ole suoraan ulkoilmaa vastaavat, vaan niihin vaikuttaa sisätiloista tulevien lämpövuotojen lisäksi ulkoilman olosuhteet sekä säteilykomponentit.

Sanders & Haig (2004) viittaavat tutkimukseen (Sanders 1982), jonka perusteella yläpohjan ilmanvaihtuvuus on noin  $n = 2v_w$  1/h, kun molemmilla räystäillä 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. Heikosti tuulettuvan (engl. tight) yläpohjan ilmanvaihtuvuus oli 0–7 1/h suurimman ilmanvaihtuvuuden vastatessa ympäröivän tuulen nopeutta 9 m/s. Paremmiin 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 heikosti tuulettuvan yläpoh-

jan ilmanvaihtuvuus vaihteli välillä 0–4 1/h ja paremmin tuulettuvan välillä 2–15 1/h. Mittaustuloksia on käytetty ilmanvaihtuvuutta kuvaavan mallin kehittämiseen (Walker, Forest & Wilson 2005).

Essah (2009) on tutkinut tuulettuvien kattoristikko-yläpohjien lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa pääasiassa aluskatteen vesihöyrynläpäisevyyden ja yläpohjan ilmanvaihtuvuuden kannalta. Mitatuissa kohteissa yläpohjan ilmanvaihtuvuus vaihteli kohteiden välillä, mutta oli suljetuille yläpohjille välillä 0,5–1,5 1/h. Tuulettuville yläpohjille tutkimuksessa esitetyt ilmanvaihtuvuudet olivat välillä 1–10 1/h. (Essah 2009, luvut 4.1.4 ja 7.2)

Yläpohjien ilmanvaihtuvuutta on käsitelty laskelmissa vapaana muuttujana, jonka suhteen muiden muutosten vaikutusta on tarkasteltu.

### 3.4 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 laskee 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 kattopinna/aluskatteen lämmönvastuksen kasvattaminen pienentää lämpöhäviöitä johtumalla, mutta samalla pienentää hyödynnettävän auringonsäteilyn määrää. Lämpötilojen kannalta 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 sekä tuulettutilan 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 ja pitkäaikaiskestävyyden lisäksi yläpohjan kosteustekniseen toimintaan vaikuttavia ominaisuuksia ovat aluskatteen vesihöyryn- 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 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 ( $s_d = 0,032$  m tai  $s_d = 0,02$  m) kondensoituneen kosteuden määrä oli pienempi kuin bitumialuskatteella ( $s_d = 40$  m), mutta vaikutus oli kuitenkin pienempi kuin yläpohjan ilmanvaihtuvuuden lisäämisellä. Kun sisätiloista oli ilmavuotoja yläpohjaan, niin sekä läpäisevän että tiiviin aluskatteen alapinnassa esiintyi kondenssia 2,2–4,6 kg/m<sup>2</sup> tapauksesta riippuen. Yläpohjan lämmöneristepaksuuden kasvattaminen lisäsi yläpohjaan tiivistyvän kosteuden määrää ja pienensi lämpöhäviöitä yläpohjan läpi. Jollei ilmavuotoja 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, Sasic Kalagasidis & Kjellström (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 koneellisella ohjatulla ilmanvaihdolla. Tuulettuvan yläpohjan homeriskin 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 homeriski 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  $0\text{ °C} \leq T \leq 20\text{ °C}$  ja  $80\% \text{ RH} \leq \phi \leq 100\% \text{ RH}$  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 tarkastelluissa tapauksissa. Edellä mainitun lähteen ulkopuolelta on kuitenkin hyvä ottaa huomioon, että kyseisessä tapauksessa koneelliseen ilmanvaihtojärjestelmään mahdollisesti syntyvä vika voi heikentää yläpohjan kosteusteknistä toimintaa merkittävästi.

## 4. TUTKIMUSMENETELMÄT

### 4.1 Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden kenttämittaukset

FRAME-projektin aikana tehtiin suhteellisen kosteuden ja lämpötilan kenttämittauksia viidestä tuulettuvasta yläpohjasta ja kuudesta ryömintätilaisesta alapohjasta. Tämän opinnäytetyön tekijä osallistui avustajana ostettujen dataloggerien antureiden testaamiseen eri lämpötiloissa ja dataloggerien asennukseen kenttämittauskohteisiin. Näiden lisäksi opinnäytetyön tekijä kävi kohteissa hakemassa dataa mittausten aikana ja laitteet pois mittausten päätyttyä sekä toteutti mittauksiin liittyvät laskennalliset tarkastelut.

Ulkoilman ja rakenteiden olosuhteita mitattiin uusilla Rotronic HygroLog HL-NT3 -dataloggereilla, joissa käytettiin HC2-S-antureita. Valmistajan ilmoittama dataloggerien käyttöalue litiumparistoja käytettäessä on näytöttömälle dataloggerille  $-30 \dots +70$  °C ja näytölliselle  $-10 \dots +60$  °C näytölliselle. Valmistajan ilmoittama antureiden 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 pysyvyydeksi Rotronic ilmoittaa  $< 1$  % RH per vuosi ja  $< 0,1$  °C per vuosi. (HygroClip 2 (HC2) Humidity Temperature Probes User Guide; HygroLog HL-NT Data Logger Instruction Manual) Mittauspisteitä on ollut kussakin rakenteessa ilmatilan ala-, keski- ja yläosassa, reunoilla ilma-aukkojen vieressä sekä mahdollisimman heikosti tuulettuvassa kohdassa.

Rotronic-laitteita 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.

Rakennusten sisäolosuhteita mitattiin Comark Diligence EV N2013 -dataloggereilla,

joille valmistajan ilmoittama lämpötilan mittaustarkkuus on  $\pm 0,5$  °C toiminta-alueella  $-20 \dots +50$  °C (Diligence EV datasheet). Valmistajan ilmoittama tarkkuus suhteelliselle kosteudelle on  $\pm 3$  % RH toiminta-alueella  $0 \dots 97$  % RH ja  $-20 \dots +60$  °C. Dataloggerit on hankittu Rakennustekniikan laitokselle aiemman Kosteusvarma terve pientalo -tutkimushankkeen yhteydessä.

Käyttäjät eivät pysty itse tekemään Comark Diligence EV N2013 -dataloggereiden 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. Aiemmissa tutkimuksissa laitteiden pitkäaikaispysyvyyden on havaittu heikenevän ulkoilman olosuhteissa, mutta säilyvän kuitenkin sisäilman olosuhteissa. Näistä syistä käytettävissä olevista dataloggereista valittiin parhaiten keskiarvoa edustavat, joita käytettiin vain kohteiden sisäilman mittauksiin. Lisäksi jokaisessa kohteessa käytettiin kahta loggeria sisäilman mittauksiin.

Mittauskohteiden lyhyet kuvaukset on esitetty taulukossa 4.1.

**Taulukko 4.1** Perustietoja mittauskohteista. Ilmatilan korkeudella tarkoitetaan suurinta korkeutta.

Mittauskohde	Mittauksen käynnistyminen	Kuvaus
Tampere	15.11.2010	Kaksikerroksinen rakennus, rakennusvuosi 1988; kattotiilet, matala ilmatila, aluskate, 1.5 m korkea harjakattoinen ilmatila, puhallusvilla 200 mm
Valkeakoski	31.1.2011	Yksikerroksinen rakennus, rakennusvuosi 2009; teräskate, matala ilmatila, aluskate, 2.3 m korkea harjakattoinen ilmatila, puhallettu puukuitueriste 500 mm
Vantaa	22.11.2010	Yksikerroksinen rakennus, rakennusvuosi 2001; kattotiilet, matala ilmatila, aluskate, 1,7 m korkea harjakattoinen ilmatila, puhallusvilla 300 mm
Espoo 1	22.11.2010	Yksikerroksinen rakennus, rakennusvuosi 2010; kattotiilet, matala ilmatila, aluskate, <3 m korkea pulpettikattoinen ilmatila, puhallusvilla 400/600 mm (eri alueet)
Espoo 2	22.11.2010	Puolitoistakerroksinen rakennus, rakennusvuosi 2010; bitumikermikate, ponttilaudoitus <1 m korkea pulpettikattoinen ilmatila, puhallusvilla 400...600 mm (epätasainen eristekerros)

Kohteiden mallinnusta varten hankittiin ulkoilman 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 auringon säteily 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 testattiin Rakennustekniikan laitoksen kosteushuoneissa ja niiden arvoja verrattiin referenssianturiin. Tarkistus tehtiin kahdessa eri olosuhteessa, huonelämpötilassa ja 33 % RH sekä 75 % RH suhteellisessa kosteudessa. Koonti antureiden tarkastuksesta on esitetty seuraavassa taulukossa.

**Taulukko 4.2** Kenttämittausloggereiden jälkitarkastuksen tuloksia. Tarkistettujen antureiden mittaustuloksen erotuksen (loggeri-kosteush.) keskiarvo ja keskihajonta kosteushuoneen referenssianturiin verrattuna.

	Lämpötila		Suhteellinen kosteus	
	$\Delta T = T_{logg.} - T_{kosteush.}$		$\Delta \phi = \phi_{logg.} - \phi_{kosteush.}$	
Suhteellinen kosteus kosteushuoneessa	35 %	75 %	35 %	75 %
Kaikkien antureiden erotuksien keskiarvo	0,2	-0,3	1,5	1,1
Kaikkien antureiden erotuksien keskihajonta	0,3	0,2	0,8	1,0

Taulukossa 4.2 esitetyt mittausvirhettä kuvaavat arvot on tulkittu nykyisen mitaustarkkuuden puitteissa kohtalaisen pieniksi. Toisaalta homeindeksin laskenta on myös herkkä pienille lämpötilaeron ja suhteellisen kosteuden eroille ulkoilman olosuhteisiin verrattuna (Laukkarinen, Huttunen & Vinha 2014). Näin ollen laitteiden on tulkittu toimineen siten kuin on oletettu, mutta pienten virhelähteiden vaikutuksia laskentatuloksiin ja tulosten tulkintaan tulisi selvittää tulevissa hankkeissa tarkemmin.

## 4.2 Mittaustulosten ja laskennan vertaileminen

### 4.2.1 Yleistä mittaus- ja laskentatulosten vertailemisesta

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

Lähtökohtaisesti kosteustekninen ongelma vaatii sekä lämmön, kosteuden, että ilman käyttäytymisen huomioon ottamisen. Tämän lisäksi ilmastosuureiden syklinen vaihtelu ja materiaalien epälineaariset kosteustekniset ominaisuudet vaativat huomattavan määrän lähtötietoja laskentamalliin. Hyvin valittu analyttinen ratkaisu voi antaa paljon tietoa tarkasteltavasta tapauksesta, mutta muuttujien lukumäärän kasvaessa ja aikaresoluution pientyessä ainoaksi vaihtoehdoksi jäävät numeeriset ratkaisut eli laskentaohjelmien käyttäminen.

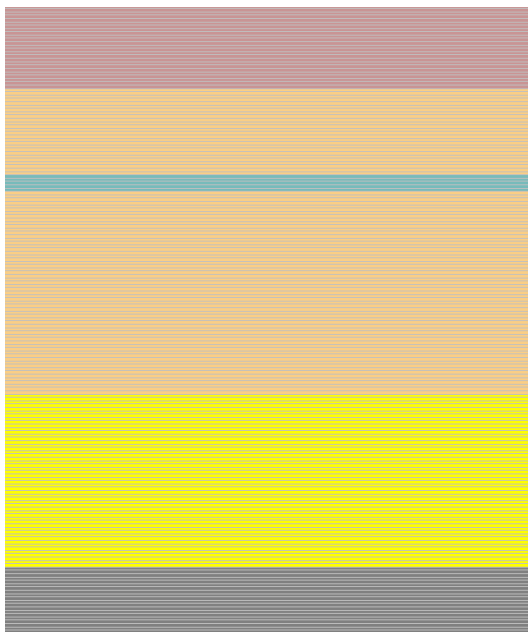
Eri rakennusfysikaalisilla laskentaohjelmilla on omat vahvuutensa ja heikkoutensa ja näiden ymmärtäminen on osa laskentaohjelmien verifiointiprosessia. Myös toimivaa ohjelmaa tulee osata käyttää ja ohjelmasta saatavia tuloksia tulee osata tulkita oikein. Eri ihmiset saattavat tulkita samat tulokset eri 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 tapauksessa 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.

Laskentamallien toimivuutta arvioitaessa tulee pitää mielessä, että ainoastaan matemaattisten toimenpiteiden oikeellisuus voidaan vahvistaa todeksi, koska näissä kaikki tarpeelliset laskennan ehdot tunnetaan. Todellisia fysikaalisia ilmiöitä mallinnettaessa voidaan kuitenkin ainoastaan kumota jonkin valitun mallin käyttö, mutta tarkalleen ottaen ei koskaan vahvistaa niitä oikeiksi. Tämä on jossain määrin analoginen asia hypoteesien testaamisen kanssa, missä tarkastellaan todistusaineiston uskottavuutta sen suhteen, että perustapausta kuvaava nollahypoteesi pystyttäisiin kumoamaan. Todistusaineiston puuttuminen ei tarkoita ilmiön puuttumista.

## 4.2.2 Kenttämittausten mallintaminen

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



*Kuva 4.1 Tuulettuvan yläpohjan laskentamalli (ei mittakaavassa). Kerrokset ylhäältä alas päin: 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 materiaalikokeissa (Vinha, Valovirta, Korpi, Mikkilä & Käkelä 2005) mineraalivillan vesihöyrynläpäisevyys pysyi samana suhteellisen kosteuden kasvaessa, kun taas puukuitueristeen vesihöyrynläpäisevyys kasvoi 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 vesihöyrynvastus on riittänyt kuvaamaan rakenteen toiminnan ja numeerisen ratkaisun helpottamiseksi ei ole tarvinnut ottaa huomioon höyrynsulun kosteuskapasiteettia. Puukuitueristeen kanssa höyrynsulku on ollut sekä vesihöyry- että vesitiivis.

Edellä mainitussa menetelmässä kosteusvirtojen jakamiseksi eri faaseihin (Scheffler 2008) kuppikokeessa kappaleen läpi kulkeva nestemäisen veden virtaus lasketaan ensin kokonaiskosteusvirran ja kuivimman tilanteen kosteusvirran erotuksena. Diffuusiovirran oletetaan pienenevän nollaan täysin kastuneessa materiaalissa. Jäljelle

jääneen kosteusvirran ja mittausolosuhteiden perusteella lasketaan materiaalin kosteudenjohtavuus kalibroimalla kyseinen materiaalfunktio kuppikoetta simuloimalla. Tämä prosessi on kuvattu lähteessä (Laukkarinen & Vinha 2011).

### 4.3 Rakenteiden kosteustekninen toiminta mitoittavissa olosuhteissa

Rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmä (Vinha 2007, Vinha et al. 2013, Vinha 2014) tarkoittaa lähtötietojen, toimintatapojen ja asetettujen raja-arvojen kokoelmaa, jonka avulla voidaan määrittää tarkasteltavan rakennerratkaisun lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan hyväksyttävyyys. Kokonaisuus on jaettu kuuteen osaan, jotka ovat ulkoilman olosuhteet, sisäilman olosuhteet, laskentaohjelma, materiaaliominaisuudet, toimintakriteerit ja tarkastelujen tekemisen periaatteet. Tiivistetysti ajatuksena on tarkastella laskennallisesti rakenteen lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa mitoittavissa sisä- ja ulkoilman olosuhteissa, minkä jälkeen laskennan tuloksia arvioidaan vaurioitumiskriteerejä kuvaavien laskentamallien ja näille kriteereille asetettavien raja-arvojen perusteella.

Kaikki rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan vertailut tehtiin rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmän mukaisesti, joka on kuvattu edellä mainituissa lähteissä ja erityisesti lähteessä Vinha et al. (2013, luku 4). Ulkoilman olosuhteina käytettiin rakennusfysikaalisen testivuoden Jokioinen 2004 (liite 1) ja sitä vastaavien tulevaisuuden ilmaston testivuosien mukaisia ulkoilman olosuhteita. Lisää tietoa testivuosista sekä niiden säähavaintoaineisto löytyvät internet-osoitteista: [www.tut.fi/rakennusfysiikka](http://www.tut.fi/rakennusfysiikka) ja [www.fmi.fi](http://www.fmi.fi).

Käytettävissä olleet säädattiedostot eivät sisältäneet ilmakehästä alaspäin suuntautuvaa pitkäaaltoista säteilyä, mistä syystä tämä käsiteltiin yksinkertaistetusti seuraavien ehtojen avulla:

- 1) Jos sataa, niin taivaan tehollinen lämpötila vastaa ulkoilman lämpötilaa
- 2) jos on diffuusiasäteilyä, mutta ei suoraa säteilyä, niin taivaan tehollinen lämpötila vastaa ulkoilman lämpötilaa ja
- 3) muutoin taivaan tehollinen lämpötila on viisi astetta ilman lämpötilaa viileämpi.

Nämä ehdot eivät ota huomioon kaikkia olosuhdeyhdistelmiä (kuten pilvistä yötä), mistä aiheutuu virhettä laskettuun taivaan tehollisen lämpötilan arvoon.



Kaikki yläpohjat on auringonsäteilyn osalta käsitelty tasakattorakenteina, jolloin suoran ja diffuusin säteilyn komponentit vastasivat vaakapinnalle tulevia säteilytehoja.

Sisäilman lämpötila oli vakio 21 °C. Sisäilman kosteuslisä oli 5 g/m<sup>3</sup>, kun ulkoilman lämpötila oli alle 5 °C ja 2 g/m<sup>3</sup>, kun ulkoilman lämpötila oli yli 15 °C. Väliarvot laskettiin lineaarisella interpolaatiolla. Nämä vastaavat tavanomaisille asuinrakennuksille määritettyjä sisäilman kosteuslisän mitoitusarvoja (RIL 107 2012).

Laskentaohjelmana käytettiin yhdistettyä lämpö- ja kosteusteknistä laskentaohjelmaa Delphin 5.7.3, jonka tuloksia arvioitiin kenttämittausten tulosten avulla. Laskentaohjelmassa käytettiin mahdollisuuksien mukaan suomalaisista materiaaleista määritettyjä materiaaliominaisuuksia (Laukkarinen & Vinha 2011), mutta näitä täydennettiin tarvittavilta osin ohjelman oman materiaalikirjaston tiedoilla. Käytetyt materiaaliominaisuudet on esitetty lähteessä (Vinha et al. 2013, liite 2) sekä tämän työn liitteessä 2.

Tarkastellusta yläpohjasta tutkittiin yläpohjalle tulevan auringonsäteilyn vaikutusta, yläpohjan lämmöneristyksen määrän ja tyyppin, rakenteen sisäpinnan vesihöyrynvastuksen, aluskatteen vesihöyrynvastuksen ja lämmönvastuksen, kalvomaisen aluskatteen emissiviteetin sekä yläpohjan ilmanvaihtuvuuden vaikutusta yläpohjan kosteustekniseen toimintaan nyky- ja tulevaisuuden ilmastoissa.



## 5. TULOKSET

### 5.1 Kenttämittauskohteiden mittaus- ja mallinnustulokset

Kuvassa 5.1 on esitetty mittaus- ja laskentatulosten vertailua Espoossa sijaitsevasta mittauskohteesta. Yläkuvissa on yläpohjan ilmatilan yläosasta mitattu ja laskettu suhteellinen kosteus ja lämpötila. Niiden alla on edellisten erotus. Alimpina kuvajina ovat lämpötilan ja suhteellisen kosteuden kertymäfunctiot sekä mitatuista ja lasketuista olosuhteista lasketut homeindeksit.

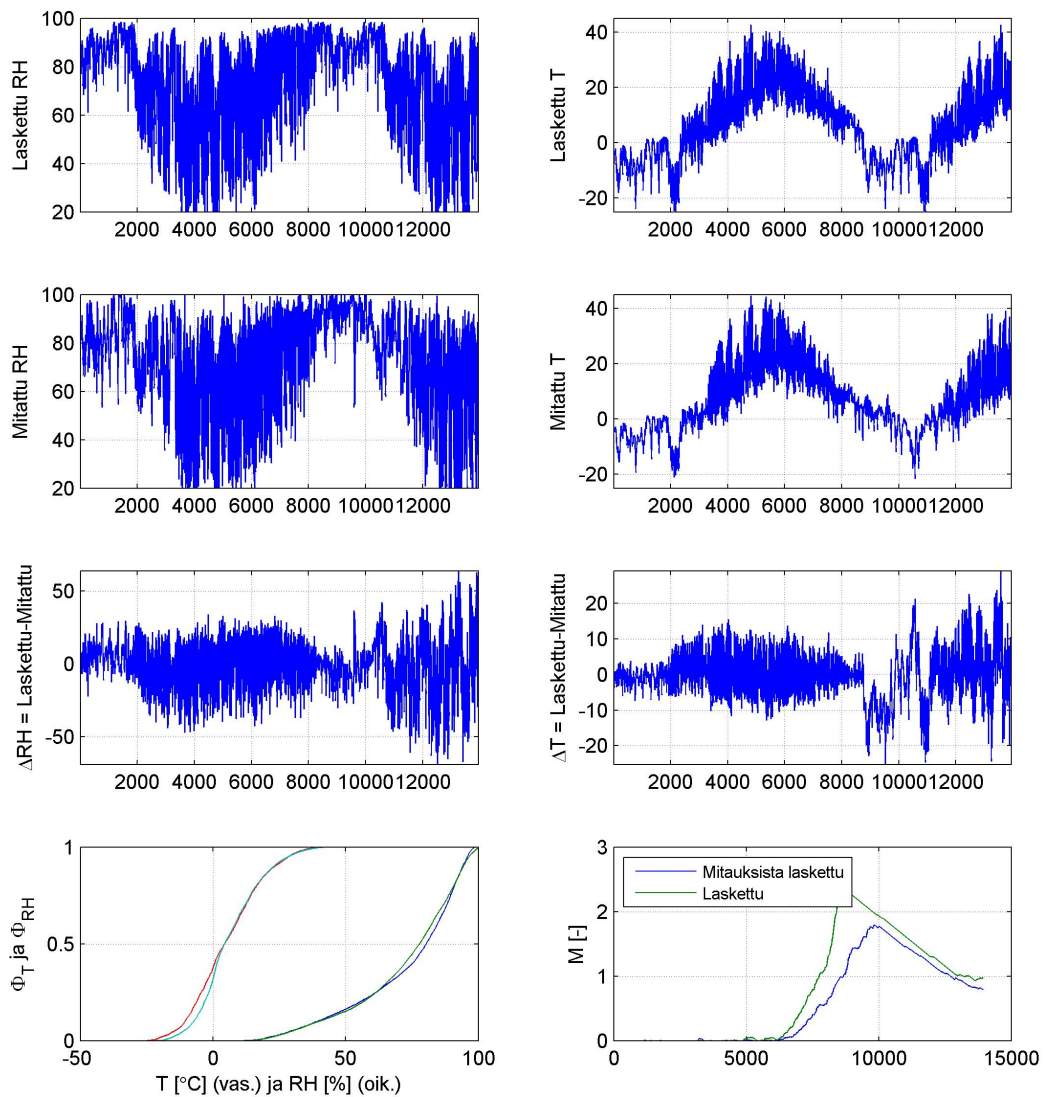
Kuvan 5.1 tapauksessa lasketut olosuhteet vastaavat keskimääräisesti mitattuja arvoja, mutta hetkellisissä arvoissa on suurta vaihtelua. Syitä tähän ovat muun muassa kesäaikana esiintyvät suuret lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vaihtelut, joita laskenta ei pysty tavoittamaan. Olosuhteiden vaihtelun ollessa talvella kesää vähäisempää, ovat myös erot laskennan ja mittausten välillä pienempiä.

Kuvassa 5.2 on esitetty saman yläpohjan mitatuista lämpötila- ja kosteusolosuhteista laskettu homeindeksi sekä lasketuista olosuhteista laskettu yläpohjan homeindeksi eri ilmanvaihtuvuuksilla.

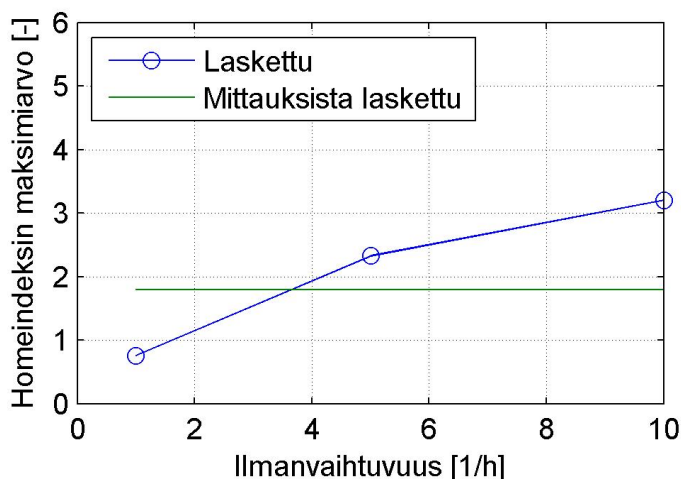
Kuvan 5.2 perusteella näyttäisi siltä, että yläpohjan ilmanvaihtuvuutta muuttamalla olisi mahdollista saada laskentatulokset vastaamaan mitattuja olosuhteita homeindeksin maksimiarvon kannalta tarkasteltuna. Käytännössä ilmanvaihtuvuus kuitenkin vaihtelee jatkuvasti, eikä tarkkaa arvoa tiedetä, minkä lisäksi ilmanvaihtuvuutta muuttamalla saatetaan kompensoida muualla laskennassa olevia puutteita. Näistä syistä johtuen kuvan 5.2 tulee nähdä enemmänkin suuntaa antavina tuloksina, kuin tarkkoina vastauksina.

Kuvassa 5.3 on esitetty lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vertailu toisessa kenttämittauskohteessa. Tulokset on esitetty 24 tunnin keskiarvoina luettavuuden helpottamiseksi.

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 au-



**Kuva 5.1** Mitattujen ja laskettujen olosuhteiden vertailua tuulettuvassa yläpohjassa. Mitauuskohde sijaitsee Espoossa. Yläpohjan ilmanvaihtuvuutena on käytetty arvoa 5 l/h. Olosuhteet kuvaajissa ovat aikavälillä 22.11.2010 00:00 . . . 24.6.2012 23:00. Yläkuvissa on yläpohjan ilmatilan yläosasta mitattu ja laskettu suhteellinen kosteus ja lämpötilä. Niiden alla on edellisten erotus. Alimpina kuvaajina ovat lämpötilan ja suhteellisen kosteuden kertymäfunktiot sekä mitatuista ja lasketuista olosuhteista lasketut homeindeksit.



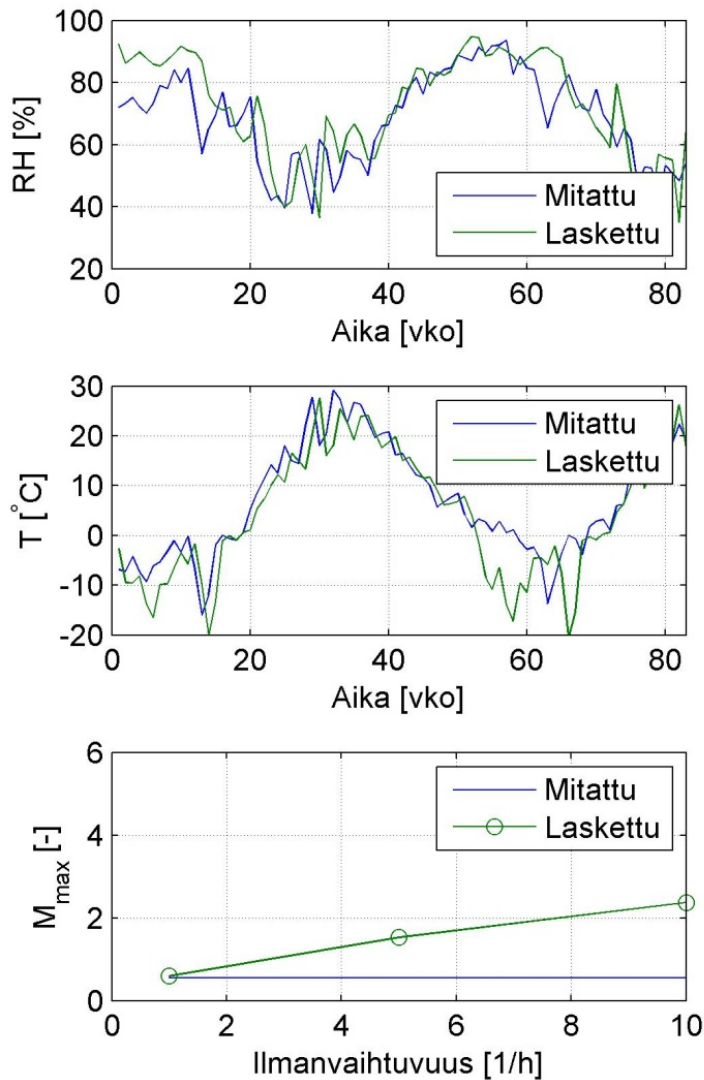
**Kuva 5.2** Tuulettuvan yläpohjan homeindeksin vertailu kenttämittauksien perusteella laskettuun homeindeksiin (vrt. kuva 5.1).

ringonsäteilyn epätasainen jakautuminen katon lappeiden välillä.

Rakenteiden ilmanvaihtuvuus on ollut 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. Laskelmat tehtiin eri ilmanvaihtuvuuden arvoilla, joista kuvaajan 5.1 mukaiselle tapaukselle ilmanvaihtuvuus 4 1/h tuotti parhaan vastaavuuden mitatuista ja simuloiduista olosuhteista laskettujen homeindeksin maksimi-arvojen välille.

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 kertymäfunktioit ovat kuvaajien perusteella lähellä 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 Kirchoffin potentiaalin avulla (Arfvidsson 1998).

Mittaus- ja laskentatulosten välille syntyi vaihe-eroa kenttämittausloggerien sisäisen kellon edistäessä/jätättäessä todelliseen kellonaikaan nähden. Jos sekä mittaus- että laskentatulokset olisivat muodoltaan sinikäyriä, niin ajanhetkellä nolla vaihe-erosta

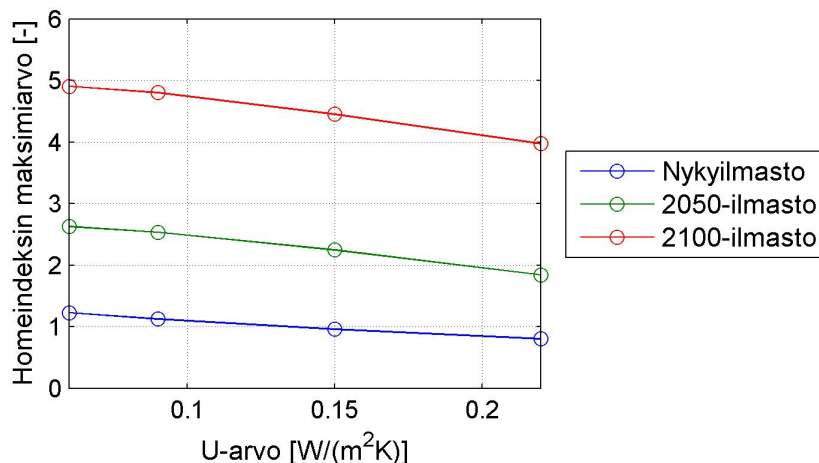


**Kuva 5.3** Mitattujen ja laskettujen olosuhteiden vertailua tuulettuvassa yläpohjassa. Laskennassa on käytetty yläpohjan ilmanvaihtuvuuksia 1, 5 ja 10 1/h, joista kuvissa on esitetty ilmanvaihtuvuudella 1 1/h saadut tulokset. Tulokset on esitetty olosuhteiden viikkokeskiarvoina.

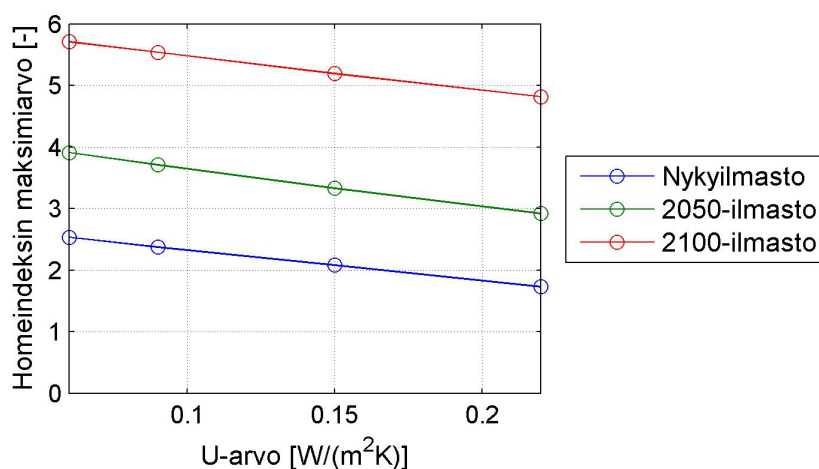
johtuvan virheen voisi kirjoittaa muodossa:  $\Delta x = A \sin(2\pi\Delta t/t_{per})$ , jossa  $\Delta x$  on tarkasteltava suure,  $A$  suureen amplitudi,  $\Delta t$  funktioiden vaihe-ero ja  $t_{per}$  jaksonpituus. Yhden tunnin vaihe-erolla funktioiden arvojen erotus on noin  $\Delta x = 0,26 A$ . Kenttämittausloggereiden kellon edistämistä tai jättämistä ei valitettavasti kirjattu ylös dataa kerätessä, mutta ero oli enimmillään noin 15–30 minuuttia.

## 5.2 Rakenteiden toimivuus mitoittavissa olosuhteissa

Kuvaajissa 5.4 ja 5.5 on esitetty tuulettuvan kattoristikkoyläpohjan päälämmöneristeen U-arvon vaikutus ilmatilan yläosan homeindeksin maksimiin. Kuvaajissa 5.4 esitetyn rakenteen lämmöneristeen kosteudensitomiskyky on suurempi kuin kuvaajan 5.5 mukaisen rakenteen.



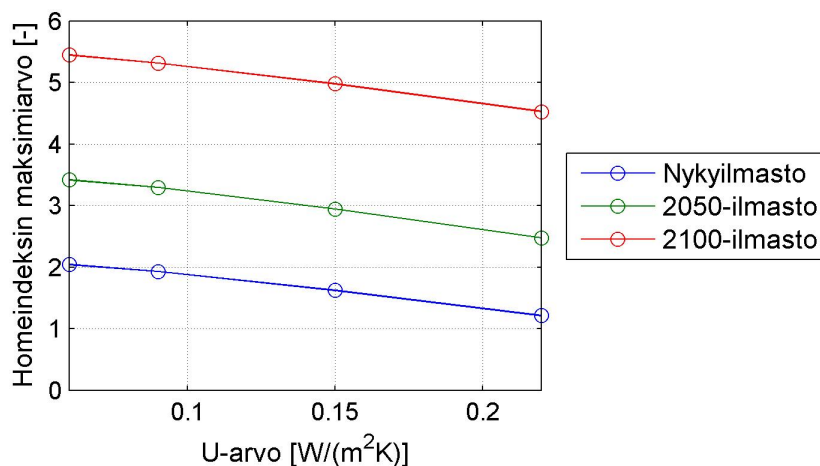
**Kuva 5.4** Homeindeksin maksimi tuulettuvan yläpohjan yläosassa eri lämmöneristeen U-arvoilla. Ilmanvaihtuvuus 5 1/h, puukuitueriste 60 kg/m³.



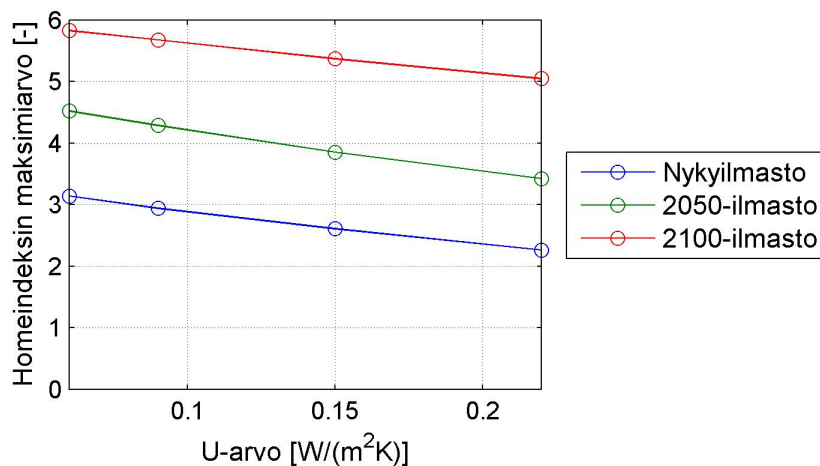
**Kuva 5.5** Homeindeksin maksimi tuulettuvan yläpohjan yläosassa. Mineraalivillakeristeen tiheys 30 kg/m³, ilmanvaihtuvuus 5 1/h.

Homeindeksien maksimiin kasvavat yläpohjan U-arvoa pienennettäessä. Kuvaajien perusteella ilmastonmuutos vaikuttaa kattoristikkoyläpohjien homeutumisiin enemmän kuin tarkasteltu U-arvon kiristäminen (0,22 W/(m²K) → 0,06 W/(m²K)).

Kuvaajissa 5.6 ja 5.7 on esitetty yläpohjan U-arvon vaikutus ilmatilan yläosan homeindeksiin kahdella eri lämmöneristetyypillä ilman suoraa auringonsäteilyä (pohjoisen puoleinen tai muuten varjossa oleva katto).



**Kuva 5.6** Yläpohjan lämmöneristeen  $U$ -arvon vaikutus yläpohjan ilmatilan yläosan olosuhteisiin. Homeindeksi laskettu homehtumisherkkyyssluokalle HHL1. Ilmanvaihtuvuus 5 1/h, ei suoraa auringonsäteilyä, puukuitulämmöneriste  $60 \text{ kg/m}^3$ .



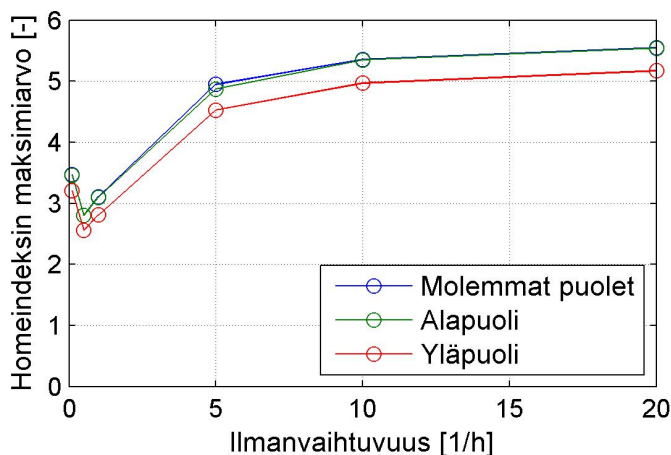
**Kuva 5.7** Yläpohjan lämmöneristeen  $U$ -arvon vaikutus yläpohjan ilmatilan yläosan olosuhteisiin. Homeindeksi laskettu homehtumisherkkyyssluokalle HHL1. Ilmanvaihtuvuus 5 1/h, ei suoraa auringonsäteilyä, mineraalivillalämmöneriste  $30 \text{ kg/m}^3$ .

Suoran auringonsäteilyn puuttuminen kasvattaa yläpohjan homehtumisriskiä hieman.

Kuvassa 5.8 on tarkasteltu kalvomaisen aluskatteen matalaemissiviteettipinnan ( $\varepsilon = 0,02$ ) vaikutusta yläpohjan olosuhteisiin. Joko aluskatteen molempien pintojen emissiviteetti on pieni tai ainoastaan ala- tai yläpinnan.

Kuvaajan 5.8 perusteella matamaemissiviteettipintainen aluskate ei pienennä yläpohjan homehtumisriskiä, vaan saattaa jopa hieman kasvattaa sitä. Todennäköinen syy tälle on, että aluskatteen alapinnan emissiviteetin pienentäminen laskee lämpötilaa aluskatteen tuntumassa, jolloin ilman kosteuspitoisuuden pysyessä samana

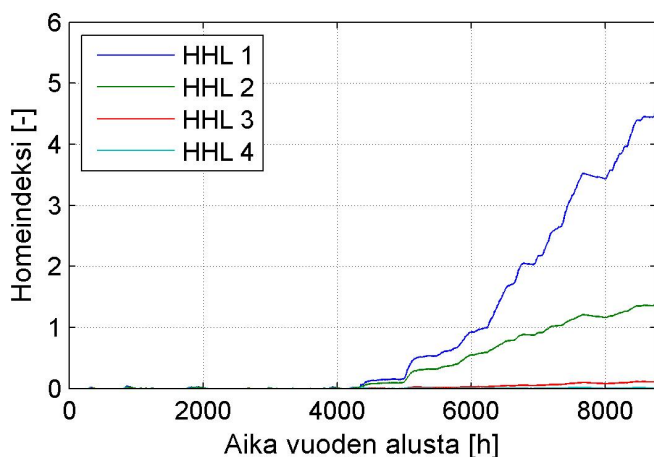




**Kuva 5.8** Aluskatteen matalaemissiivipinnan vaikutus yläpohjan yläosan olosuhteisiin. Mineraalivilla  $30 \text{ kg/m}^3$ . Ei suoraa auringon säteilyä. Jokioinen 2050,  $U$ -arvo  $0,06 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ . Vertailurakenne ( $\varepsilon=0,9$ ) tuotti samat arvot kuin yläpinnastaan matalaemissiivinen aluskate.

suhteellinen kosteus nousee. Aluskatteen yläpuolista tuuletusväliä vasten olevalla matalaemissiviteettipinnalla ei todennäköisesti ole suurta vaikutusta siitä syystä, että lämpötilaero aluskatteen yläpinnan ja katteen alapinnan välillä on jo valmiiksi pieni.

Kuvassa 5.9 on esitetty yläpohjan homeindeksi yhden vuoden ajalle mineraalivillae-ristetyssä tuulettuvassa yläpohjassa käyttäen eri homehtumisherkkyyssluokkia (varjossa oleva katto). Kuvan laskelmat on tehty samoille yläpohjan olosuhteiden  $T/RH$ -tuloksille, vaihtamalla vain homehtumisherkkyyssluokkaa.

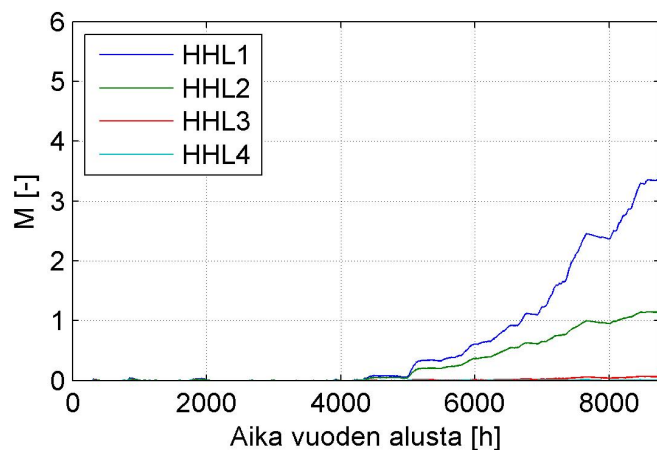


**Kuva 5.9** Homeindeksi tuulettuvan yläpohjan yläosassa eri homehtumisherkkyyssluokille laskettuna.  $U = 0,06 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ,  $n = 5 \text{ 1/h}$ , Jokioinen 2050.

Kuvaajan 5.9 perusteella materiaalien homehtumisherkkyyssluokalla on erittäin suuri vaikutus rakenteen homehtumisriskiin. Kestävälle luokalle laskettu homeindeksi

pysyy erittäin lähellä nollaa.

Kuvaajassa 5.10 on esitetty tuulettuvan yläpohjan homeindeksin kehittyminen eri homeutumisherkkyyssluokissa puukuitueristetyssä yläpohjassa (varjossa oleva katto).



**Kuva 5.10** Homeindeksi tuulettuvan yläpohjan yläosassa eri homeutumisherkkyyssluokissa.  $U = 0,06 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ,  $n = 5 \text{ 1/h}$ , Jokioinen 2050.

Vertaamalla tuloksia kuvan 5.9 mukaiseen tilanteeseen, yläpohjan lämmöneristeen hygroskooppisen kosteuskapasiteetin kasvattamisella näyttäisi olevan saavutettavissa hieman etua vähemmän hygroskooppisen lämmöneristeen käyttöön verrattuna.

Taulukoissa 5.1 ja 5.2 on esitetty rakenteen toimintaa 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 aurinkoisella (taulukko 5.1) että varjoisalla (taulukko 5.2) paikalla olevalle rakennukselle. Kaikissa tarkastelluissa tapauksissa rakenteen sisäpinnassa on höyrynsulkumuovi. Homeindeksin  $M=1$  alittavat tapaukset on merkitty taulukoihin erikseen (\*)-merkillä.

Taulukoiden tulokset on määritetty eri tapauksille lasketuista aika-homeindeksi-kuvaajista.

Taulukon 5.1 perusteella nykyilmastossa suositeltava yläpohjan ratkaisu sisältää maltillisen ilmanvaihtuvuuden ( $n \leq 2-3 \text{ 1/h}$ ) sekä vesihöyryn liikettä jonkin verran vastustavan aluskatteen ( $s_d \geq 0,2 \text{ m}$ ). Näiden voidaan tulkita liittyvän siihen, että yläpohjan pääasiallinen kosteuslähde olisi ulkoilma.

Jos taulukoiden 5.1 ja 5.2 läpäisevä aluskate  $s_d = 0,02 \text{ m}$  on parempi vaihtoehto, tällöin myös sitä vesihöyryä avoimemmat kalvot käyvät. Laskentamallissa ei ole käytössä erikseen pinnan kosteudensiirtokertoimia, mutta ne on mahdollista ottaa

**Taulukko 5.1** Suositeltavat yhdistelmät aluskatteen vesihöyrynvastuksen ja yläpohjan ilmanvaihtuvuudelle. (\*)-merkillä on merkitty  $M < 1$  -ratkaisut. Aurinkoisella paikalla oleva rakennus.

Yläpohjan lämmöneristeen U-arvo	Mineraalivilla (levyvillä 30 kg/m <sup>3</sup> )		Puukuitueriste (puhalluseriste 60 kg/m <sup>3</sup> )	
	U=0,06 W/(m <sup>2</sup> K)	U=0,22 W/(m <sup>2</sup> K)	U=0,06 W/(m <sup>2</sup> K)	U=0,22 W/(m <sup>2</sup> 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 $n \leq 2,$ $s_d \geq 0,2 m^{(*)}$	$n \leq 4,$ $s_d \geq 0,2 m$ tai $n > 4,$ $s_d = 0,02 m$ tai $n \leq 2,$ $s_d \geq 0,2 m^{(*)}$
2100-ilmasto	$n = 0,5 - 1,0,$ $s_d \geq 0,2 m$	$n = 0,5 - 1,0,$ $s_d \geq 0,2 m$	$n \leq 5,$ $s_d \geq 0,2 m$ tai $n > 5,$ $s_d = 0,02 m$ tai $n \leq 0,5,$ $s_d \geq 1,0 m^{(*)}$	$n = 0,5 - 1,0,$ $s_d \geq 0,2 m$

huomioon myös jälkikäteen ( $Z_{mat} = Z_{tot} - Z_{si} - Z_{se}$ ).

Taulukoiden 5.1 ja 5.2 perusteella tulevaisuuden ilmastossa ne yläpohjaratkaisut pärjäävät paremmin, joissa on pienempi ilmanvaihtuvuus ja suurempi kalvomaisen aluskatteen vesihöyrynvastus. Olosuhteet mineraalivillaeristetyssä yläpohjassa ovat kriittisemmät kuin suuren tiheään puhalletun (tiheys 60 kg/m<sup>3</sup>) puukuitueristeen.

Kuvaajassa 5.11 on esitetty yläpohjan homeindeksi erilaisilla lämmöneristemateriaali-, aluskatemateriaali-, ilmanvaihtuvuus- ja aluskatteen lämmönvastusyhdistelmillä. Olosuhteet on laskettu Jokioisten 2050 -ilmastossa varjossa olevalle katolle. Lämpöä eristäviä aluskatteita ei ole tällä hetkellä yleisesti markkinoilla. Tästä syystä aluskatemateriaaleina laskennassa on käytetty tuulensuojamineraalivillaa ja solumuovia, joiden on ajateltu edustavan ominaisuuksiltaan erilaisia lämpöä eristäviä aluskatemateriaaleja.

Kuvan 5.11 perusteella aluskatteen lämmönvastuksen kasvattaminen laskee yläpohjan homeindeksiä jokaisessa tilanteessa. Puukuitueristeisessä yläpohjassa homein-

**Taulukko 5.2** Suositeltavat yhdistelmät aluskatteen vesihöyrynvastukselle ja yläpohjan ilmanvaihtuvuudelle. (\*)-merkillä on merkitty  $M < 1$  -ratkaisut. Varjossa oleva katto.

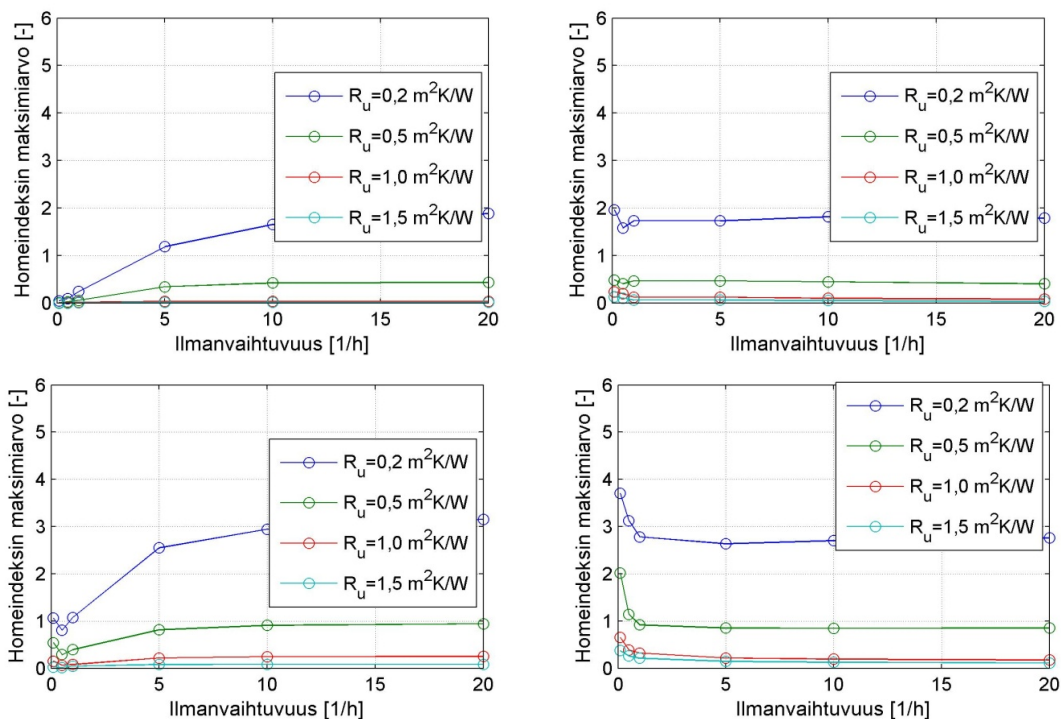
Yläpohjan lämmöneristeen U-arvo	Mineraalivilla (levyvillä 30 kg/m <sup>3</sup> )		Puukuitueriste (puhalluseriste 60 kg/m <sup>3</sup> )	
	U=0,06 W/(m <sup>2</sup> K)	U=0,22 W/(m <sup>2</sup> K)	U=0,06 W/(m <sup>2</sup> K)	U=0,22 W/(m <sup>2</sup> K)
Nykyilmasto	$n \leq 3,$ $s_d \geq 1 m$ tai $n > 3$ $s_d = 0,02 m$	$n \leq 3,$ $s_d \geq 0,2 m$ 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 $n > 3,$ $s_d = 0,02 m$	$n \leq 4,$ $s_d \geq 1 m$ 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	$n = 0,5 - 1,0,$ $s_d \geq 1,0 m$	$n = 0,5 - 1,0,$ $s_d \geq 1,0 m$	$n \leq 10,$ $s_d \geq 1,0 m$ tai $n > 10,$ $s_d = 0,02 m$ tai $n \leq 1,$ $s_d \geq 1,0 m (*)$	$n = 0,5 - 1,0,$ $s_d \geq 1,0 m$

deksien maksimi-arvot ovat hieman alhaisempia kuin mineraalivillaeristetyssä yläpohjassa. Solumuovialuskatetta käytettäessä homeindeksin maksimi-arvot ovat pienillä ilmanvaihtuvuuksilla ( $n < 5$  1/h) alhaisempia kuin mineraalivilla-aluskatetta käytettäessä.

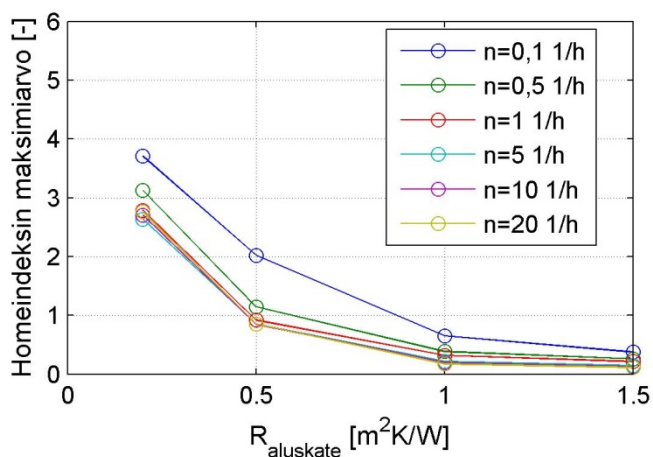
Kuvassa 5.12 on esitetty yläpohjan homeindeksin maksimi-arvon muuttuminen aluskatteen lämmönvastuksen funktiona, kun yläpohjan päälämmöneristemateriaalina on mineraalivilla ja aluskatteena on mineraalivillalevy.

Kuvan 5.11 perusteella mineraalivillaeriste ja mineraalivilla-aluskate -yhdistelmä muodostavat tarkastelluista tapauksista kriittisimmän yhdistelmän. Kuvan 5.12 perusteella aluskatteen lämmönvastus 1 m<sup>2</sup>K/W riittää laskemaan yläpohjan homeindeksin maksimi-arvon tässä tapauksessa alle ykkösen (ei homeenkasvua).

Taulukossa 5.3 on esitetty vaadittava aluskatteen lämmönvastus varjossa olevalle yläpohjalle, jotta homeindeksin maksimi-arvo olisi alle ykkösen.



**Kuva 5.11** Yläpohjan yläosan homeindeksi eri materiaalivalinnoilla ja yläpohjan ilmanvaihtuvuuksilla. Jokioinen 2050, varjossa oleva katto,  $U = 0,06 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K})$ . Ylärivillä päälämmöneristeenä puukuitueriste ja alarivillä mineraalivilla. Vasemmalla solumuovialuskate (EPS) ja oikealla mineraalivilla-aluskate.



**Kuva 5.12** Aluskatteen lämmönvastuksen vaikutus yläpohjan homeindeksiin. Lämmöneristeenä mineraalivilla, aluskatteena mineraalivillatuulensuojalevy, varjossa oleva katto. Laskennassa käytetty rakennusfysikaalista testivuotta Jokioinen 2050.

Lämmönvastus on ilmoitettu kahden desimaalin tarkkuudella, koska tällöin mittamuutokset tuotteissa pyöristyksestä johtuen ovat yhden millimetrin suuruusluokkaa (esim.  $0,01 \text{ m}^2\text{K}/\text{W} \cdot 0,1 \text{ W}/(\text{mK}) = 1 \text{ mm}$ ). Annettu tarkkuus ei kuitenkaan välttämättä kuvaa laskennan todellista tarkkuutta.

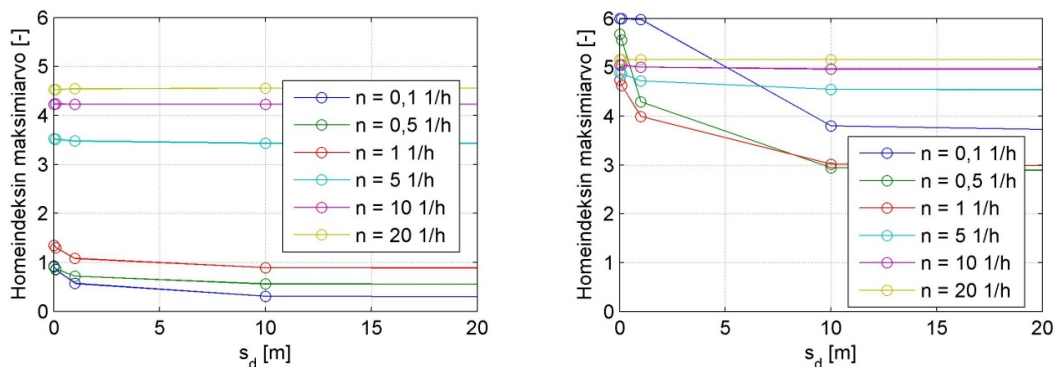
**Taulukko 5.3** Vaadittava aluskatteen lämmönvastus homeindeksin  $M = 1$  alittamiseksi Jokioisten ilmastossa. Yläpohjan päälämmöneristeen  $U$ -arvo on  $0,06 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , varjossa oleva katto. PLEM = päälämmöneristemateriaali, EPS = paisutettu polystyreeni, MV = mineraalivilla, PK = puukuitueriste (suojakäsitelty)

HHL	PLEM	Aluskate- materiaali	Nykyilmasto	Jokioinen 2050	Jokioinen 2100
1	PK	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, $n = 0,1 \text{ 1/h}$
	MV	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 / 0,88, $n \geq 0,5 \text{ 1/h}$ tai 1,37, $n = 0,1 \text{ 1/h}$
2	PK	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, $n = 0,1 \text{ 1/h}$
	MV	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, $n = 0,1 \text{ 1/h}$

Taulukon 5.3 perusteella aluskatteen lämmönvastus  $0,4 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$  riittää suurelta osin nykyilmastossa laskemaan yläpohjan homeindeksin alle ykkösen ( $M < 1$ ) sekä mineraalivilla- että puukuitueristetyssä yläpohjassa. Tulevaisuuden ilmastossa (Jokioinen 2100) aluskatteelta vaadittava lämmönvastus on enintään noin alle  $1 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ . Aluskatteelta vaadittavaan lämmönvastukseen vaikuttavat myös kaikki aikaisemmin esillä olleet asiat (auringonsäteilyn määrä, päälämmöneristemateriaali, aluskatteen materiaali, jne.).

Kuvassa 5.13 on tarkasteltu rakenteen sisäpinnan vesihöyrynvastuksen vaikutusta yläpohjan ilmatilan yläosan olosuhteisiin. Varjossa olevan katon kalvomaisen aluskatteen vesihöyrynvastus on  $s_d = 0,2 \text{ m}$  ( $Z_\nu = 8 \cdot 10^3 \text{ m/s} \leftrightarrow Z_p = 1 \cdot 10^9 \text{ m}^2\text{sPa/kg}$ ).

Kuvan 5.13 tapauksissa puukuitueristetyssä yläpohjassa rakenteen sisäpinnan vesihöyrynvastuksella oli vain pieni merkitys homeindeksin maksimiarvoon. Sisäpinnan erillisellä vesihöyrynvastuksella oli selvästi suurempi vaikutus mineraalivillaeristetyssä yläpohjassa nimenomaan silloin, kun yläpohjan ilmanvaihtuvuus oli pieni ( $n \leq 1 \text{ 1/h}$ ). Olosuhteiden muutoksia voidaan osittain selittää sillä, että laskennassa käytetyllä puukuitueristekerroksella on ollut itsessään mineraalivillalämmöneristeker-



**Kuva 5.13** Rakenteen sisäpinnan vesihöyrynvastuksen vaikutus ilmatilan yläosan olosuhteisiin. Jokioinen 2050,  $U = 0,06 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K})$ , varjossa oleva katto. Vasemmalla puukuitueristetty yläpohja ja oikealla mineraalivillaeristetty yläpohja. Vesihöyrynvastuksen  $s_d$ -arvot ovat laskennassa olleet 0,01, 0,1, 1, 10 ja 89 m.

rosta suurempi vesihöyrynvastus. Tällöin pienet muutokset sisäpinnan vesihöyrynvastuksessa eivät ole puukuitueristeen tapauksessa juuri vaikuttaneet tuuletustilan olosuhteisiin.

Sisältä tuleva vesihöyryn diffuusiovirta muutti olosuhteita erityisesti lämmöneriste-kerroksen yläpinnassa ja ilmatilan alaosassa.

Kuvan 5.13 perusteella puukuitueristetylle yläpohjalle voidaan alustavasti suositella sisäpinnan vesihöyrynvastusta  $s_d = 1 \text{ m}$  ja mineraalivillaeristetylle yläpohjalle sisäpinnan vesihöyrynvastusta  $s_d = 10 \text{ m}$ .





## 6. VIRHEARVIOINTI

### 6.1 Yleistä

Virhearviointi antaa tietoa siitä, miten tutkimusresurssit saataisiin tulevaisuudessa kohdistettua parhaalla mahdollisella tavalla.

Laskentatarkastelujen virhelähteitä on mahdollista kartoittaa rakenteiden kosteusteknisen analysointimenetelmän avulla (Vinha et al. 2013). Kukin osio sisältää omat virhelähteensä, jotka pyritään tarkasteluissa ottamaan huomioon. Kaikkien osioiden tulee olla kunnossa, jotta tulosten luotettavuudesta olisi mahdollista varmistua.

Ulko- ja sisäilman olosuhteet, materiaaliominaisuudet ja toimintakriteerit ovat luonnonilmiöitä tai niiden alaisia ja ovat täten vaihtelevia vuodesta tai tapauksesta toiseen. Tarpeellista dataa on kerätty mittauksin, jolloin mukaan tulevat myös eri mittalaitteiden ja mittausjärjestelyiden mittaustarkkuudet. Tämän lisäksi osasta tarvittavia suureita ei ole olemassa kattavia mittauksia tai niitä ei pystytä mittaamaan. Esimerkiksi tuulettuvan yläpohjan, ryömintätillaisen alapohjan tai ulkoseinän tuulettusvälin ilmanvaihtuvuudesta on olemassa tutkimustuloksia, mutta yleisesti hyväksyttyä 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.

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 osiot eivät siis ole toisistaan irrallisia palasia, vaan toisiinsa liittyneitä kokonaisuuden osia.

Lähtökohtaisesti tarvitaan käyttökelpoisia tuloksia. Jos tuloksia ei saada tai ne ovat vääriä, eivät laskennalliset tarkastelut palvele sitä tarkoitusta minkä vuoksi niitä

tehdään. Vaikka laskennan eri osa-alueita on mahdollista jatkuvasti kehittää, täytyy jossain vaiheessa vain todeta nykyinen tietämyksen taso ja mennä laskelmissa eteenpäin. Tällainen raja-alue on erityisen haastava, koska silloin yksittäisen laskijan osalle jää suuri vastuu laskentatulosten luotettavuudesta.

Lähtötietojen määrästä ja kunkin muuttujan hajonnasta huolimatta on olemassa muutamia asioita, jotka tuovat mielenrauhaa laskelmia tehtäessä. Ensimmäkin rakennusfysiikassa on mahdollista käyttää fysikaalisia malleja, joita on testattu kokeellisesti sekä laboratoriossa että kentällä. Tällöin kaikkien ilmiöiden 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 haluttavaa saada näkyviin tarkasteltavan muuttujan vaikutukset kokosen 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 rakennusfysiikalaiset testivuodet on pyritty valitsemaan riittävän rankoiksi koko 30 vuoden ajanjaksoa 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 analysointimenetelmän eri osioita on kehitetty erikseen aiemmissa tutkimushankkeissa ja edelleen FRAME-hankkeessa.

## 6.2 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:

$$\Delta m = \frac{\delta_{\nu,air}}{\mu} \cdot \frac{\nu_{sat}(\phi_1 - \phi_2)}{L} \cdot \Delta t \quad (6.1)$$

missä

$\Delta m$	on mitattu koekappaleen ja kupin massan muutos, kg
$\delta_{\nu,air}$	on paikallaan olevan ilman vesihöyrynläpäisevyys, m <sup>2</sup> /s
$\mu$	on tutkittavan materiaalin diffuusiovastuskerroin, -
$\nu_{sat}$	on ilman kyllästyskosteuspitoisuus, kg/m <sup>3</sup>
$\phi_1$ ja $\phi_2$	ovat ilman suhteelliset kosteudet koekappaleen eri puolilla, -
$L$	on koekappaleen paksuus, m ja
$\Delta t$	on ajanhetken pituus, jossa massan muutos tapahtuu, s.

Tästä saadaan ratkaistua vesihöyrynläpäisevyyskerroin:

$$\mu = \frac{\delta_{\nu,air}}{\Delta m} \cdot \frac{\nu_{sat}(\phi_1 - \phi_2)}{L} \cdot \Delta t \quad (6.2)$$

Derivoimalla yhtälö kupin ulkopuolen suhteellisen kosteuden  $\phi_2$  suhteen ja kertomalla tulos mittalaitteen tarkkuudella saadaan lasketua RH-anturin tarkkuudesta johtuva virhe (positiivisena lukuna):

$$d\mu = \frac{\delta_{\nu,air}\nu_{sat}\Delta t}{L\Delta m} \Delta\phi_2 \quad (6.3)$$

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

$$\frac{d\mu}{\mu} = \frac{\Delta\phi_2}{\phi_2 - \phi_1} \quad (6.4)$$

Esimerkiksi jos kupin sisällä suhteellinen kosteus on 33 % RH ja ulkopuolella 85 % RH ja ulkopuolen suhteellisen kosteuden mittausvirhe on 1 % RH, niin tällöin mittalaitteesta aiheutuva diffuusiovastuskertoimen suhteellinen virhe on 1 % RH / (85 % RH - 33 % RH)  $\cong$  2 prosenttiyksikköä.

Toinen esimerkki koskee WUFI-ohjelman sisältämää tapaa määrittää nestemäisen veden kapillaarinen kosteusdiffusiviteetti. Tätä ohjelmaa ei käytetty tämän diplomityön laskelmissa, mutta se antaa lisätietoa materiaalien kapillaaristen ominaisuuksien herkkyydestä.

Kapillaarinen kosteusdiffusiviteetti kertoo vesipitoisuuserojen tasoittumisnopeudesta materiaalin sisällä. Kyseessä on epälineaarinen funktio, jonka arvo riippuu materiaalin sisältämän veden määrästä. Ellei tarkemmin määritettyjä arvoja ole saatavilla, on kivipohjaisille materiaaleille ehdotettu seuraavaa likiarvokaavaa kapillaarisen kosteusdiffusiviteetin  $D_{ws}$  laskemiseksi veden imeytymiskertoimesta (Künzel 1995):

$$D_{ws}(w) = 3,8 \cdot \left(\frac{A_w}{w_f}\right)^2 \cdot 1000^{\frac{w}{w_f}-1} \quad (6.5)$$

missä

$D_{ws}(w)$	on kapillaarinen kosteusdiffusiviteetti, $\text{m}^2/\text{s}$
$w$	on materiaalin kosteuspitoisuus, $\text{kg}/\text{m}^3$
$A_w$	on veden imeytymiskerroin, $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}^{0.5})$ ja
$w_f$	on materiaalin kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus, $\text{kg}/\text{m}^3$ .

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

$$dD_{ws}(w) = \frac{3,8}{w_f^2} \cdot 1000^{\frac{w}{w_f}-1} \cdot 2A_w \Delta A_w \quad (6.6)$$

Jakamalla tämä kapillaarisen kosteusdiffusiviteetin arvolla saadaan imeytymiskertoimen hajonnasta aiheutuva virhe:

$$\frac{dD_{ws}(w)}{D_{ws}(w)} = \frac{2\Delta A_w}{A_w} \quad (6.7)$$

Kapillariteetikertoimen mittausstandardin luvussa 9 on annettu esimerkki, että jos absorptiokertoimen määrittämisessä testikappaleen massaa on mitattu kahdeksan kertaa ja jokaisen virhe on noin 5 %, tulee absorptiokertoimen virheeksi tällöin noin 4 % (SFS-EN ISO 15148 2002). Käyttäen tätä arvoa edellisessä kaavassa saadaan materiaalin kapillaarisen kosteusdiffusiviteetin suhteelliseksi virheeksi  $2 \cdot (0,04A_w)/A_w = 8 \%$ .

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 mittajaan huolellisuus. Useamman kappaleen mittaussarjassa yksittäisten materiaalien erot tasoittuvat ja räikeät virheet saadaan poimittua pois.

### 6.3 Rakenteiden simulointien tarkkuus

Rakenteiden laskentamalleissa on käytetty useita yksinkertaistuksia sekä puuttuvien lähtötietojen takia että laskennan nopeuttamiseksi.

Ilmanvaihtuvuuden on huomattu vaikuttavan joissain tilanteissa merkittävästi yläpohjarakenteille laskettuihin homeindeksin maksimiarvoihin, mutta tällä hetkellä ilmanvaihtuvuus on otettu huomioon ainoastaan yksinkertaistetusti vakioarvona. Seuraava askel olisi määrittää eri alueilla vallitseva mikroilmaston mukainen tuulennopeus, joka sidottaisiin yläpohjan tuuletusaukkojen painekertoimiin.

Yläpohjan puurakenteita ei ole mallinnettu, jotta laskenta voitiin tehdä 1D-malleilla. Tällä säästettiin runsaasti laskenta-aikaa ja pystyttiin laajentamaan laskennallisesti tarkasteltujen asioiden joukkoa. Olosuhteiden muutosnopeuden hidastuessa puukappaleiden pintojen olosuhteet lähestyvät yläpohjan ilmatilan olosuhteita, mutta tarkalleen ottaen ilmatilan ja pintojen olosuhteiden välistä eroa ei tällä hetkellä tiedetä. Oletus on, että materiaalien pinnoilla olosuhteet muuttuvat hitaammin kuin yläpohjan ilmatilassa, jolloin korkeiden suhteellisen kosteuden arvojen esiintymismäärän voisi ajatella vähenevän. Toisaalta myöskään homeenkasvulle epäsuotuiset ajanhetket eivät vaikuta todellisuudessa materiaalien pinnoilla yhtä nopeasti, joten asiaa tulisi vielä tarkastella erilaisten mittausten ja/tai laskelmien avulla.

Erilaisten ilma- ja sadevuotojen vaikutuksia yläpohjan olosuhteisiin ei ole tarkasteltu. Todellisissa kohteissa on kuitenkin aina vähintään jonkinlaisia ilmavuotoja, mitkä voivat tuoda kosteutta yläpohjaan ja tällä tavoin heikentää sen kosteusteknistä toimintaa. Simulointituloksien ja tämän seikan perusteella perinteinen kattoristikko-yläpohja suositellaan edelleen tehtäväksi tuulettuvana, mutta toisaalta tuuletuksen määrää ei ole muutoin hyvin toimivassa rakenteessa tarpeen kasvattaa määrättömästi.



## 7. PÄÄTELMÄT

U-arvon kiristäminen ja erityisesti ilmastonmuutos kasvattivat tavallisen tuulettuvan yläpohjan homeriskiä. Kummallekaan muuttujalle ei löytynyt tuulettuvien yläpohjien osalta yksiselitteistä raja-arvoa, jonka jälkeen olosuhteet alkaisivat heikkeneään. Ilmasto-olosuhteet muuttuivat kuitenkin rankemmiksi 2050-luvun ilmastosta 2100-ilmastoon siirrytteässä kuin nykyilmastosta 2050-ilmastoon mentäessä.

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.

Ilmastonmuutos vaikutti samankaltaisesti eri päälämmöneristekerroksen U-arvotasoilla toteutettuihin yläpohjiin. Tämä tarkoittaa, että myös olemassa olevien tuulettuvien yläpohjien homeriski kasvaa ilmaston muuttuessa. Tehtyjen tarkastelujen perusteella homeriski saadaan kuitenkin pieneksi rakenteellisilla ratkaisuilla.

Matalaemissiviteettipinnan ( $\varepsilon=0,02$ ) käyttäminen aluskatteen alapinnassa pienentää lämpöhäviöitä lämmöneristeen yläpinnasta yläpohjaan. Kosteustekniseltä kannalta tämä kuitenkin heikentää yläpohjan olosuhteita tavalliseen ( $\varepsilon=0,9$ ) aluskatteeseen verrattuna.

Jos matalaemissiviteettipintaista aluskatetta haluttaisiin käyttää, olisi matalaemissiviteettipinta suositeltavaa asentaa ylöspäin. Tällä ei toisaalta ollut laskelmien perusteella suurta vaikutusta yläpohjan homehtumisriskiin, johtuen todennäköisesti pienestä lämpötilaerosta aluskatteen yläpinnan ja katteen alapinnan välillä. Tämän lisäksi aluskatteen yläpinnan emissiviteetti voi kasvaa epäpuhtauksien vaikutuksesta, joten rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta matalaemissiviteettipinnasta aluskatteesta ei tässä nähdä olevan hyötyä.

Yläpohjan lämmöneristeen kosteuskapasiteetin kasvattamisesta oli hyötyä yläpohjan homeriskin kannalta ilmanvaihtuvuuden ollessa riittävän pieni ( $n < 1 \dots 5$  1/h). Tämä liittyy ilmeisesti yläpohjan olosuhteiden vuorokautiseen vaihteluun, jolloin suuremman kosteuskapasiteetin omaava lämmöneriste pystyy vielä vaikuttamaan yläpohjan olosuhteisiin. Aikasyklin pidentyminen, lämmöneristeen peittäminen tai il-

manvaihtuvuuden kasvattaminen pienentävät lämmöneristeen hygroskooppisuudesta saatavaa hyötyä. Lisäksi on hyvä muistaa, että lämmöneristemateriaalin tiheys ei suoraan korreloi materiaalin kosteuskapasiteetin kanssa kaikissa tapauksissa.

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 aluskatteen vesihöyrynvastusta koskevissa tarkasteluissa koko rakenteen sisäpinnassa oli höyrynsulkumuovi. Koska kosteuskuorma sisäilmasta oli minimoitu, on tällöin rakenteen suurin kosteuskuorma tullut ulkoilmasta tuuletusilman mukana.

Yläpohjan ilmanvaihdon pienentämistä ja ympäröivän rakenteen vesihöyrynvastuksen kasvattamista ei kuitenkaan voi pelkästään näiden tarkastelujen perusteella suositella, koska laskelmissa ei ole mukana todellisissa rakenteissa esiintyviä kosteuslähteitä, kuten rakennusaikaista kosteutta, ilmavuotoja sisältä tai sadevuotoja. Esimerkki rakentamisen ulkopuolelta voisi olla, että suljettu kuiva muovipussi säilyy sisätiloissa sellaisenaan pitkään, mutta märkiä tavaroita sisältävää muovipussia ei kannata sulkea.

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 homeindeksi 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 myös muilla rakennekerroksilla on omat vesihöyrynvastuksensa. Tuulettuvan yläpohjan olosuhteita tarkastellessa kaikkien kerrosten vesihöyrynvastukset sisältä yläpohjan ilmatilaan asti vaikuttavat sisäilmasta diffuusiolla kulkeutuvaan kosteus-



virtaan. Tällöin on tarpeen tarkastella yläpohjarakenteen olosuhteita sekä lämmöneristekerroksessa että yläpohjan ilmatilassa. Jos rakenteen vesihöyrynvastus ilmatilan kannalta on jo sellaisenaan riittävä, voivat olosuhteet olla kuitenkin hankalat lämmöneristekerroksen sisällä. Tällöin sisäilmassa oleva kosteus pääsee helpommin lämmöneristeeseen, jonka kylmällä puolella ilman suhteellinen kosteus alkaa nousta.

Jos läpäisevä lämmöneristemateriaali ei ole herkkä homehtumiselle tai materiaali on erikseen käsitelty homesuoja-aineilla, ei suhteellisen kosteuden nousu eristeessä välttämättä nosta laskettua homeindeksiä eristeessä. Tällöin sisäpinnan riittävä vesihöyrynvastus on kuitenkin tarpeen yläpohjan kosteuskuorman pienentämiseksi. Ilman erillisiä selvityksiä puukuitueristetylle yläpohjalle voi suositella rakenteen sisäpinnassa käytettäväksi vesihöyrynvastusta  $s_d = 1$  m ( $Z_\nu = 40 \cdot 10^3$  m/s,  $Z_p = 5 \cdot 10^9$  m<sup>2</sup>sPa/kg) ja mineraalivillaeristetylle yläpohjalle arvoa  $s_d = 10$  m ( $Z_\nu = 400 \cdot 10^3$  m/s,  $Z_p = 50 \cdot 10^9$  m<sup>2</sup>sPa/kg). Tarkempi arvio edellyttää muun muassa yläpohjan lämmöneristemateriaalin ja aluskatteen ominaisuuksien yksityiskohtaisempaa huomioinnin ottamista.

Lämpöä eristävällä aluskatteella pystyttiin kaikissa tarkastelluissa tapauksissa saamaan tuulettuvan yläpohjan olosuhteet kriteerien mukaiselle tasolle ( $M < 1$ ). Aluskatteelta vaadittava lämmönvastus riippui muun muassa yläpohjan lämmöneristemateriaaleista, aluskatteen vesihöyrynläpäisevyydestä, yläpohjan ilmanvaihtuvuudesta ja muista edellä mainituista asioista. Aluskatteelle voidaan kuitenkin suositella lämmönvastusta  $R = 0,4\text{--}0,6$  m<sup>2</sup>K/W käytetyistä ratkaisuista riippuen. Tyyppillisiin, olemassa oleviin tuotteisiin verrattuna tämä tarkoittaa noin 20...30 mm lämmöneristelevyä. Lämmöneristykseen tulisi peittää yläpohja kauttaaltaan. Lämpö- ja kosteusteknisten ominaisuuksien lisäksi tulee ottaa huomioon myös vaatimukset puristuslujuudesta, pitkäaikaiskestävyydestä sekä käyttäytymisestä palossa.

Työn tulokset on koottu seuraavaan listaan:

1. Merkittävä parantava vaikutus

- Materiaalien homehtumisherkkyyden valitseminen kestävämmäksi
- Lämpöä eristävän aluskatteen käyttäminen

2. Hieman parantava vaikutus

- Auringonsäteilyn määrän kasvattaminen katolle
- Yläpohjarakenteen sisäpinnan vesihöyrynvastuksen kasvattaminen
- Päälämmöneristekerroksen kosteuskapasiteetin kasvattaminen
- Päälämmöneristekerroksen merkittävä ohentaminen
- Ilmastonmuutoksen hillitseminen

3. Onnistuessaan parantava vaikutus, mutta tapauskohteisesti liian suuret tai pienet arvot tuottavat heikon lopputuloksen

- Yläpohjan ilmanvaihtuvuuden säätäminen maltilliseksi
- Aluskatteen vesihöyrynvastuksen kasvattaminen

4. Ei juuri vaikutusta tai heikentävä vaikutus

- Matalaemissiviteettipintaisen aluskatteen käyttäminen

## LÄHTEET

- Andreas, E. L. (2005), Handbook of physical constants and functions for use in atmospheric boundary layer studies, Technical report, U.S. Army Engineer Research and Development Center. Cold Regions Research and Engineering Laboratory.
- Angeli, I. & Marinova, K. P. (2013), *Atomic Data and Nuclear Data Tables* **99**, 69–95.
- Arfvidsson, J. (1998), Moisture Transport in Porous Media. Modelling Based on Kirchhoff Potentials, PhD thesis, Lund University. TVBH-1010.
- Arfvidsson, J. & Harderup, L.-E. (2008), Fuktsäkerhet i kalla vindsutrymmen. slutrapport no. tvbh-3050, Technical report, Lund University.
- Bird, G. (2015), ‘The rate of energy transfer from air as an initially stationary particle acquires brownian motion’, *Nano Energy* .
- Blom, P. (2001), ‘Venting of attics and pitched, insulated roofs’, *Journal of Building Physics* .
- Bonilla, M. R. & Bhatia, S. K. (2011), ‘Low-density diffusion coefficient of soft-sphere fluids in nanopores: Accurate correlations from exact theory and criteria for applicability of the knudsen model’, *Journal of Membrane Science* **382**, 339–349.
- Credit Suisse (2014), ‘What are megatrends? conference series 2014’.
- EEA (2011), The european environment — state and outlook2010: assessment of global megatrends, Technical report, European Environment Agency, Copenhagen.
- Einstein, A. (1956), ‘Investigations on the theory of the brownian movement’. Translation and republication of an original article published in 1926. Edited by R. Fürth and translated by A. D. Cowper. Dover Publications, Inc.
- Essah, E. A. (2009), Modelling and measurements of airflow and ventilation within domestic pitched roofs, PhD thesis, Glasgow Caledonian University.
- European Parliament and the Council of the European Union (2010), ‘Directive 2010/31/EU’.

eurostat (2012), 'Energy, transport and environment indicators. 2012 edition'. ISBN 978-92-79-26596-9.

eurostat (2014), 'Energy balance sheets 2011–2012. 2014 edition'. ISBN 978-92-79-37858-4.

Feynman, R., Leighton, R., Sands, M., Gottleib, M. & Pfeiffer, R. (1963, 2006 ja 2013), 'The feynman lectures on physics'. Online edition, accessed 14.10.2014.

Fonseca, J. M., Gushterov, N. & Dohrn, R. (2014), 'Vapour pressures of selected organic compounds down to 1 mpa, using mass-loss knudsen effusion method', *Chem. Thermodynamics* **73**, 148–155.

Frost et Sullivan (2012), 'Top 20 global mega trends and their impact on business, cultures and society'. Presentation, presented by Sarwant Singh.

Ghosh, D., Biswas, R., Chakraborty, T., Islam, N. & Rajak, S. (2008), *Journal of Molecular Structure: THEOCHEM* **865**, 60–67.

Glenn, J. C., Gordon, T. J. & Florescu, E. (2014), 2013-14 state of the future. executive summary, Technical report, The Millennium Project.

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.

Hajkowicz, S., Cook, H. & Littleboy, A. (2012), Our future world: Global megatrends that will change the way we live, Technical report.

Huang, Y., Zhang, X., Ma, Z., Li, W., Zhou, Y., Zhou, J., Zheng, W. & Sun, C. (2013), 'Size, separation, structural order, and mass density of molecules packing in water and ice', *Scientific Reports* . [www.nature.com/scientificreports](http://www.nature.com/scientificreports).

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

Incropera, F. P., Witt, D. P., Bergman, T. & Lavine, A. (2007), *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6 edn, John Wiley & Sons.

Johansson, P. (2009), Roof constructions with controlled and natural ventilation, Master's thesis, Chalmers University of Technology.

- KPMG (2013), Future state 2030: The global megatrends shaping governments, Technical report, KPMG International; Mowat Centre, University of Toronto.
- Künzel, H. M. (1995), Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters, PhD thesis, Franhofer IRB Verlag Stuttgart.
- Lahdensivu, J., Suonketo, J., Vinha, J., Lindberg, R., Manelius, E., Kuhno, V., Saastamoinen, K., Salminen, K. & Lähdesmäki, K. (2012), Matalaenergia- ja passiivitalojen rakenteiden ja liitosten suunnittelu- ja toteutusohjeita, Technical report, Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Rakennetekniikka. Tutkimusraportti 160.
- Laukkarinen, A., Huttunen, P. & Vinha, J. (2014), Evaluating the desired accuracy for mould index calculations and recommendations for crawlspace simulations, in '9th Nordic Symposium on Building Physics NSB 2014', pp. 295–302.
- Laukkarinen, A., Lähdesmäki, K. & Vinha, J. (2015), 'Temperature and relative humidity field measurements in cold attics', *Structural Survey, Manuscript Submitted* **1**, 1–2.
- Laukkarinen, A. & Vinha, J. (2011), Comparison of calculated and measured values of wall assembly tests using Delphin 5, in '9th Nordic Symposium on Building Physics, Tampere, Finland'.
- Mills, A. F. (1999), *Basic heat and mass transfer*, 2 edn, Prentice Hall.
- Nicolucci, V., Tiezzi, E., Pulselli, F. M. & Capineri, C. (2012), 'Biocapacity vs ecological footprint of world regions: A geopolitical interpretation', *Ecological Indicators* **16**, 23–30.
- Nicolai, A. & Grünewald, J. (2006), *Delphin 5 manual*, TU Dresden.
- Nik, V., Sasic Kalagasidis, A. & Kjellström, E. (2012), 'Assessment of hygrothermal performance and mould risk in ventilated attics in respect to possible climate changes in sweden', *Building and Environment* **55**, 96–109.
- Ojanen, T., Viitanen, H., Peuhkuri, R., Lähdesmäki, K., Vinha, J. & Salminen, K. (2010), Mold growth modeling of building structures using sensitivity classes of materials, in 'Buildings XI Proceedings, December 2010'.
- Plagge, R., Scheffler, G., Grünewald, J. & Funk, M. (2006), 'On the hysteresis in moisture storage and conductivity measured by the instantaneous profile method', *Journal of Building Physics* **29**.

- pwc (2014), Anticipating problems, finding solutions. global annual review 2014, Technical report.
- RakMK C3 (2007), ‘Rakennuksen lämmöneristys, määräykset 2007’.
- RIL 107 (2012), Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohje, Technical report, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- Rose, W. B. & TenWolde, A. (2002), ‘Venting of attics & cathedral ceilings’, *ASHRAE Journal* pp. 26–33.
- Sanders, C. H. (1982), ‘Air movement in houses, a new approach’, *Building Research and Practice* pp. 160–175.
- Sanders, C. & Haig, J. (2004), ‘Heat, air and moisture transport through cold pitched roofs’. CIB W40 Glasgow meeting.
- Scheffler, G. A. (2008), Validation of hygrothermal material modelling under consideration of the hysteresis of moisture storage, PhD thesis, Dresden University of Technology.
- SFS-EN ISO 15148 (2002), Hygrothermal performance of building materials and products. determination of water absorption coefficient by partial immersion., Technical report.
- Sitra (2013), Sitran trendilista 2013–2014, Technical report. <http://www.sitra.fi/uutiset/tulevaisuus/sitran-trendilista-2013-2014-valmistui>, viitattu 12.10.2014.
- Tilastokeskus (2012), ‘Suomen virallinen tilasto. väestöennuste [verkkójulkaisu]. issn=1798-5137. helsinki’. <http://tilastokeskus.fi/til/vaenn/kas.html>, viitattu 6.4.2015.
- Tilastokeskus (2014), ‘Suomen virallinen tilasto. Energian hankinta ja kulu- tus. energian tuonti ja vienti alkuperämaittain, ydinpolttoaine’. <http://tilastokeskus.fi/til/ehk/tau.html>, viitattu 12.10.2014.
- Tilastokeskus (2015), ‘Suomen virallinen tilasto. väestörakenne [verkkójulkaisu]. issn=1798-5379. helsinki’. <http://www.tilastokeskus.fi/til/vaerak/index.html>, viitattu 6.4.2015.
- Touloukian, Y. S. & DeWitt, D. P. (1970), *Thermophysical Properties of Matter – The TPRC Data Series – Vol. 7. Thermal Radiative Properties – Metallic Elements and Alloys*, TEPIAC Publication (DTIC Source Code 413571).

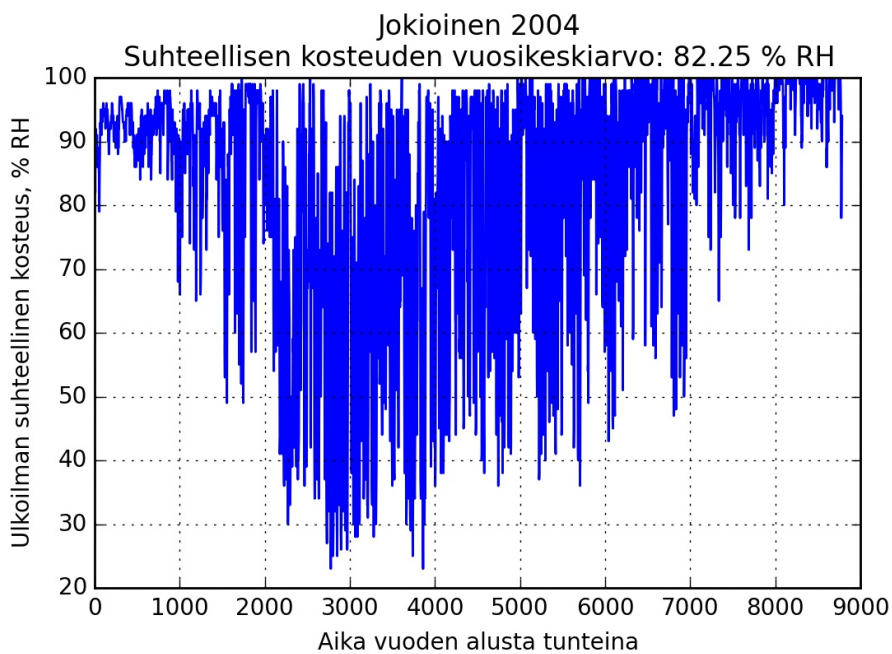
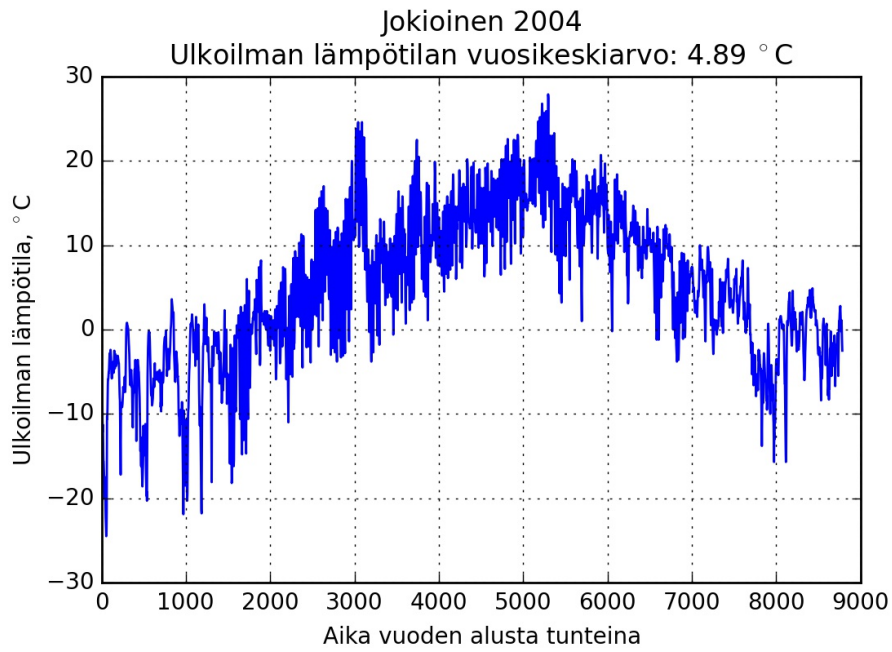
- Viitanen, H. & Ritschkoff, A.-C. (1991), Mould growth in pine and spruce sapwood in relation to air humidity and temperature, Technical Report Report No 221, Swedish University of Agricultural Sciences. Department of Forest Products. Uppsala.
- Viitanen, H., Vinha, J., Salminen, K., Ojanen, T., Peuhkuri, R., Paaajanen, L. & Lähdesmäki, K. (2010), 'Moisture and bio-deterioration risk of building materials and structures', *Journal of Building Physics* **33**, 201–224.
- 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, PhD thesis, Tampere University of Technology.
- Vinha, J. (2014), New analysis method for moisture performance of envelope structures, *in* J. Arfvidsson, L.-E. Harderup, A. Kumlin & B. Rosencrantz, eds, 'NSB 2014. 10th Nordic Symposium on Building Physics. 15–19 June 2014, Lund, Sweden', pp. 1085–1092.
- 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. (2013), Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa, Technical report, Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Rakennetekniikka. Tutkimusraportti 159.
- Vinha, J., Lindberg, R., Pentti, M., Mattila, J., Lahdensivu, J., Heljo, J., Suonketo, J., Leivo, V., Aho, H., Lähdesmäki, K. & Aaltonen, A. (2008), Matalaenergiarakenteiden toimivuus. tutkimustuloksia ja suosituksia uusiin lämmöneristys- ja energiankulutusmääräyksiin ja -ohjeisiin, loppuraportti. tutkimusraportti nro 1706, Technical report, Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos.
- Vinha, J., Valovirta, I., Korpi, M., Mikkilä, A. & Käkelä, P. (2005), Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona, Technical Report Tutkimusraportti 129, Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos.
- VTT (2008), Lausunto rakenteiden energiatehokkuuden parantamisen vaikutuksista rakenteiden kosteustekniseen toimivuuteen, Technical report, Teknologian tutkimuskeskus VTT. VTT-S-10816-08.

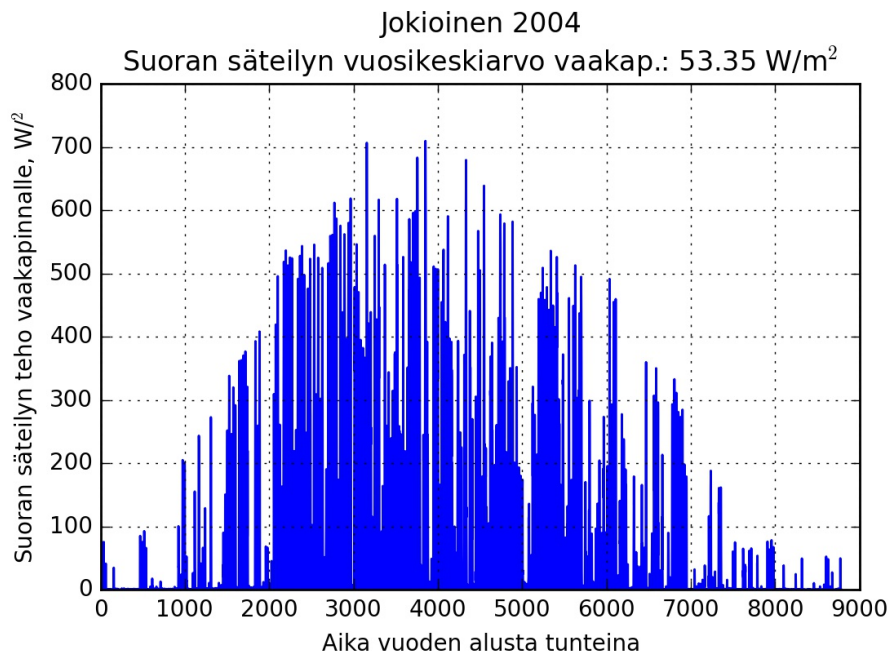
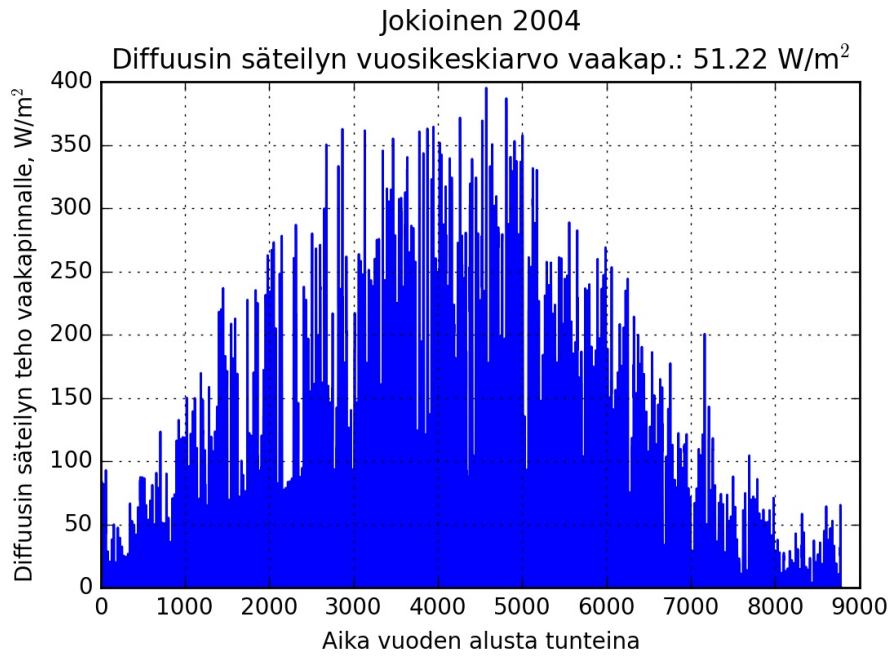
- Walker, I. S. & Forest, T. (1995), 'Field measurements of ventilation rates in attics', *Building and Environment* **30**, 333–347.
- Walker, I. S., Forest, T. W. & Wilson, D. J. (2005), 'An attic-interior infiltration and interzone transport model of a house', *Building and Environment* *40* (2005) 701–718 .
- WWF (2012), Living planet report 2012. biodiversity, biocapacity and better choices, Technical report, WWF, ZSL, GFN, ESA.
- Young, H. & Freedman, R. (2000), *University Physics with Modern Physics*, 10 edn, Addison Wesley Longman.

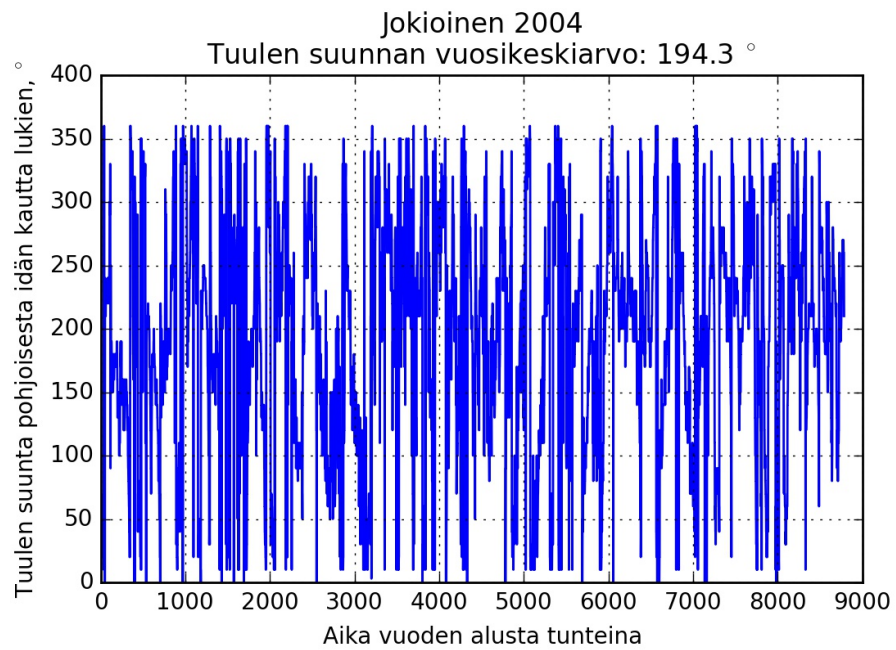
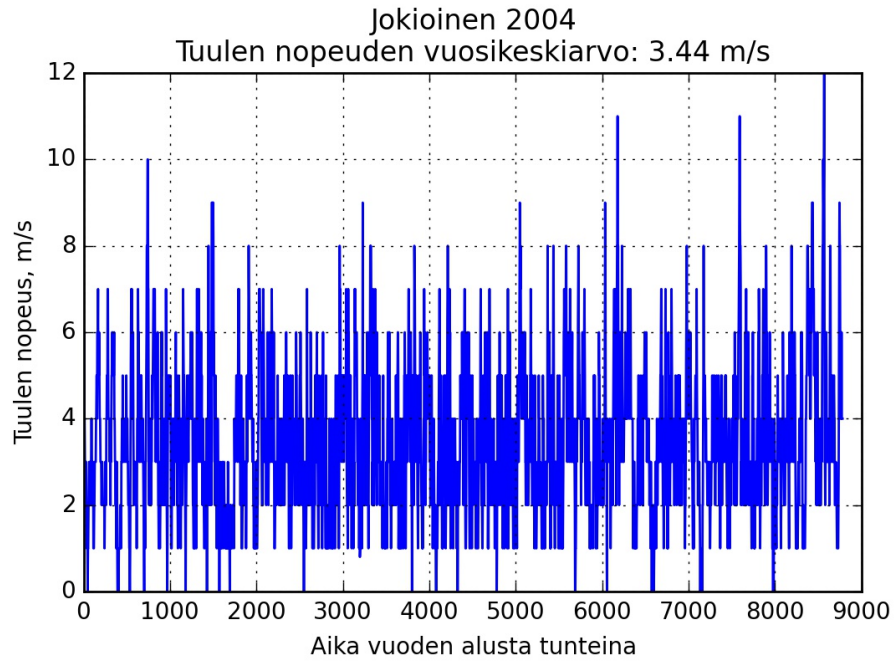


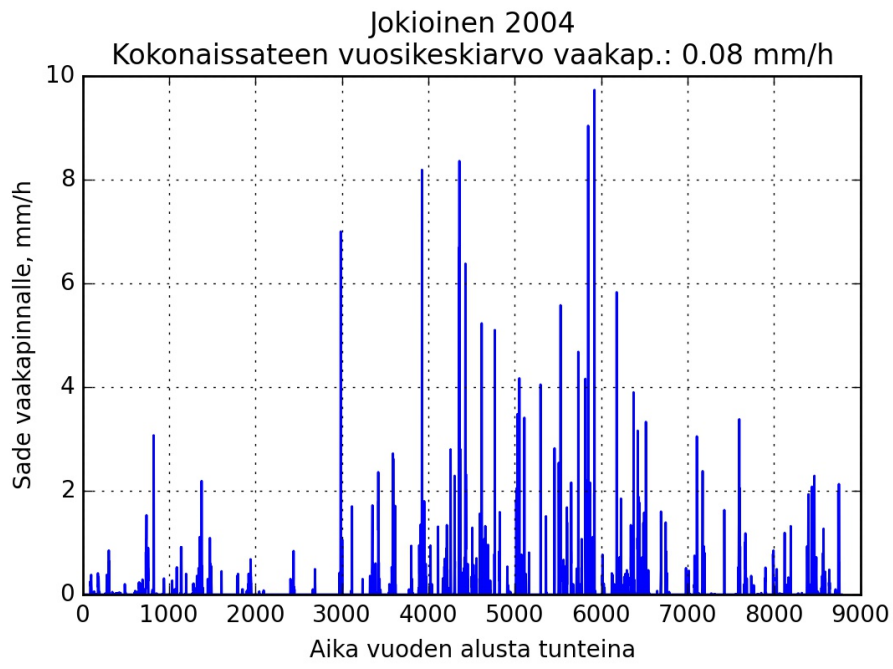
## LIITE 1: ULKOILMAN OLOSUHTEET

Seuraavissa kuvaajissa on esitetty ulkoilman olosuhteet rakennusfysikaalisena testi-  
vuotena Jokioinen 2004.









## LIITE 2: DELPHIN-OHJELMASSA KÄYTETYT MATERIAALIOMINAISUUDET

Huom! Nämä materiaaliominaisuustaulukot on peräisin FRAME-projektin loppuraportin (Vinha et al. 2013) liitteistä. Diplomityön tekijä on toimittanut materiaaliominaisuustaulukot kyseisen loppuraportin taittajille, jotka ovat saattaneet ne tässä esitettyyn muotoon.

### Merkkien selitykset

Tunnus	Yksikkö	Selitys
NAME		Nimi
FLAGS		Erytisominaisuudet
RHO	kg/m <sup>3</sup>	Tiheys
CE	J/(kg·K)	Ominaislämpökapasiteetti
LAMBDA	W/(m·K)	Lämmönjohtavuus
OPOR	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	Huokoisuus
OEFF	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	Kosteuspitoisuus vesiupotuksessa
AW	kg/(m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup> )	Veden imeytymiskerroin
MEW	-	Diffuusiovastuskerroin
KLEFF	s	Kosteudenjohtavuus OEFF-kosteuspitoisuuteen
OCAP	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	Kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus
O80	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	Kosteuspitoisuus 80 % RH suhteellisessa kosteudessa
Dv	m <sup>2</sup> /s	Vesihöyrynläpäisevyys
pC	lg(Pa)	Veden huokosalipaineen kymmenkantainen logaritmi
OI	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	Kosteuspitoisuus
lgKI	lg(s)	Kosteudenjohtavuuden kymmenkantainen logaritmi

Puuttuvia materiaalitietoja on täydennetty Delphin-laskentaohjelman materiaalikirjaston tiedoilla.

NAME	=	A1 Gypsum board	
RHO	=	774	kg/m <sup>3</sup>
CE	=	1100	J/(kg·K)
LAMBDA	=	0.19	W/(m·K)
OPOR	=	0.604	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
OEFF	=	0.604	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
AW	=	0.076	kg/(m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup> )
MEW	=	7.9	-
KLEFF	=	1.00E-09	s
OCAP	=	0.5	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
O80	=	0.01	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>

NAME	=	A2 Wood fibreboard	
RHO	=	280	kg/m <sup>3</sup>
CE	=	1500	J/(kg·K)
LAMBDA	=	0.052	W/(m·K)
OPOR	=	0.85	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
OEFF	=	0.65	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
AW	=	0.005	kg/(m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup> )
MEW	=	4.6	-
KLEFF	=	2.00E-12	s
OCAP	=	0.14	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
O80	=	0.035	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>

Veden huokosalipaineen ja kosteudenjohtavuuden kymmenkantaiset logaritmit kosteuspitoisuuden 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

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	-12.8385158
		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

NAME	=	A4 Glass wool board + weather membrane	
FLAGS	=	WATERTIGHT	
RHO	=	104	kg/m <sup>3</sup>
CE	=	850	J/(kg·K)
LAMBDA	=	0.031	W/(m·K)
OPOR	=	0.9	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
OEFF	=	0.9	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
MEW	=	1.8	-
OCAP	=	6.8	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
O80	=	0.0017	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>

NAME	=	A8 Wood hardboard	
RHO	=	800	kg/m <sup>3</sup>
CE	=	1500	J/(kg·K)
LAMBDA	=	0.12	W/(m·K)
OPOR	=	0.87	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
OEFF	=	0.87	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
AW	=	0.03	kg/(m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup> )
MEW	=	79	-
KLEFF	=	2.00E-12	s
OCAP	=	0.5	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
O80	=	0.19	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>

Veden huokosalpaineen 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



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

NAME	=	A11 Spruce plywood	
FLAGS	=	AIRTIGHT	
RHO	=	394	kg/m <sup>3</sup>
CE	=	1500	J/(kg·K)
LAMBDA	=	0.11	W/(m·K)
OPOP	=	0.65	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
OEFF	=	0.63	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
AW	=	0.022	kg/(m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup> )
MEW	=	232	-
KLEFF	=	6.00E-11	s
OCAP	=	0.59	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
O80	=	0.065	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>

NAME	=	B5 Bitumen paper	
FLAGS	=	AIRTIGHT	
RHO	=	940	kg/m <sup>3</sup>
CE	=	1500	J/(kg·K)
LAMBDA	=	0.15	W/(m·K)
OPOP	=	0.06	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
OEFF	=	0.009	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
AW	=	0.001	kg/(m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup> )
MEW	=	137	-
KLEFF	=	1.00E-13	s
OCAP	=	0.009	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
O80	=	0.000731138	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>

Veden huokosalipaineen ja kosteudenjohtavuuden kymmenkantaiset logaritmit kosteuspitoisuuden 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

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		

NAME	=	C11 Plastic film 0.2 mm	
FLAGS	=	AIRTIGHT	WATERTIGHT
RHO	=	980	kg/m <sup>3</sup>
CE	=	2300	J/(kg·K)
LAMBDA	=	0.15	W/(m·K)
OPOP	=	0.001	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
OEFF	=	0.001	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
MEW	=	89000	-
OCAP	=	0.0001	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
O80	=	3.87E-05	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>

NAME	=	C13 Pine Across grain	
FLAGS	=	AIRTIGHT	
RHO	=	532	kg/m <sup>3</sup>
CE	=	2000	J/(kg·K)
LAMBDA	=	0.12	W/(m·K)
OPOP	=	0.7	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
OEFF	=	0.67	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
AW	=	0.004	kg/(m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup> )
MEW	=	84	-
KLEFF	=	3.00E-13	s
OCAP	=	0.55	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
O80	=	0.09	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>

Veden huokosalipaineen ja kosteudenjohtavuuden kymmenkantaiset logaritmit kosteuspitoisuuden funktiona:

C11 Plastic film 0.2 mm	
OI	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			
OI	pC	OI	IgKI
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

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

NAME	=	D1 Glass wool	
FLAGS	=	WATERTIGHT	
RHO	=	22	kg/m <sup>3</sup>
CE	=	850	J/(kg·K)
LAMBDA	=	0.035	W/(m·K)
OPOR	=	0.98	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
OEFF	=	0.98	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
MEW	=	1.2	-
OCAP	=	0.003	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
O80	=	0.001	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>

NAME	=	D4a Cellulose Insulation	
RHO	=	60	kg/m <sup>3</sup>
CE	=	2000	J/(kg·K)
LAMBDA	=	0.041	W/(m·K)
OPOR	=	0.96	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
OEFF	=	0.96	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
AW	=	0.065	kg/(m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup> )
MEW	=	1.7	-
KLEFF	=	1.70E-08	s
OCAP	=	0.57	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
O80	=	0.008	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>

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	-9.100994279

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

NAME	=	Bitumen sheet	
FLAGS	=	AIRTIGHT	WATERTIGHT
RHO	=	1200	kg/m <sup>3</sup>
CE	=	2000	J/(kg·K)
LAMBDA	=	0.145	W/(m·K)
OPOP	=	0.0026	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
OEFF	=	0.0025	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
AW	=	1.00E-10	kg/(m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup> )
MEW	=	20000	-
OCAP	=	0.0025	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
O80	=	1.37E-05	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>

NAME	=	Glass wool 036	
FLAGS	=	WATERTIGHT	
RHO	=	22	kg/m <sup>3</sup>
CE	=	850	J/(kg·K)
LAMBDA	=	0.036	W/(m·K)
OPOP	=	0.98	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
OEFF	=	0.98	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
MEW	=	1.2	-
OCAP	=	0.003	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
O80	=	0.001	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>

Veden huokosalipaineen kymmenkantaiset logaritmit sekä vesihöyrynläpäisevyys kosteuspitoisuuden 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		



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

NAME	=	Medium sand	
RHO	=	2650	kg/m <sup>3</sup>
CE	=	1050	J/(kg·K)
LAMBDA	=	2.1	W/(m·K)
OPOP	=	0.38	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
OEFF	=	0.37	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
AW	=	0	kg/(m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup> )
MEW	=	15	-
KLEFF	=	7.01E-09	s
OCAP	=	0.37	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
O80	=	0.156	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>

NAME	=	Medium sand_mod	
RHO	=	2650	kg/m <sup>3</sup>
CE	=	1050	J/(kg·K)
LAMBDA	=	2.1	W/(m·K)
OPOP	=	0.38	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
OEFF	=	0.37	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
AW	=	0	kg/(m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup> )
MEW	=	15	-
KLEFF	=	7.01E-09	s
OCAP	=	0.37	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
O80	=	0.156	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>

Veden huokosalipaineen ja kosteudenjohtavuuden kymmenkantaiset logaritmit kosteuspitäisyyden funktiona:

Medium sand			
OI	pC	OI	IgKI
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	IgKI
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			
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

NAME	=	Spruce SW_Fi Dresden	
FLAGS	=	AIRTIGHT	WOOD
RHO	=	530	kg/m <sup>3</sup>
CE	=	2000	J/(kg·K)
LAMBDA	=	0.13	W/(m·K)
OPOR	=	0.7	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
OEFF	=	0.695	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
AW	=	0.0582	kg/(m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup> )
MEW	=	236	-
KLEFF	=	4.00E-09	s
OCAP	=	0.55	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
O80	=	0.0749	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>

NAME	=	Leca	
FLAGS	=	WATERTIGHT	
RHO	=	270	kg/m <sup>3</sup>
CE	=	1000	J/(kg·K)
LAMBDA	=	0.1	W/(m·K)
OPOR	=	0.73	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
OEFF	=	0.73	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
AW	=	0	kg/(m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup> )
MEW	=	5	-
KLEFF	=	0.00E+00	s

Veden huokosalipaineen ja kosteudenjohtavuuden kymmenkantaiset logaritmit kosteuspitoisuuden 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

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

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

NAME	=	Concrete C20_25 (IBK)	
RHO	=	2320	kg/m <sup>3</sup>
CE	=	850	J/(kg·K)
LAMBDA	=	2.1	W/(m·K)
OPOR	=	0.143	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
OEFF	=	0.1429	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
AW	=	0.02	kg/(m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup> )
MEW	=	110	-
KLEFF	=	4.40E-11	s
OCAP	=	0.136	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
O80	=	0.0582	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>

NAME	=	Polystyrene board-expanded (IBK)	
FLAGS	=	AIRTIGHT	WATERTIGHT
RHO	=	23	kg/m <sup>3</sup>
CE	=	1500	J/(kg·K)
LAMBDA	=	0.036	W/(m·K)
OPOR	=	0.93	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
OEFF	=	0.92	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
AW	=	1.00E-05	kg/(m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup> )
MEW	=	96	-
KLEFF	=	0.00E+00	s
O80	=	0.0006	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>

Veden huokosalipaineen ja kosteudenjohtavuuden kymmenkantaiset logaritmit kosteuspitoisuuden funktiona:

Concrete C20_25 (IBK)			
OI	pC	OI	IgKI
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

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



NAME	=	Air	
		AIR	WATERTIGHT
RHO	=	1.25	kg/m <sup>3</sup>
CE	=	1000	J/(kg·K)
LAMBDA	=	4	W/(m·K)
MEW	=	1	-
KG	=	0.1	s

Tasapainokosteuskäyrä:  
Ohjelma laskee ilman vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuuden lämpötilan perusteella.