



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ALIINA HÄRKÖNEN  
HEIKOSTI TUULETTUVAN YLÄPOHJAN KOSTEUSTEKNISEN  
TOIMINNAN KRITERIT

Kandidaatintyö

Tarkastaja: Eero Tuominen

## TIIVISTELMÄ

**ALIINA HÄRKÖNEN:** Heikosti tuulettuvan yläpohjan kosteusteknisen toiminnan kriteerit (Hygrothermal performance criteria for a poorly ventilated roof)

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 25 sivua, 0 liitesivua

Toukokuu 2018

Rakennustekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Talonrakentaminen

Tarkastaja: Eero Tuominen

Avainsanat: yläpohja, toimintakriteerit, kosteustarkastelu, yläpohjan rakenne

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää heikosti tuulettuvan yläpohjan toimivuuden kriteerit ja sen toiminta kosteusrasituksen alaisena. Tutkimus tehtiin kirjallisuuskatsauksena.

Tutkimus aloitettiin selvittämällä heikosti tuulettuvan yläpohjan toiminnan kriteerit. Työssä tarkasteltiin perinteistä yläpohjarakennetta ja selvitettiin, miten tuuletus vaikuttaa yläpohjarakenteen kosteustekniseen toimintaan. Tutkimuksessa keskityttiin etsimään tuuletuksen vaikutukset yläpohjarakenteeseen ja tarkasteltiin tilanteita, joissa testattiin rakenteen kosteusteknistä toimivuutta eri ilmanvaihtomäärillä. Tutkimuksessa myös tarkasteltiin yläpohjan materiaaleja ja selvitettiin niiden vaikutus yläpohjan toimintaan. Tutkimuksessa pyrittiin löytämään rakennusmateriaaleja, jotka mahdollistavat heikosti tuulettuvan yläpohjarakenteen kosteusteknisen toiminnan.

Heikosti tuulettuva yläpohja todettiin toimivaksi, jos rakenne on lähes ideaalisesti toteutettu. Rakenteen tulee olla ilmatiivis, jotta rakenteeseen ei pääse ilmavirtauksien mukana kosteutta. Vesikaton tulee olla tarpeeksi kalteva, ja epäjatkuissa katteissa saumakohtien tulee olla tiiviitä. Aluskatteen tulee olla diffuusiotiivis, ettei vesihöyryä pääse ulkoilmasta rakenteeseen. Eristeenä on käytettävä hygroskooppista materiaalia, jotta mahdollinen kosteus pääsee imeytymään ja haihtumaan tarvittaessa. Mahdollisen vesihöyryn päästyä rakenteeseen, kosteus tuulettuu sisäilmaan älyhöyrynsulkumuovin avulla.

## ALKUSANAT

Tämä kandidaattityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laitokselle. Työn ohjaajana toimi Eero Tuominen.

Kiitos Eero Tuomiselle mielenkiintoisesta aiheesta ja opastuksesta ensimmäinen tutkimukseni varrella. Kiitokset myös ystäväilleni vertaistuesta, joka auttoi saavuttamaan ensimmäisen askeleen kohti valmistumista.

Lopuksi haluan kiittää myös rakennustekniikan lehtoria Petteri Härköstä opastuksesta ja rakennusfysiikan asiantuntijuudesta. Lisäksi kiitos isälleni opettavaisista keskusteluista aiheeseen liittyen.

Tampereella 17.9.2018

Aliina Härkönen

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	RAKENNUSFYSIIKAN TEORIA.....	2
	2.1 Lämmön siirtyminen .....	2
	2.1.1 Lämmön siirtyminen johtumalla.....	2
	2.1.2 Lämmön siirtyminen säteilemällä.....	4
	2.1.3 Lämmön siirtyminen konvektiolla .....	5
	2.2 Kosteuden siirtyminen.....	7
	2.2.1 Kosteuden siirtyminen diffuusiolla.....	7
	2.2.2 Kosteuden siirtyminen konvektiolla .....	8
3.	YLÄPOHJARAKENNE .....	10
	3.1 Tuulettuva yläpohja.....	10
	3.2 Yläpohjaan kohdistuvat rasitukset .....	11
	3.3 Yläpohjien kosteustekninen toiminta .....	13
	3.3.1 Tuuletuksen merkitys.....	14
	3.3.2 Aluskatteiden toiminta .....	14
4.	YLÄPOHJAN TOIMIVUUDEN KRITEERIT .....	16
	4.1 Tuuletusvälin ilmanvaihdon suuruus .....	16
	4.2 Lämmöneristeen paksuus .....	17
	4.3 Aluskatteen ominaisuudet .....	18
	4.4 Höyrynsulun ominaisuudet .....	19
5.	HEIKOSTI TUULETTUVA YLÄPOHJA .....	20
	5.1 Heikosti tuulettuvan yläpohjan toimivuuden kriteerit.....	20
	5.2 Yläpohjarakenteen kosteusteknisen toiminnan varmistaminen .....	21
6.	YHTEENVETO .....	23
	LÄHTEET.....	24

## KÄSITTEET JA MÄÄRITELMÄT

Diffuusio	Ilmiö, jossa molekyylien satunnaisesta liikkeestä johtuen pitoisuusero tasoittuu suuremmasta pitoisuudesta pienempään.
Emissio	Emissio tarkoittaa sähkömagneettista säteilyä.
Emissiivisyys	Kappaleen lähettämän säteilyn määrä verrattuna mustaan kappaleeseen.
Kondensoituminen	Kondensoituminen tarkoittaa vesihöyryn tiivistymistä vedeksi tai jääksi, kun ilman vesihöyrynpitoisuus ylittää kyllästyskosteuspitoisuuden.
Konvektio	Konvektiolla tarkoitetaan kaasun tai nesteen liikkumista ulkopuolisen voiman tai lämpötilaerojen aiheuttamien tiheyserojen vaikutuksesta.
Lämmönjohtavuus	Lämmönjohtavuus ( $\lambda$ ) kuvaa materiaalin kykyä johtaa lämpöä. (W/Km)
Lämmönvastus	Lämmönvastus ilmoittaa rakenteen eri puolilla olevien isotermisten pintojen lämpötilaeron ja ainekerroksen läpi kulkevan lämpövirran tiheyden suhteen.
Pintavastus	Pintavastuksella tarkoitetaan rakennusosan pinnan ja ympäristön välisen rajakerroksen lämmönvastusta.
Viistosade	Viistosateella tarkoitetaan seiniin kohdistuvaa sadetta, jonka aiheuttaa esimerkiksi tuulen paine.

# 1. JOHDANTO

Tässä tutkimuksessa tavanomaisella yläpohjarakenteella käsitetään rakennetta, jossa on vesikate, aluskate, kantavan puurakenne, tuuletustila, lämmöneristekerros ja höyrynsulku. Sen tehtävänä on pitää vesi ja lumi yläpohjarakenteen ulkopuolella. Yläpohjarakenteelta vaaditaan nykyisin paljon. Siihen halutaan riittävän paksu eristekerros pitämään kiinteistöjen energiakulut matalina. Sen on pidettävä sisätilat kuivina ja myös yläpohja tarpeeksi kuivana, että rakenne olisi toimiva.

Heikosti tuulettuvassa yläpohjassa lämmöneristeen päällä on suoraan vedeneriste. Näissä rakenteissa tuuletuksen kokonaisilmamäärä on niin pieni, että pienetkin vesikatteen vuodot voivat aiheuttaa kosteuden kertymistä rakenteeseen. Toimivan ja tiiviin ilman -ja höyrynsulun merkitys on tämän kaltaisissa rakenteissa suuri, jotta ilmavuodot eivät aiheuta kosteutta rakenteeseen.

Tämä kandidaattityö käsittelee heikosti tuulettuvan yläpohjan kosteusteknistä toimintaa. Tutkimus tehdään kirjallisuuskatsauksena. Tutkimuksen tavoitteena on löytää heikosti tuulettuvalle yläpohjalle kosteusteknisen toimivuuden kriteerit. Lisäksi selvitetään, miten ilma- ja kosteusvuodot vaikuttavat rakenteeseen ja sen toimivuuteen.

Luvussa 2 perehdytään tarkemmin rakennusfysiikan teoriaan eli esitellään lämmön ja kosteuden siirtyminen diffuusiolla ja konvektiolla. Luvussa myös esitellään kerroksellisen rakenteen lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan käsinlaskentamenetelmät.

Luvussa 3 esitellään tuulettuvaa yläpohjarakennetta ja tarkastellaan eri rakennekerrosten merkitystä. Luvussa perehdytään tarkemmin yläpohjan kosteusrasitukseen ja tarkastellaan yksityiskohtaisemmin tuuletuksen merkitystä ja aluskatteiden toimintaa.

Luvussa 4 esitellään yläpohjan toimivuuden kriteerit ja käydään läpi tähän liittyviä tutkimustuloksia. Tutkimustulokset on jaettu kriteerien mukaisiin alaotsikoihin

Luvussa 5 analysoidaan tutkimustuloksia ja tulosten perusteella tehdään tulkintoja saaduista johtopäätöksistä. Luvussa pyritään löytämään heikosti tuulettuvan yläpohjan toimivuuden kriteerit. Luvussa myös tarkastellaan heikosti tuulettuvan yläpohjan toimivuutta kosteuskuormitusten alaisena. Viimeisessä luvussa esitetään yhteenvedo tutkimuksesta ja sen keskeisistä tuloksista.

## 2. RAKENNUSFYSIIKAN TEORIA

### 2.1 Lämmön siirtyminen

Rakennusfysiikan tutkimuksessa tärkeässä roolissa on rakenteiden lämpö- ja kosteustekninen toiminta. Lämpö on molekyylien ja atomien liikettä, ja se voi siirtyä johtumalla, säteilemällä ja konvektiolla eli virtaamalla. Yleisesti lämmöllä tarkoitetaan rakentamisessa rakennuksen lämmittämiseen tarvittavaa lämpöä. [1]

#### 2.1.1 Lämmön siirtyminen johtumalla

Johtumisessa materiaalien molekyylien liike-energia siirtyy molekyyliltä toiselle. Näin tapahtuu lämmön johtumista. Lämmölle on ominaista lämpötilojen tasaantuminen: lämpö pyrkii tasaantumaan virtaamalla lämpimästä kylmempään päin. Johtuminen tapahtuu pääasiallisesti vain kiinteissä aineissa ja nesteissä. [1]

Homogeenisessa ja isotrooppisessa ainekerroksessa johtumalla siirtyvä lämpövirran tiheys  $q$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) voidaan laskea Fourierin lain avulla seuraavasti [2]:

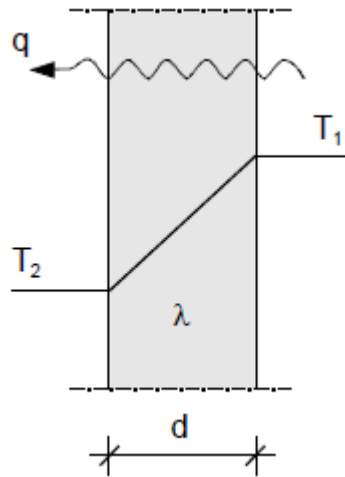
$$q = -\lambda \nabla T = -\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \lambda \frac{\partial T}{\partial y}, \lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right), \quad (1)$$

jossa  $\lambda$  on lämmönjohtavuus ( $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ),  $T$  lämpötila ( $\text{K}$ ) ja  $x,y,z$  lämpövirran suunta-koordinaatit ( $\text{m}$ ).

Kun jatkuvuustilassa lämpötilajakauma on kuvan 1 mukainen, kerroksen läpi siirtyvä lämpövirran tiheys voidaan laskea seuraavasti [3]:

$$q = \lambda \cdot \frac{t_1 - t_2}{d}, \quad (2)$$

jossa  $t_1 - t_2$  kappaleen/seinämän yli vallitseva lämpötilaero ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\lambda$  materiaalin lämmönjohtavuus ( $\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$ ) ja  $d$  kappaleen paksuus ( $\text{m}$ ).



**Kuva 1** Lineaarinen lämpötilajakauma [2].

Jos rakenne koostuu useasta homogeenisestä ainekerroksesta, saadaan lämpövirran tiheys laskettua kaavalla [3]

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\Sigma_m} . \quad (3)$$

Lämpövirta  $\Phi$  (W) saadaan kaavalla [2]

$$\Phi = q \cdot A, \quad (4)$$

jossa  $q$  (W/m<sup>2</sup>) on lämpövirran tiheys ja  $A$  rakenteen pinta ala (m<sup>2</sup>).

Edellisissä kaavoissa toistuvalla lämmönjohtavuudella ( $\lambda$ ) tarkoitetaan kullekin materiaalille ominaista kykyä johtaa lämpöä. Mitä suurempi on materiaalin lämmönjohtavuus, sitä paremmin se päästää lävitseen lämpöä. Lämmönjohtavuuden suunnittelu arvossa  $\lambda_{\text{design}}$  (W/mK) on otettu huomioon mittatulosten hajonnan sekä lämpötilan, kosteuspitoisuuden ja ikääntymisen vaikutukset lämmönjohtavuuteen. [1]

Lämmönjohtavuuden avulla voidaan laskea tietyn materiaalin lämmönvastus  $R$  (m<sup>2</sup>K/W) seuraavasti [2]:

$$R = \frac{d}{\lambda}, \quad (5)$$

jossa  $d$  on materiaalin paksuus (m) ja  $\lambda$  lämmönjohtavuus (W/m·°C).

Kun saadaan laskettua materiaalikerroksen lämmönvastus, saadaan kerroksen lämmönläpäisykerroin  $U$  (W/m<sup>2</sup>K) laskettua kaavalla [2]

$$U = \frac{1}{R}. \quad (6)$$



Jos rakenne sisältää useita eri kerroksia, voidaan laskea kokonaislämmönvastus summaamalla kerrosten lämmönvastukset. Kokonaislämmönvastus saadaan siis kaavalla

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se}. \quad (7)$$

Rakenteen kokonaislämmönvastusta laskettaessa laskuun otetaan myös huomioon pinta-  
vastukset  $R_{si}$  ja  $R_{se}$ . Taulukossa 1 on määritetty pintavastuksien arvot.

*Taulukko 1 Pintavastukset [4].*

Pintavastus $\text{m}^2 \text{K/W}$	Lämpövirran suunta		
	Ylöspäin	Vaakasuoraan	Alaspäin
sisäpuolen pintavastus ( $R_{si}$ )	0,10	0,13	0,17
ulkopuolen pintavastus ( $R_{se}$ )	0,04	0,04	0,04

Pintavastuksen suuruudessa on huomioitu lämpövirran suunta.

### 2.1.2 Lämmön siirtyminen säteilemällä

Kaikki kappaleet, joiden lämpötila ylittää absoluuttisen nollapisteen ( $-273,15 \text{ }^\circ\text{C}$ ), emittoivat säteilyä. Säteilystä varattujen hiukkasten lämpöliike saa aikaan sähkömagneettista aaltoliikettä, joka siirtää energiaa valonnopeudella. [3]

Rakennustekniikassa säteilylämpö esiintyy lyhytaaltoisena auringonsäteilynä ja pitkäaaltoisena kappaleiden lähettämänä säteilynä. Säteilyn aallonpituudella on merkitystä, kun tarkastellaan rakenteiden lämmönläpäisyä. Esimerkiksi ikkuna läpäisee auringosta tulevaa lämpösäteilyä hyvin, mutta huonosti lyhytaaltoista kappaleiden lähettämää säteilyä. [1] Säteily ei tarvitse edetäkseen väliainetta. Tilanteissa, joissa säteily etenee jonkun väliaineen läpi, väliaine voi hidastaa säteilyn etenemistä. [2]

Materiaalien pintojen säteilytehoa verrataan eniten säteilyä emittoivaan mustaan kappaleeseen, jonka kokonaissäteily on [2]

$$Q_m = \sigma \cdot T^4, \quad (8)$$

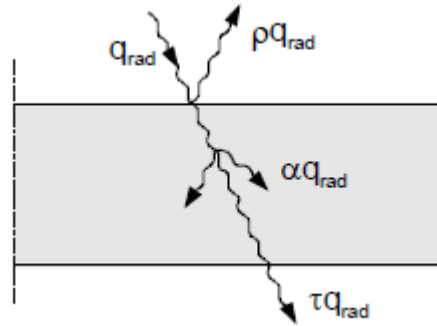
jossa  $\sigma$  on  $5,67 \cdot 10^{-8} (\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$  ja  $T$  on kappaleen lämpötila.

Koska todellisten pintojen säteilyteho  $Q_s$  on pienempi kuin mustan kappaleen, voidaan laskea pinnan säteilytehon suhde mustan kappaleen säteilytehoon. Tätä suhdetta  $Q_s/Q_m$

kutsutaan emissiviteetiksi  $\varepsilon$  [3]. Emissiviteetin arvo on 0–1 [2]. Todellisen pinnan lähettämä säteilyteho saadaan kaavalla [2]

$$Q_s = \varepsilon \sigma T_s^4. \quad (9)$$

Kun säteily kohtaa materiaalin pinnan, säteilyä heijastuu, absorboituu ja osa säteilystä kulkee pinnan läpi kuvan 2 mukaisesti [2].



*Kuva 2* Säteilyn jakautuminen pinnassa [2].

Säteilyn jakautumista kolmeen eri säteilykomponenttiin kuvataan heijastuskertoimella  $\rho$ , absorptiokertoimella  $\alpha$  ja läpäisykertoimella  $\tau$ . Näiden kertoimien kesken on voimassa yhtälö [2]

$$\alpha + \rho + \tau = 1. \quad (10)$$

Rakennusfysiikassa tarkastellaan pintoja harmaina pintoina ja oletetaan, että säteily emittoituu diffuusina säteilynä niistä tasaisesti kaikkiin suuntiin. Tämän vuoksi voidaan johtaa yhtälö absorptiokertoimen ja emissiviteetin välille [3]:

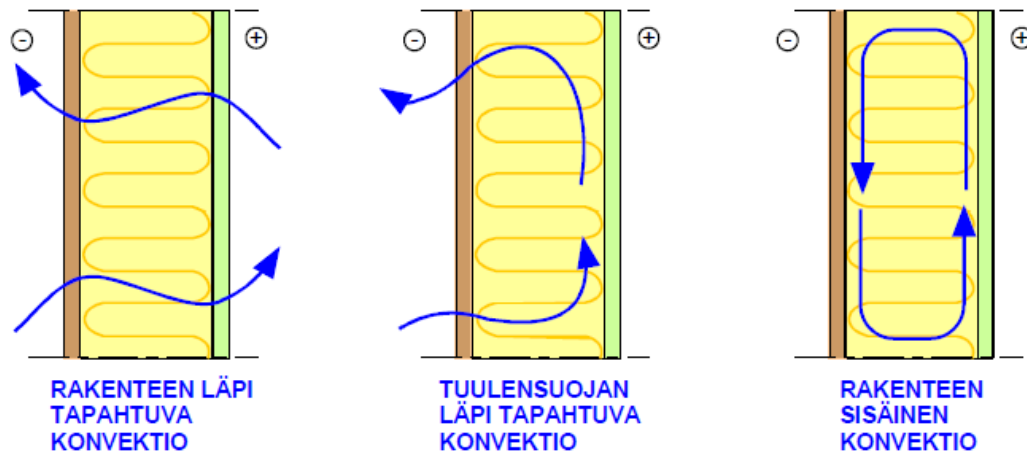
$$\alpha = \varepsilon. \quad (11)$$

Rakennusfysiikassa tarkastellut materiaalit ovat yleensä sellaisia, joilla ei ole merkittävää läpäisykerrointa. Tämän takia läpäisykerroin  $\tau$  voidaan jättää kaavasta pois. Tällöin heijastuskerroin voidaan laskea kaavalla [2]

$$\rho = 1 - \alpha. \quad (12)$$

### 2.1.3 Lämmön siirtyminen konvektiolla

Konvektiossa lämpö siirtyy nesteen ja kaasun virtauksen mukana paine-erojen vaikutuksesta [3]. Konvektio voidaan jakaa luonnolliseen ja pakotettuun konvektioon. Luonnollisessa konvektiossa ilman tiheyserot aiheuttavat ilmanpainevaihteluita, jolloin tapahtuu ilman kiertoliikkeitä [1]. Kuvassa 3 on esitetty rakenteissa tapahtuvia luonnollisia ja pakotettuja konvektiovirtauksia.



**Kuva 3** Rakenteissa tapahtuvia konvektiovirtauksia [2].

Vasemman puoleisessa tapauksessa virtaus tapahtuu sisä- ja ulkoilman välisestä paine-erosta. Ilmavirtaus pääsee rakenteen läpi, sillä ilmansulku ei ole tiivis. Keskimmaisessä tapauksessa virtaus tapahtuu tuulen vaikutuksesta. [2] Oikean puoleisessa tapauksessa ilma lämpenee sisäpuolelle mennessä, jolloin ilman tiheys pienenee. Tällöin ilma nousee ylöspäin. Ulkokuorta lähentyessä ilma kylmenee, joten ilma painuu alaspäin. Näin rakenteen sisälle syntyy ilmankiertoa, joka mukanaan siirtää lämpöä. [1]

Pakotetussa konvektiossa ilman tai nesteen siirtymisen aiheuttaa jokin ulkopuolinen voima. Näitä ovat esimerkiksi rakennuksen ilmanvaihtolaitteet, tuulen aikaansaama ilmavirtaus tai ihmisten liikkeet. [1]

Konvektiivinen lämpövirran tiheys  $q_{conv}$  ( $W/m^2$ ) materiaalin pinnasta ilmaan voidaan laskea Newtonin lain avulla seuraavasti [2]:

$$q_{conv} = \alpha_{conv} \cdot (T_s - T_a), \quad (13)$$

missä  $\alpha_{conv}$  on konvektiivinen lämmönsiirtokerroin ( $W/(m^2 \cdot K)$ ),  $T_s$  materiaalin lämpötila (K) ja  $T_a$  ympäröivän ilman lämpötila (K).

Konvektiivisen lämpökertoimen arvoon vaikuttavat ilmavirran nopeus, virtauksen suunta ja se, onko kyseessä luonnollinen vai pakotettu konvektio. Rakennusfysiikassa ulkopintaan vaikuttaa enemmän pakotettu konvektio ja sisäpintaan luonnollinen. Pakotetun konvektion lämmönsiirtokerroin kaasuille on 25–250  $W/(m^2 \cdot K)$  ja nesteille 100–20 000  $W/(m^2 \cdot K)$ . Luonnollisessa konvektiossa lämmönsiirtokerroin on kaasuille 2–25  $W/(m^2 \cdot K)$  ja nesteille 20–1 000  $W/(m^2 \cdot K)$ .

## 2.2 Kosteuden siirtyminen

Veden eri olomuotoja ovat kiinteä jää tai lumi, nestemäinen vesi ja kaasumainen vesihöyry. Kosteus tarkoittaa näitä kolmea eri veden olomuotoa ja se voi siirtyä näissä kaikissa olomuodoissa. [4]

Veden ollessa kiinteässä muodossa eli lumena tai jäänä kosteus siirtyy painovoiman vaikutuksesta alaspäin tai ilmavirtausten mukana [2]. Kapillaarisesti kosteus siirtyy huokoiseen materiaaliin sen ollessa nestemäistä. Kosteuden ollessa kaasumaisessa olomuodossa kosteus siirtyy diffuusion tai konvektion avulla. [4]

### 2.2.1 Kosteuden siirtyminen diffuusiolla

Kosteus voi siirtyä eri tilojen välillä diffuusion vaikutuksesta. Diffuusiolla tarkoitetaan ilmiötä, jossa molekyylien satunnaisesta liikkeestä johtuen pitoisuusero tasoittuu suuremmasta pitoisuudesta pienempään. Rakennusfysiikassa diffuusiolla tarkoitetaan kosteuden siirtymistä vesihöyrynä rakenteen läpi. Diffuusion suuntaan vaikuttaa tilojen välillä vallitseva vesihöyryn pitoisuusero; vesihöyry pyrkii liikkumaan kohti pienempää pitoisuutta. Yleisimmin kosteuden liikkumisen suunta on lämpimästä tilasta kylmään tilaan. Suunta voi olla myös kylmästä tilasta lämpimään, kun kylmän tilan vesihöyrypitoisuus on suurempi. [1] Diffuusiotarkasteluissa kosteusmäärää voidaan kuvata vesihöyryn pitoisuudella tai vesihöyryn osapaineena [4].

Kosteusvirran tiheys,  $g$  ( $\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ ) voidaan laskea homogeenisessä ainekerroksessa Fickin lain avulla seuraavasti [2]:

$$g = -\delta_v \nabla v = -\left(\delta_v \frac{\partial v}{\partial x}, \delta_v \frac{\partial v}{\partial y}, \delta_v \frac{\partial v}{\partial z}\right), \quad (14)$$

missä  $\delta_v$  on aineen vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuseron avulla ilmaistuna ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) ja  $x, y, z$  kosteusvirran suuntakoordinaatit (m).

Edellinen kaava voidaan esittää myös vesihöyryn osapaineiden avulla [2]:

$$g = -\delta_p \nabla p_v = -\left(\delta_p \frac{\partial p_v}{\partial x}, \delta_p \frac{\partial p_v}{\partial y}, \delta_p \frac{\partial p_v}{\partial z}\right), \quad (15)$$

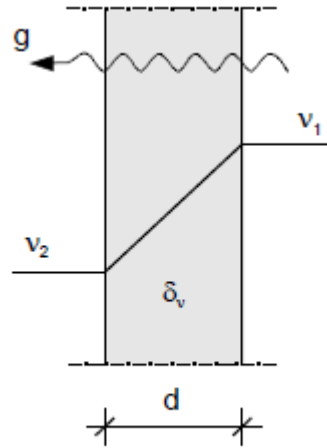
missä  $\delta_p$  on aineen vesihöyrynläpäisevyys vesihöyryn osapaine-eron avulla ilmaistuna ( $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$ ).

Yksidimensioisessa tapauksessa kaava supistuu muotoon [2]:

$$g = -\delta_v \frac{\partial v}{\partial x} \quad g = -\delta_p \frac{\partial p_v}{\partial x}. \quad (16)$$

Kun jatkuvuustilassa vesihöyrynpitoisuus on kuvan 4 mukainen, saadaan materiaalikerroksen läpi siirtyvän kosteusvirran tiheys kaavalla [2]

$$g = -\delta_v \frac{v_2 - v_1}{d} = \delta_v \frac{v_1 - v_2}{d}. \quad (17)$$



**Kuva 4** Lineaarinen vesihöyrynpitoisuusjakauma [2].

Kaavaa 17 voidaan käyttää silloin, kun vesihöyrynjakauma on lineaarinen.

### 2.2.2 Kosteuden siirtyminen konvektiolla

Vesihöyry konvektiolla tarkoitetaan kosteuden siirtymistä kaasuseoksen mukana. Kaasuseoksen, esimerkiksi ilman, sisältämä vesihöyry liikkuu ilmanpaine-eroista johtuvan ilmavirtauksen mukana. [1] Koska kosteus siirtyy ilmavirtauksien mukana, laskennalliset tarkastelut ovat analogisia lämmön konvektion kanssa. Kosteustarkastelu eroaa kuitenkin lämmönsiirron tarkastelun kanssa siten, että kosteus kondensoituu rakenteeseen, kun vesihöyrynpitoisuus saavuttaa kyllästyskosteuspitoisuuden. [2] Rakennuksissa ilmavirtauksien mukana siirtyvä vesihöyry liikkuu huokoisten ja hyvin ilmaa läpäisevien aineiden ja rakennuksissa olevien rakojen läpi [1].

Kun raon läpi siirtyvä ilmavirran tiheys  $r_a$  tunnetaan, raon läpi siirtyvä kosteusvirran tiheys  $g_{conv,abs}$  ( $kg/(m^2 \cdot s)$ ) saadaan kaavasta [2]

$$g_{conv,abs} = r_a \cdot v, \quad (18)$$

missä  $r_a$  on ilmavirrantiheys ( $m^3/(m^2 \cdot s)$ ) ja  $v$  raon läpi virtaavan ilma vesihöyrynpitoisuus ( $kg/m^3$ ).

Kun rakennuksen vaipan läpi menevän ilman tilalle tulee korvausilmaa toista kautta, saadaan kosteusvirran tiheyden nettoarvo  $g_{conv}$  ( $kg/(m^2 \cdot s)$ ) kaavalla [2]

$$g_{conv} = r_a \cdot (v_1 - v_2), \quad (19)$$

missä  $r_a$  on ilmavirrantiheys ( $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ) ja  $v_1, v_2$  vesihöyrynpitoisuudet rakenteen eri puolilla ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

Jos rakenteen vaipan välillä vallitsee lämpötilaero, voi konvektiolla siirtyvä vesihöyry kondensoitua rakenteeseen. Kun ilmavirtaus on lämpimältä puolelta kylmempään, vesihöyry kondensoituu rakenteeseen, jos [2]

$$v_i \geq v_{sat,mat(T-)}, \quad (20)$$

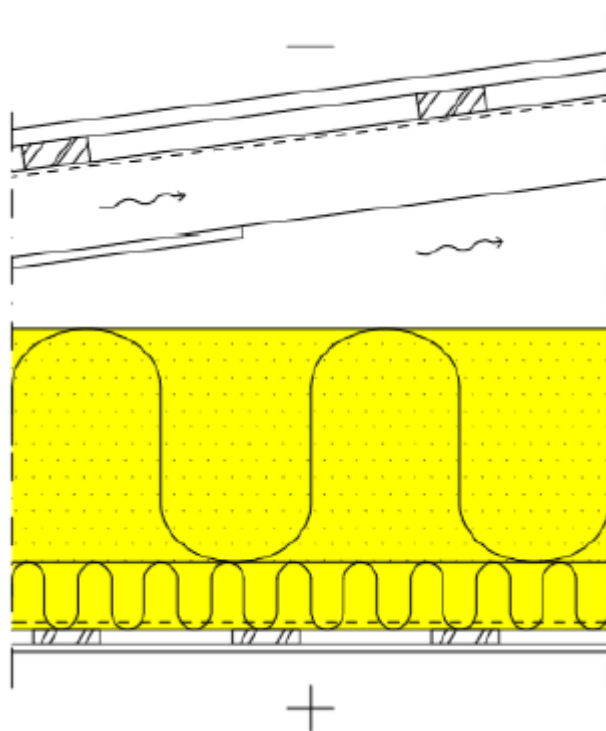
missä  $v_i$  rakenteeseen virtaavan lämpimämmän sisäilman vesihöyrynpitoisuus ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) ja  $v_{sat,mat(T-)}$  huokosilman kyllästyskosteuspitoisuus rakenteen kylmässä pinnassa ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

Jos ilmavirtaus on kylmältä puolelta lämpimään ja kylmän ilman vesihöyryn pitoisuus on pienempi kuin rakenteen sisällä olevan ilman, voi ilmavirtaus poistaa rakenteessa olevaa kosteutta. Eli ulkoilmaan yhteydessä oleva tuuletusvälissä tapahtuva konvektio voi joko kosteuttaa tai kuivattaa rakenteen sisällä olevaa ilmaa, riippuen ilmavirran suunnasta ja rakenteen yli vallitsevasta vesihöyrynpitoisuuden erosta. [2]

## 3. YLÄPOHJARAKENNE

### 3.1 Tuulettuva yläpohja

Yläpohja koostuu erilaisista kerroksista, jotka on suunniteltava siten, ettei kattoon kerry haitallista kosteutta vesihöyryn diffuusion ja ilmavirtauksien vuoksi [6]. Tyypillinen puurakenteinen yläpohja koostuu kuvan 5 mukaisesta rakenteesta. Siihen kuuluvat vesikate, ruoteet, tuuletusväli, aluskate, kantava puurakenne, tuuletustila, lämmöneriste, höyrynsulku ja rakennuslevy.



*Kuva 5 Tuulettuvan yläpohjan rakenne [6].*

Katteella tarkoitetaan vesikaton pintarakennetta, jonka tarkoitus on estää sadeveden, lunen ja sulamisveden pääseminen yläpohjan rakenteisiin [6]. Tuulen vaikutuksesta lumi voi päästä yläpohjan tuuletustilaan tuuletusaukkoja kautta. Lumen pääsyä yläpohjan tuuletustilaan voidaan estää käyttämällä ulkonevia räystäitä. [6] Katteet voidaan jakaa jatkuviin ja epäjatkuviin katteisiin. Jatkuva kate on vesitiivis, kun taas epäjatkuvassa katteessa on saumoja, jotka eivät ole vesitiiviitä. [4] Tyypillisiä katteita ovat muovi- tai bitumikermit, metalliohutlevyt ja tiilikatteet. Vesikaton ollessa epäjatkuva, suositellaan käytettäväksi aluskatetta. Aluskatteista ja niiden toiminnasta on kerrottu tarkemmin luvussa 3.3.2.

Pientaloissa yläpohjan kantavat rakenteet tehdään yleisesti puusta. Puu on kevyt ja helposti työstettävä materiaali. Puu on hygroskooppinen eli vettä imevä materiaali, joka alkaa homehtua, jos sen kosteuspitoisuus kuivapainosta pysyy pitkiä aikoja yli 20 %. Kosteuden pääseminen yläpohjarakenteeseen voi aiheuttaa puun homehtumista varsinkin riskin alapaarteissa. [9]

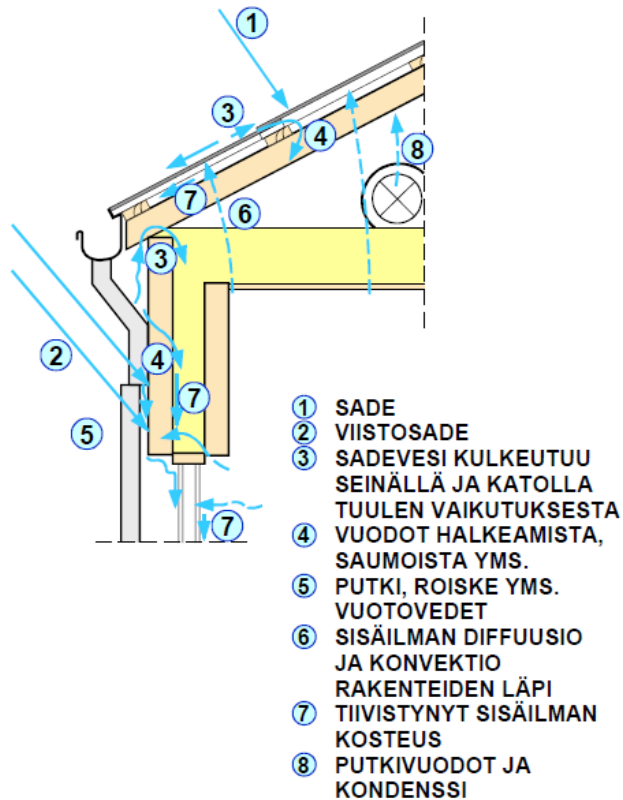
Tuulettuvassa yläpohjassa on katteen ja yläpohjan lämmöneristyksen välissä tuuletustila. Tuuletustilan ansiosta mahdollinen yläpohjan läpi tuleva sisäilman kosteus tuulettuu ulos. Myös mahdolliset katon vuotovedet tai rakennusaikainen kosteus tuulettuu tuuletustilan ilmanvaihtuvuuden avulla pois yläpohjasta. [4] Tuuletuksen merkityksestä yläpohjarakenteelle on perehdytty enemmän luvussa 3.3.1.

Jotta yläpohjaan ei siirtyisi alapuolelta kosteaa sisäilmaa, laitetaan lämmöneristeen alle höyrynsulkumuovi. Näin varmistetaan rakenteen ilmatiiviys. Höyrynsulun alle asennetaan rakennuslevy, joka tukee höyrynsulkua ja lämmöneristyskerrosta. Höyrynsulun huolellinen asentaminen ja liitosten ja lävistyskohtien tiivistys edistää rakennuksen ilmatiiviyttä. [4]

## **3.2 Yläpohjaan kohdistuvat rasitukset**

Rakennuksen yläpohja on jatkuvasti kosteusrasituksessa. Kuvaan 6 on merkitty yläpohjaan vaikuttavat kosteusrasitukset.





*Kuva 6 yläpohjan kosteusrasitukset [2].*

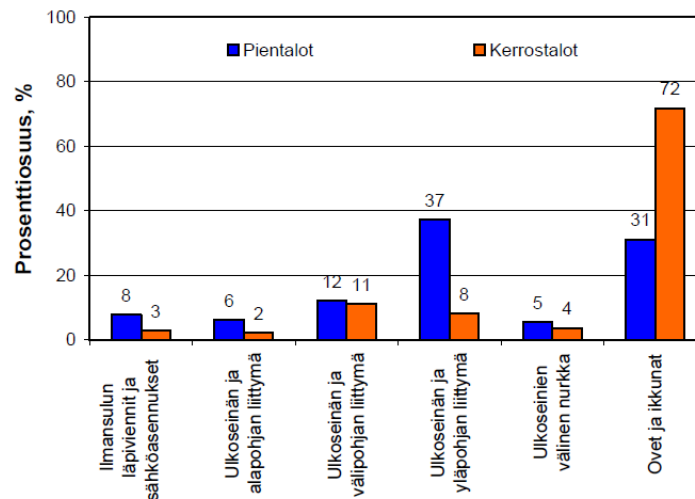
Sadevesi aiheuttaa suurimman vedenpaineen vesikattoon ja muihin vaakapintoihin. Sade voi esiintyä kolmena eri sadetyyppinä; vetenä, lumena tai räntänä. Sadetyypeistä räntä on rakennusta kaikista rasittavin, sillä se jää yleensä vaikuttamaan pitkäksi aikaa loiville ja vaakasuorille pinnoille. Suomessa yleisin sadetyyppi on pystysade, joka rasittaa eniten vaakasuoria pintoja. [1] Viistosateeksi kutsutaan sadetta, joka kohdistuu seinään. Suurissa rakennuksissa viistosade rasittaa etenkin rakennuksen yläosia ja nurkkia. Pientalojen räystäät estävät viistosateen vaikutusta rakennuksen ylänurkkiin. [3]

Lumen aiheuttamista kosteuskuormista merkittävin on lumen siirtyminen tuuletusraoista yläpohjaan ja mahdollinen sulaminen vesikaton pintaan [1]. Lumi voi myös tuiskuta sellaisiin kohtiin, joihin vesi ei pääse. Painovoimainen lumen ja veden siirtyminen aiheuttaa valtaosan rakennuksen kosteusvaurioista, sillä vettä voi siirtyä suuri määrä paikasta toiseen lyhyessäkin aikavälissä verrattuna kosteuden siirtymiseen diffuusilla tai konvektiolla [2]. Vesikaton vuodot johtuvat yleisesti huonosta suunnittelusta tai toteutuksesta. Jos vesikate ja mahdollinen aluskate ei ole kauttaaltaan vesitiiviitä, voi sadevesi päästä yläpohjan rakenteisiin ja aiheuttaa siellä kosteusvaurion. Kosteuden poistuminen yläpohjasta voi tapahtua vain haihtumalla, jolloin tuuletustila voi olla tavallista kosteampi esimerkiksi ulakollisessa yläpohjassa. [6]

Yläpohjaa rasittaa myös rakennuskosteus. Rakennuskosteudella tarkoitetaan rakentamisen aikana tai sitä ennen rakenteisiin joutunutta kosteutta. [3] Rakennuskosteus on vesimäärä, joka poistuu rakenteesta niin pitkään kunnes rakenne on kosteustasapainossa muun ympäristön kanssa. Rakennuskosteus on suurin laasteilla ja betonilla. [5]

Yläpohjaa rasittaa sisäilman diffuusio. Jos yläpohjan vesihöyrynvastus sisäpinnassa ei ole tarpeeksi suuri, voi diffuusiolla siirtyä kosteutta yläpohjarakenteeseen. Suurempi rasite rakenteeseen on yläpohjan ilmapuodot, jotka tapahtuvat yläpohjan epäjatkuvuuskohtien ja aukkojen läpi. Siirtyvän ilman kuljettama kosteuden määrä on merkittävämpi kuin sisäilmasta diffuusiolla siirtyvä kosteus. Tämän vuoksi yläpohjan ilmatiiviys on varmistettava. Taulukosta 2 voidaan huomata, että yleisimmin pientaloissa ilmapuotoja esiintyy juuri ulkoseinän ja yläpohjan liittymässä.

*Taulukko 2 Ilmapuotojen sijainti [2].*



Vuotoilman mukana liikkuva kosteus voi kondensoitua yläpohjarakenteeseen. Rakenteen kosteusrasitus voi myös kasvaa tuuletuksen vaikutuksesta, jos ulkoilman kosteuspitoisuus on suuri. [7, 8]

### 3.3 Yläpohjien kosteustekninen toiminta

Yläpohjan kosteustekniseen toimintaan vaikuttaa yläpohjan rakenneratkaisut ja valitut materiaalit. Rakenteen kosteusteknisen toiminnan varmistamiseksi rakenteet suunnitellaan siten, ettei niiden kosteuspitoisuudet aiheuta haittaa rakenteelle rakentamisen tai käytön aikana. Suunnittelussa on myös otettava huomioon mahdolliset kosteusrasitukset. [15]

### 3.3.1 Tuuletuksen merkitys

Yläpohjan tuulettamiseen vaikuttaa yläpohjassa oleva kosteuden arvioitu määrä, materiaalien kosteuden sietokyky ja arkuus kosteusvaurioille [4]. Yläpohjaan pääsee kosteutta eri lähteistä; rakennuskosteus, lumi, sadevedet, ilmavuodot ja diffuusiolla siirtyvä kosteus.

Tuuletuksen perusedellytyksenä pidetään tuulettavan ulkoilman kykyä sitoa tilasta kosteutta ja ilman vaihtumista koko yläpohjan alalta. Erityisesti talvella ulkoilman suhteellinen kosteus on korkea ja kyllästysvajaus pieni. Yläpohja tuulettuu, kun kylmä ulkoilma pääsee yläpohjaan, jolloin sen lämpötila nousee ja suhteellinen kosteus pienenee. [4]

Tuulettamista suunniteltaessa katon korkeus vaikuttaa tuuletusilman sisään- ja poistoilmakanavien sijaintiin. Kun ilma lämpenee, se nousee ylöspäin ilman keventymisen vaikutuksesta. Näin syntyy luonnollista konvektiota ja ilma lähtee virtaamaan. Ilman sisään- ja poistoilmakanavat tulee suunnitella niin, että ne sijaitsevat eri korkeudella. Ilman sisään- ja poistoilmakanava kannattaa sijoittaa selkeästi alemmas kuin poistoilmakanava. Katon ollessa loivasti kallistettu korkeuseroja ei voida järjestää. Tällaisissa rakenteissa tuulen paine-erot aiheuttavat rakenteen tuuletuksen. [4]

### 3.3.2 Aluskatteiden toiminta

Tiilikatteet ja metalliohultevykatteet ovat epäjatkuvia katteita, jolloin saumakohtien takia katteet eivät ole täysin vesitiiviitä. Tällaisten materiaalien kanssa suositellaan aina käytettäväksi aluskatetta. [4] Aluskate estää mahdollisen veden, lumen tai tiivistyvän kosteuden pääsyn yläpohjarakenteisiin. Aluskatteet voidaan jakaa kolmeen eri ryhmään; vesihöyryä läpäiseviin (diffuusioavoimiin), diffuusiotiiviisiin ja kondenssisuojattuihin aluskatteisiin.

Diffuusioavoin aluskate toimii siten, että aluskate sisältää esimerkiksi polyolefiinikuidusta valmistetun kalvon, joka läpäisee vesihöyryn, mutta pintajännityksen takia vesipisarot eivät pääse kalvon läpi. Kun vesihöyry on läpäissyt vesikatteen ja aluskatteen välissä olevan tuulettuvan kerroksen ansiosta tuulettua ulkoilmaan tai vesihöyry voi kondensoitua vesikaton alapintaan, jolloin se valuu aluskatetta pitkin pois rakenteesta. Diffuusioavoimen aluskatteen diffuusiovastuskerroin  $\mu$  on luokkaa 20–250. [4]

Diffuusiotiiviissä aluskatteessa vesihöyryn läpäisyvastus on niin suuri, ettei se päästä alhaalta ylös tulevaa vesihöyryä lävitse lainkaan tai niin vähän, ettei siitä ole rakennusfysiikkaalasta merkitystä. [4] Diffuusiotiiviitä aluskatteita ovat esimerkiksi kumibitumikermit ja muovit.

Kondenssisuojatussa aluskatteessa on alapinnassa huokoinen kerros, joka sitoo itseensä ilmassa olevan vesihöyryn. Näin aluskate estää vesihöyryn tiivistymisen aluskatteen alapintaan. Kondenssisuojattujen aluskatteiden diffuusiovastuskerroin  $\mu$  on karkeasti luokkaa 40 000–100 000 [4].

Aluskate voi olla myös lämpöä eristävä. Tällöin aluskatteen lämmönvastus on selkeästi suurempi kuin esimerkiksi pelkästä kalvosta tehdyn aluskatteen. Lämpöeristäviä aluskatteita ei toistaiseksi Suomessa vielä käytetä. Keski- Euroopassa käytetään lämpöeristävänä aluskatteena noin 30–160mm paksua huokoista puukuitulevyä, jonka lämmönjohtavuus  $\lambda$  on levyn paksuudesta ja tuotteesta riippuen 0,04–0,05 W/(mK). Lämpöä eristävät aluskatteet asennetaan yleensä suoraan lämmöneristeen päälle ja niitä käytetään jyrkissä katoissa. [4]

## 4. YLÄPOHJAN TOIMIVUUDEN KRITTEERIT

### 4.1 Tuuletusvälin ilmanvaihdon suuruus

Yläpohjan tuuletuksen tarpeeseen vaikuttaa yläpohjan eri kosteusrasitukset. Yläpohjan tuuletus auttaa poistamaan rakenteesta mahdollisen rakennusaikaisen kosteuden. Myös diffuusion yläpohjarakenteeseen siirtämä kosteus poistuu rakenteesta tuuletuksen avulla. Jos taas suurin kosteuskuorma tulee yläpohjaan ilmavuotojen mukana, tuuletuksen vaikutus voi lisätä ilmavuodon suuruutta. Tällöin ratkaisuna olisi yläpohjan ilmavuotojen tukkiminen. Jos suurin kosteuslähde on sadevesien pääsy rakenteeseen, niin ilmanvaihto auttaa rakenteen kuivumista. Sateisina päivinä voi ilmankosteus olla suurempi kuin yläpohjan tuuletusvälissä, jolloin ilmapohjan tuuletus lisää rakenteen kosteutta. Tässä tapauksessa rakenteen tuuletus huonontaa rakenteen toimivuutta. [7]

Tuuletuksen tarpeeseen vaikuttavat edellä mainitut asiat tapahtuvat yleensä samanaikaisesti, jonka vuoksi on hankala yksiselitteisesti määrittää tuuletuksen tarvetta. Ideaalitalanteessa rakenteessa olisi hyvä olla rakennusaikaisen kosteuden kuivumiskyky, rakenne olisi ilmatiivis, vesikatteissa ei olisi vuotokohtia ja rakenne sietäisi ulkoilman kosteutta. Tuulettuvassa tilassa vallitsisi sama vesihöyryn pitoisuus kuin ulkoilmassa, ja siten ilman suhteellinen kosteus määräytyisi lämpötilan perusteella. [7]

Vuosina 2009-2012 Tampereen teknillinen yliopiston rakennusfysiikan tutkimuslaitos käynnisti FRAME-tutkimushankkeen, jossa tutkittiin lämmöneristyspaksuuksien kasvattamisen sekä ilmastomuutoksen vaikutuksia rakenteiden kosteustekniseen toimintaan. FRAME-tutkimuksessa yläpohjan osalta tutkittiin yläpohjalle tulevan auringonsäteilyn, yläpohjan lämmöneristyksen määrän ja tyyppin, rakenteen sisäpinnan ja aluskatteen vesihöyryvastuksen ja lämmönvastuksen, kalvomaisen aluskatteen emissiviteetin sekä yläpohjan ilmanvaihtuvuuden vaikutusta nykyilmastossa sekä vuosien 2050 ja 2100 ilmas-  
toissa.

FRAME- tutkimuksessa tarkasteltu rakenne on harjakattoinen tuulettuva yläpohja, jossa ilma-aukot sijaitsevat räystäällä ja harjalla. Tutkimuksessa ilmeni, että tuuletuksen määrä vaikuttaa oleellisesti rakenteen toimivuuteen. [7] Yläpohjan tuuletuksen kannalta FRAME-tutkimuksessa saatiin ideaaliselle yläpohjalle ilmanvaihtuvuuden optimaalisimmaksi arvoksi noin 0,5–1 vaihtoa tunnissa (1/h). Tutkimuksen mukaan tuuletuksen lisääminen heikentäisi rakenteen kosteusteknistä toimintaa. Tutkimuksessa ei kuitenkaan oteta huomioon todellisia rakenteessa esiintyviä ilma- ja kosteusvuotoja. [7]

Hannanoora Junttila [8] on tutkinut diplomityössään pientalojen puurakenteisten tuulettuvien yläpohjien lämpö -ja kosteusteknistä toimintaa. Tutkimuksen kohteena olivat viisi yläpohjarakennetta, joista kaksi oli harjakattorakennetta ja kolme tasakattorakennetta.

Tutkimuksen tulokset ovat pääosin yhteneviä FRAME-tutkimuksen kanssa. Junttilan [8] mukaan ideaalinen, vuotamaton yläpohja ei tarvitse niin suurta ilmanvaihtoa kuin rakenne, jossa on kosteusvuotoja. Diplomityössä tasakatoille optimaaliseksi ilmanvaihdon arvoksi saatiin 2-5 1/h ja harjakatoille 0,5-1 1/h. [8]

Essah et al. [10] tekemässä tutkimuksessa ilmanvaihdon määrää rajoitettiin räystäällä sijaitsevien ilma-aukkojen kokoa muuttamalla. Tutkimuksessa havaittiin, että ilma-aukkojen teoreettinen koko 0 mm aiheutti vähiten kondensoitumista aluskatteen alapintaan. Toiseksi pienin koko 3 mm aiheutti toisaalta suurimman kondensoituvan kosteuden määrän aluskatteen alapintaan. Kun ilma-aukkojen kokoa suurennettiin tästä, kondenssikosteutta ilmeni vähemmän aluskatteen alapinnassa. [10]

Nik et al. [11] tutkivat ilmaston muutoksen vaikutusta yläpohjan kosteustekniseen toimintaan. Tutkimuksessa tarkasteltiin neljää eri ullakkoa tulevaisuuden ilmastossa. Tulokseksi saatiin, että tulevaisuuden ilmastossa koneellinen ilmanvaihto estäisi homeen kasvun yläpohjassa. Tämä toisaalta kasvattaisi rakennuksen energian kulutusta. Tutkimus myös osoittaa, että nykyisessä ilmastossa lämpöä eristävä aluskate estäisi homeen muodostumisen yläpohjaan. Toisaalta tutkimuksessa myös todetaan, ettei tämä rakenne todennäköisesti toimisi tulevaisuuden ilmastossa.

Samankaltaisia tuloksia saatiin Hagentoft et al. [12] tekemässä tutkimuksessa, jossa tarkasteltiin neljään eri tyyppistä ullakkoa ja niiden kosteusteknistä toimintaa. Tutkimuksessa todettiin, että kosteusturvallisuutta voidaan parantaa kylmäullakoilla varmistamalla ullakon lattian ilmatiiviys, huolehtimalla rakennuskosteuden poistosta ja varmistamalla, että ullakon on ylipaineinen asuntoon verrattuna. Tavanomaiset ullakot, joiden ilmanvaihto tapahtuu räystäissä, eivät ole kosteusturvallisia. Tutkimus toteaa, että lämpöä eristävä aluskate parantaa kosteusolosuhteita ullakolla. Hagentoft [12] myös korostaa, että kontrolloitu ilmastointi edellyttää kestävästä teknistä ratkaisua, joka kestää tulevaisuuden ilmasto.

Edellisten tutkimusten perusteella ilmanvaihdon suuruudella on vaikutusta rakenteen terveellisyyteen etenkin tulevaisuuden ilmastossa. Rakenteen toimintaa voidaan parantaa estämällä ilmavuodot lämpimistä tiloista, käyttämällä lämpöä eristävää aluskatetta ja huolehtimalla rakennuskosteuden poistosta. Myös ilmanvaihtokoneen käyttö ullakoilla voi tulla tarpeelliseksi tulevaisuuden ilmastossa.

## 4.2 Lämmöneristeen paksuus

U-arvon kiristyessä yläpohjaan lisätään lämmöneristettä, joka vähentää lämpöhäviötä sisäilmasta yläpohjaan. Tämä taas alentaa yläpohjan ilmatilan lämpötilaa, jolloin yläpohjan lämpötila lähenee ulkoilman lämpötilaa. Koska kylmään ilmaan mahtuu vähemmän ve-

sihöyryä, kuin lämpimään ilmaan, niin ilmavuodot lämpimästä sisäilmasta voivat kondensoitua kylmässä yläpohjassa. Toisin sanoen lämmöneristeen lisääminen yläpohjaan voi lisätä kondenssiongelmia yläpohjassa, jos yläpohja ei ole ilmatiivis.

FRAME- tutkimuksessa tutkittiin lämmöneristeen lisäämisen vaikutusta yläpohjan rakenteen toimivuuteen. Tutkimustulokseksi saatiin, että lämmöneristeen lisääminen yläpohjaan, kasvattaa homehtumisriskiä. Tutkimus myös osoitti, että lämmöneristeen kosteuskapasiteetin kasvattamisesta oli hyötyä, kun tuuletus oli vähäistä. Essah et al. [10] toteaa, että lämmöneristeen lisääminen yläpohjaan lisää kosteuden tiivistymistä ja myös pienentää lämpöhäviötä yläpohjan läpi.

Edellisten tutkimusten perusteella lämmöneristeen lisääminen yläpohjaan pienentää lämpöhäviötä yläpohjan läpi ja kylmentää yläpohjan lämpötilaa. Tutkimukset myös toteavat, että lämmöneristeen lisääminen lisää kosteuden tiivistymistä ja näin aiheuttaa homehtumisriskin. Hygroskooppisen eristeen käyttö todettiin hyödylliseksi, jos tuuletus yläpohjassa on vähäistä.

### 4.3 Aluskatteen ominaisuudet

Mahdollinen vesikatteen läpi tuleva sadevesi poistetaan johtamalla se aluskatetta pitkin pois rakenteesta. Käytön aikana aluskate estää vesikatteen alapintaan kondensoituvan veden valumisen yläpohjarakenteeseen. Aluskatteen matala vesihöyrynvastus edesauttaa rakenteeseen tulevan vesihöyryn poistumisen aluskatteen läpi. Toisaalta ulkopuolelta tuleva vesihöyry pääsee rakenteeseen helpommin. Aluskatteen lämmönvastus estää lämpövirran pääsyn rakenteesta pois, sekä kirkkaina öinä ullakkotilan jäähtymisen, mutta vastaavasti estää auringon aiheuttaman lämmön pääsemisen rakenteeseen.

FRAME-tutkimuksessa [7] tutkittiin aluskatteen merkitystä yläpohjan toimivuuteen. Tutkimuksessa tarkasteltiin lämpöä eristävän aluskatteen ja aluskatteen emissiviteetin vaikutusta yläpohjan kosteustekniseen toimintaan. Tutkimukset tehtiin varjossa olevalle rakenteelle. Tulokseksi saatiin, että matalaemissiviteettipinnan käyttäminen aluskatteen alapinnassa vähensi lämpöhäviötä lämmöneristeen yläpinnasta ulkoilmaan. Toisaalta tutkimus myös osoitti, että kosteustekniseltä kannalta tämä heikentäisi yläpohjan olosuhteita tavalliseen aluskatteeseen verrattuna. Eli tutkimuksesta voidaan todeta, ettei matalaemissiviteetti pinnan käyttämisestä ole merkittävää hyötyä rakenteessa kosteustekniseltä kannalta.

Aluskatteen vesihöyryvastuksen optimaalinen suuruus riippuu tuuletuksen määrästä. Tutkimus [7] osoitti, että aluskatteen suuri vesihöyrynvastus on tarpeellista, kun ilmanvaihtuvuus yläpohjassa on vähäistä. Vastaavasti hyvä vesihöyryn läpäisevyys todettiin tarpeelliseksi, kun ilmavaihtuvuus oli suuri. Tutkimuksen tuloksissa on suurin kosteuskuorma tullut ulkoa tuuletuksen mukana, eli todellisia rakenteessa esiintyviä ilma- ja kosteusvuotoja ei tutkimuksessa otettu huomioon. Tutkimus osoitti, että lämpöä eristävän aluskatteen käyttö oli kaikilla yläpohjan ilmanvaihtuvuuksilla järkevää. Tutkimuksessa

saatiin aluskatteen lämmönvastuksen suosittelu arvoksi 0,4-0,6 m<sup>2</sup>K/W. Tämä tarkoittaisi noin 20-30mm paksuista lämmöneristyslevyä, joka peittäisi yläpohjan kauttaaltaan. Esah et al. [10] toteaa, että kondensoituneen kosteuden määrä oli suurempi bitumialuskatteella kuin vesihöyryä hyvin läpäisevällä aluskatteella. Yläpohjan ilmavuodot aiheuttivat kondenssia sekä läpäisevän että tiiviin aluskatteen alapinnassa 2.2-4,6 kg/m<sup>2</sup>.

Edellisten tutkimusten perusteella lämpöä eristävän aluskatteen käyttö todettiin hyödylliseksi yläpohjan eri ilmanvaihtuvuuksilla. Aluskatteen optimaalinen vesihöyrynvastuksen suuruus riippuu yläpohjan tuuletuksen määrästä.

#### 4.4 Höyrynsulun ominaisuudet

Höyrynsululla estetään sisäilman diffuusion pääsy yläpohjaan ja höyrynsulku tekee yläpohjasta ilmatiiviin. Höyrynsulun höyrynvastuksen suuruus vaikuttaa rakenteen kosteuden läpäisevyyteen. Höyrynsulku estää kosteuden siirtymisen myös rakenteesta ja yläpohjan ilmatilasta sisäilmaan. Markkinoilla on myös niin sanottua älyhöyrynsulkumuovia (smartvapour barrier), jossa höyrynsulku päästää yläpohjarakenteen kosteuden kuivumaan myös sisälle. Tämän kaltainen rakenne sopisi hyvin sellaisille rakenteille, jossa ei ole mahdollisuutta kuivua ulkoilmaan. Esimerkkinä heikosti tuulettuva yläpohja.

Älyhöyrynsulkumuovit toimivat suurimman osan ajasta kuten normaali tiivis höyrynsulku estämällä vesihöyryä diffuusion sisäilmasta rakenteeseen. Jos rakenteen suhteellinen kosteus nousee, höyrynsulku päästää kosteutta siirtymään kohti pienempää pitoisuutta, esimerkiksi sisäilmaan. [13] Älyhöyrynsulkumuovi tuotteet jakaantuvat höyrynvastuksen suuruuden mukaan. Höyrynsulut, joissa on suurempi vesihöyrynvastus, vähentävät talvella kosteuden pääsyä rakenteeseen. Höyrynsulut, joissa on matalampi höyrynvastus, nopeuttavat kosteuden kuivumista sisäilmaan kesäisin.

Geving et al. [13] ovat tutkineet älyhöyrynsulun vaikutusta tuulettumattoman yläpohjan kosteustekniseen toimintaan. Tutkimuksessa verrattiin eri älyhöyrynsulkumuovien vesihöyrynvastusta talviolosuhteissa. Tutkimus toteutettiin seuraamalla kondensoituneen veden määrää eri höyrynsulkumuoveja käytettäessä. Ideaalisessa tilanteessa höyrynsulkumuovi on vesihöyryä läpäisevä kesällä, jotta eristetila kuivuisi. Kuitenkin talvella vesihöyrynvastus pitää olla mahdollisimman korkea, jotta vältytään kondensaatio-ongelmilta. Tutkimuksessa tutkittiin neljää eri älyhöyrynsulkumuovia, joista yksi älyhöyrynsulkumuoveista vastasi toiminnaltaan parhaiten ideaalisen älyhöyrynsulkumuovien toimintaa. [13]



## 5. HEIKOSTI TUULETTUVA YLÄPOHJA

### 5.1 Heikosti tuulettuvan yläpohjan toimivuuden kriteerit

Useissa yläpohjaa koskevissa tutkimuksissa on tutkittu, miten yläpohjan rakenne toimii tulevaisuuden ilmastossa, mikäli ilmastonmuutos tapahtuu. Ilmastonmuutoksen tapahtuessa on todettu ilmaston muuttuvan sateisemmäksi, lämpimämmäksi ja suhteellisen kosteuden kasvavan. [7][16] Myös U-arvon kiristymisen myötä eristyksen määrää on jouduttu kasvattamaan, jolloin yläpohjan ilmatilan lämpötila on laskenut. Tällöin pienetkin kosteusvuodot yläpohjassa tai epäjatkuvuuskohdat höyrynsulussa voivat aiheuttaa kosteusvaurioita tai mikrobikasvuston muodostumista. [7]

Vinha et al. [7] toteaa tutkimuksessaan, että kohtalaisen pieni tuuletus yläpohjassa parantaisi yläpohjan olosuhteita, jos yläpohjaan ei kohdistu ylimääräistä kosteusrasitusta. Toisaalta Vinha et al. [7] ei sitä suosittelen, koska jos ilmanvuotoja tai kosteuden kertymistä tapahtuu kosteus ei pääse tuulettumaan. Myös Essah et al. [10] toteaa, että ilma-aukkojen koko 0 mm kerrytti vähiten kondensoituvaa kosteutta yläpohjaan. Vastaavanlainen tulos saatiin myös Junttilan diplomityössä. Junttila [8] kuitenkin korostaa, ettei tuuletuksen määrää voitaisi laskea alle 0,5 l/h. FRAME- tutkimuksessa oletettiin, että rakenteeseen ainoa kosteuskuorma tulee ulkoilmasta tuuletuksen mukana, jolloin rakennetta rasittavia muita mahdollisia ilma- ja kosteusvuotoja ei tarkasteltu. Toisaalta Junttilan tutkimuksessa tarkasteltiin rakenteen toimivuutta, kun rakenteessa oli ilma- ja kosteusvuotoja. Edellä mainituista tutkimuksista voidaan päätellä, että kosteuskuormituksen alaisena oleva yläpohja vaatisi tuulettuvan kerroksen, mutta heikko tuuletus voi toimia, jos rakenteen ainoa kosteuslähde on tuuletusilman mukana tuleva kosteus. Johtopäätökseksi saadaan, että heikko tuuletus voidaan toteuttaa silloin, kun ylimääräistä kosteutta ei pääse rakenteeseen.

Ruotsissa tehdyt tutkimukset [12] [11] taas osoittivat, että koneellinen tuuletus estää kosteusvauriot ja mikrobiongelmat ullakoilla. Koneellinen ilmastointi mahdollistaisi tuuletuksen suuruuden vaihtelun tilanteen mukaan, jolloin voidaan hallita kosteuden kuivumista, eikä liiallista tuuletusta myöskään tapahtuisi. Koneellinen tuuletus lisää kuitenkin Nik et al. [11] mukaan energian kulutusta ja konetta käytettäessä on riskinä koneen toimintahäiriöt. Lisäksi koneet vaativat huoltoa ja niiden toimintaa on valvottava.

Junttilan työssä tutkittiin kahta erilaista rakennetta; harjakattoa ja tasakattoa. Junttila [8] toteaa työssään, että optimaalinen tuuletuksen määrä tasakatoille olisi 2–2.5 l/h, joka on siis huomattavasti suurempi kuin harjakatoissa. Tutkimus osoittaa, että tasakatot vaativat suuremman tuuletuksen, kuin harjakatot, jolloin heikko tuuletus ei Junttilan tutkimuksen perusteella toimisi tasakatoissa.

Vinha et al. [7] toteaa, että tuulettumaton rakenne ei ole kannattava, sillä rakenteeseen pääsevällä kosteudella ei ole mahdollisuutta kuivua ulkoilmaan. Geving et al. [13] on tutkinut älyhöyrinsulkumuovoin toimivuutta tuulettumattoman yläpohjan kanssa. Geving et al. [13] väittää, että älyhöyrinsulku olisi hyvä ratkaisu rakenteissa, joihin ei voida järjestää tuuletusta ulkoilmaan. Tarkoitus on, että älyhöyrinsulku toimii talvisin kuten normaali höyrinsulku ja estää sisäilman kosteuden pääsyn rakenteeseen. Kesäisin se taas päästää mahdollisen yläpohjassa olevan kosteuden kuivumaan sisäilmaan. Toisaalta kesäisin ikkunoiden auki pitäminen on yleistä, jolloin sisäilman kosteus on periaatteessa yhtä suuri kuin ulkoilman. Lämpötila ulkona on harvoin suurempi kuin sisällä [14]. Normaalioloissa kuivumista sisäilmaan ei siis tapahdu, sillä kosteuden määrät ovat yhtä suuret sisällä ja ulkona. Ylimääräisen kosteuden päästessä rakenteeseen, sisäilman ja rakenteen välillä vallitsisi kosteusero, joka tasoittuisi kosteuden siirtyessä sisäilmaan. Älyhöyrinsulku toimisi vain siinä tapauksessa, kun yläpohjassa on ylimääräistä kosteutta.

Vinha et al. [7] tutki myös aluskatteen vesihöyryn vastuksen vaikutusta tuuletuksen tarpeeseen. Tulokseksi saatiin, että tuuletuksen määrän pienentyessä on aluskatteen vesihöyryn vastuksen suurennuttava. Heikosti tuulettuvan rakenteen kannalta vesihöyrynvastus on oltava aluskatteessa suuri, sillä se estäisi vesihöyryn pääsyn ulkoilmasta rakenteeseen. Heikosti tuulettuvassa rakenteessa on oleellista, ettei rakenteeseen pääse kosteusliikettä mistään kosteuslähteestä.

Vinhan et al. [7] tutkimuksessa lämpöä eristävä aluskate näyttäisi myös edistävän yläpohjan kosteusteknistä toimintaa, mutta tämän kaltaisia materiaaleja suomessa ei vielä käytetä. Toisaalta Etelä-Ruotsissa ollaan käytetty lämpöeristävää aluskatetta, ja tutkimukset ovat todenneet sen olevan nykyilmastoon hyödyllinen [12]. Toisaalta taas Nik et al. [7] toteaa, ettei lämpöä eristävä aluskate estä mikrobikasvustoa tulevaisuuden ilmastossa. Lämpöä eristäviä aluskatteita ei ole diffuusiotiiviinä vielä markkinoilla.

Vinha et al. [7] myös toteaa, että eristeen tulee olla hygroskooppinen, kun ilmanvaihto on vähäistä yläpohjassa. Hygroskooppinen eriste edesauttaa yläpohjan toimivuutta kosteuskuormituksen alaisena, sillä se sitoo itseensä ylimääräisen kosteuden ja haihduttaa sen itsestään pois suhteellisen kosteuden muuttuessa ympäröivässä ilmassa. Tällaiset eristeet eivät kuitenkaan sovellu kerrostalorakentamiseen, sillä ne eivät ole riittävän paloturvallisia. Joten heikosti tuulettuva rakenne voidaan toteuttaa vain pientaloissa.

## 5.2 Yläpohjarakenteen kosteusteknisen toiminnan varmistaminen

Luvussa 5.1 mainitut tutkimukset toteavat, että rakenteen pitää olla ilmatiivis, vesikaton vuodot pitää estää ja rakennusaikaisen kosteuden kuivattamisesta pitää huolehtia. Junttia [8] toteaa, että yläpohjan toiminta heikkenee, jos siihen kohdistuu ylimääräistä kosteuskuormaa. Sadevuotojen vaikutus yläpohjan toimintaan on todettu olevan suurempi kuin

yläpohjan ilmavuotojen. Junttila [8] esittää, että ilmavuodot heikentävät eniten yläpohjan rakenteen toimintaa lähellä rakenteen sisäpintaa ja sadevuodot lähellä rakenteen ulkopintaa. Vinha et al. [7] toteaa, ettei tuulettumaton rakenne toimi, jos rakenteessa on ilma- tai kosteusvuotoja. Saman kaltaisia tuloksia sai myös Nik et al. [11] ja Hagentoft [12] jotka toteavat kylmän ullakon olosuhteiden parantuvan tekemällä yläpohjasta ilmatiiviin ja varmistamalla vesikaton vedenpitävyyden.

Tutkimuksista voidaan päätellä, että heikosti tuulettuva yläpohja voi toimia kosteusteknisesti, jos rakenne olisi lähes ideaalisesti toteutettu. Tutkimukset ovat pääosin tehty yläpohjille, joihin ei olla otettu huomioon kaikkia kosteusrasituksia. Tästä voidaan todeta, että heikosti tuulettuvan yläpohjan kosteustekninen toiminta voidaan varmistaa rakentamalla mahdollisimman ideaalinen rakenne. Rakentaessa on huomioitava yläpohjan ilmatiiviyys eli höyrinsulun huolellinen asentaminen. Vesikatteen on oltava mahdollisimman vettä pitävä ja läpiviennit on rakennettava ja suunniteltava huolellisesti. Vaikka yläpohja pyritään tehdä ilmatiiviiksi, lämpöhäviötä voidaan olettaa tapahtuvan aina. Pieniä kosteusrasituksia on mahdollista hallita älyhöyrinsululla ja hygroskooppisella eristeellä.

Rakennusaikana on tärkeä pitää rakenne vedeltä suojattuna. Rakennusaikaisen kosteuden kuivumisesta pitää huolehtia ja rakentaa mahdollisimman kuivasta rakennustavarasta. Sisäilman diffuusion siirtämä kosteuden pääsy yläpohjaan on estettävä höyrinsululla. Höyrinsulku tekee myös yläpohjasta ilmatiiviin, jolloin sinne ei pääse kosteutta ilman mukana. Ruosteenojan [16] mukaan ilmastonmuutoksen vaikutuksesta vesisateet kasvavat, joten vesikaton kosteusrasitukset kasvavat, jolloin katto vaatii tarpeeksi suuren kaltevuuden tai veden poistosta katolta pitää huolehtia muulla keinoin. On myös huomioitava, ettei katossa ole kohtia, joissa vesi tai lumi pääsee patoutumaan. Katon saumakohdista pitää tehdä myös mahdollisimman tiiviit, jotta vesi ei pääse saumakohtien läpi yläpohjarakenteeseen. Ulkoilman suhteellisen kosteuden kasvaessa ilmaston muutoksen myötä [16], heikosti tuulettuvaan yläpohjaan ei tapahdu kosteusrasitusta tuuletuksen mukana. Jos kosteutta pääsee rakenteeseen käytön aikana, esimerkiksi vesikatteen vuodoista, rakenteeseen pääsevä kosteus imeytyy hygroskooppiseen eristeeseen. Hygroskooppinen eriste ei kuitenkaan voi sitoa vettä loputtomiin, joten rakenteen kuivana pysymisestä on huolehdittava.

## 6. YHTEENVETO

Tämän kandidaattityön tavoitteena oli löytää heikosti tuulettuvalle yläpohjalle kosteusteknisen toimivuuden kriteerit ja tarkastella rakenteen toimivuutta kosteusrasituksessa. Tutkimuksessa tarkasteltiin yläpohjan ilmanvaihdon määrää, aluskatteiden ominaisuuksia, eristeen paksuutta ja höyrynsulun vaikutusta yläpohjan kosteustekniseen toimintaan.

Tutkimuksen tulokseksi saatiin, että heikosti tuulettuva yläpohja voi toimia kosteusteknisesti, jos rakenne olisi lähes ideaalisesti toimiva. Rakentamisessa pitää ottaa huomioon yläpohjan ilmatiiviynen varmistaminen, höyrynsulun asentaminen oikeaoppisesti ja vesikatkon huolellinen rakentaminen. Ylimääräisen kosteuden pääseminen rakenteeseen tulisi estää. Kosteuden päästessä heikosti tuulettuvaan yläpohjaan, tulee rakenteessa olla hygroskooppinen eriste, joka sitoo rakenteesta veden ja vapauttaa sen vesihöyrynä ilmaan ympärillä olevan ilman suhteellisen kosteuden muuttuessa. Mahdollisen vesihöyryn päästyä rakenteeseen, kosteus tuulettuu sisäilmaan älyhöyrynsulun avulla.

Heikosti tuulettuvan yläpohjan rakentamisessa tulee kiinnittää erityistä huomiota materiaalien valintaan ja rakenteen ilma- ja kosteustiiviuteen. Jotta rakennetta voidaan toteuttaa, pitäisi rakenteelle tehdä kosteustekninen tarkastelu mallintamalla. Myös rakenteen toimintaa tulisi tutkia käytännössä eri vuoden aikoina ja eri ilmastoissa. Rakenteen kosteuden sietokykyyn tulisi kiinnittää huomiota ja tarkasteltava rakenteen kosteusteknistä toimintaa vikatilanteissa. Rakenteelle on myös hyvä tehdä homemallintaminen, jossa karroitetaan mikrobikasvuston synnylle otolliset olosuhteet. Myös hygroskooppisen eristeen kosteuden sietokykyä tulisi tarkastella. Älyhöyrynsulku tuotteille tulisi tehdä tarkempaa tutkimusta ja varmistaa niiden käyttäytyminen talvi- ja kesäaikoina.

## LÄHTEET

- [1] Siikanen U, Rakennusfysiikka – Perusteet ja sovelluksia, Rakennustieto Oy, Helsinki 2014, 256 s
- [2] Vinha J, Rakennusfysiikka opintomoniste, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere 2011, 767 s.
- [3] Björkholtz D, Lämpö ja kosteus- Rakennusfysiikka, Rakennustieto Oy, Helsinki 1997, 150 s.
- [4] RIL 255-1-2014. Rakennusfysiikka 1, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Helsinki 2014, 481 s.
- [5] Rafnet, Rakennusfysiikka rakennusinsinööreille osa L ja K, 2004
- [6] RakMK C2, Kosteus rakentamisessa, Ympäristöministeriö, 1999
- [7] 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. ja Palolahti, T. Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tutkimusraportti 159., Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Rakennetekniikka, Tampere2013. 354 s.
- [8] Junttila H, Pientalojen puurakenteisten tuulettuvien yläpohjien lämpö- ja kosteustekninen toiminta, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikanlaitos, Tampere 2015, 106 s.
- [9] Puutavaran kosteus, verkkosivu saatavilla: <https://www.puuinfo.fi/node/1503>.
- [10] Essah E, Modelling and measurements of airflow and ventilation within domestic pitched roof. PhD thesis, Glasgow Caledonian University 2009.
- [11] Nik V, Kalagasidis A, Kjellström E, Assessment of hygrothermal performance and mould growth risk in ventilated attics in respect to possible climate changes in Sweden, Chalmers University Of Technology, Sweden 2012.

- [12] Hagentoft C, Kalagasidis A, Moisture safe cold attics - Assessment based on risk analyses of performance and cost, Chalmers University Of Technology, Sweden 2014.
- [13] Geving S, Thorsrud E, The performance of unventilated wooden roofs with smart vapour barriers during winter conditions, Norwegian University of Science and Technology, Norway 2014.
- [14] Kesätilastot, verkkosivu saatavilla, <http://ilmatieteenlaitos.fi/kesatilastot>
- [15] Rakenteiden kosteusteknisen toiminnan varmistaminen, verkkosivu saatavilla, <http://www.kosteudenhallinta.fi/index.php/fi/rakennushankkeen-vaiheet/rakennussuunnittelu/rakenteiden-kosteusteknisen-toiminnan-varmistaminen>
- [16] Ruosteenoja, K. Maailmanlaajuisiin ilmastomalleihin perustuvia lämpötila- ja sademääräskenaarioita. Sektoritutkimusohjelman ilmastoskenaariot (SETUKLIM) 1. osahanke. Ilmatieteen laitos. 2013 15 s.