

INSINÖÖRITOIMISTO RENOVATEK OY

korjausrakentamisen tutkimus- ja suunnittelupalvelut

Suomen Rakennussaumausyhdistys ry

Julkisivusaumojen vaurioitumisen vaikutus taloyhtiön energiankulutukseen

Projekti R19153
Raportti nro. 19153.1
27.9.2019

www.renovatek.fi



Julkisivusaumojen vaurioitumisen vaikutus taloyhtiön energiankulutukseen

24 s. + 1 liites.

Työn tilaaja

Suomen Rakennussaumaosyhdystys ry
Anton Panschin
anton.panschin@saumalaakso.fi
puh. 0400 165 579

Tehtävän kuvaus

Tarkastella laskennallisesti elementtikerrostalojen betonisandwich-rakenteiden saumojen vaurioitumisen vaikutusta rakennuksen energiankulutukseen

Toteutusajankohta

17.6.2019 – 27.9.2019

Tutkimuskonsultti

Insinööritoimisto Renovatek
Korkeakoulunkatu 1
33720 Tampere
info@renovatek.fi
www.renovatek.fi

Yhteyshenkilönne

Projektipäällikkö Anssi Laukkarinen
anssi.laukkarinen@renovatek.fi
puh. 050 917 9988

Raportin jakelu

Tilaaaja, pdf
Tutkimuskonsultin arkisto, pdf

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. PERUSTEORIA BETONISANDWICH-SEINIEN LÄMPÖHÄVIÖISTÄ	1
2.1. JOHTUMISLÄMPÖHÄVIÖT RAKENTEIDEN LÄPI.....	1
2.2. LÄMMÖNERISTEIDEN LÄMMÖNJOHTAVUUS	3
2.3. VIISTOSATEEN MÄÄRÄ JULKISIVUILLE	5
2.4. VIISTOSATEEN RAKENTEITA RASITTAVA OSUUS.....	7
2.5. LÄMPÖHÄVIÖIDEN MUUTOS USEAN VUODEN AJANJAKSON AIKANA	8
3. TARKASTELTAVAT TAPAUKSET	11
3.1. RAKENNUS JA SEN YMPÄRISTÖ	11
3.2. SAUMOJEN VAURIOITUMISTILANTEET	12
3.3. YHTEENVETO LASKELMISSA KÄYTETYISTÄ MUUTTUJISTA	13
4. TULOKSET.....	14
4.1. VIISTOSATEEN MÄÄRÄ.....	14
4.2. KOSTEUSPITOISUUDEN NOUSU JA LÄMMÖNJOHTAVUUDEN MUUTOS LÄMMÖNERISTEKERROKSESSA	16
4.3. ENERGIANKULUTUKSEN KASVU	18
4.4. ENERGIANKULUTUKSEN KASVU USEAN VUODEN AJANJAKSON AIKANA.....	21
5. JOHTOPÄÄTÖKSET	22

1. JOHDANTO

Betonisandwich-elementtien käyttäminen on yksi keskeisistä rakentamistavoista Suomessa. Näissä rakenteissa betoninen ulkokuori muodostaa yhtenäisen pinnan ulkoilman tuulisuus- ja viistosadeoloja vastaan, mutta julkisivussa olevien saumojen tiivyydestä ja tiivistämisestä tulee huolehtia erikseen. Betonisandwich-elementtien saumat eivät itsessään ole tiiviitä tuulen ja viistosateen vaikutuksia vastaan, joten betonielementtien keskinäiset sekä ikkuna- ja ovisaumat tulee tiivistää tarkoitukseen sopivilla saumausaineilla ja -tuotteilla. Saumaustarvikkeiden ominaisuudet kuitenkin heikkenevät ajan ja ulkoilman rasitusten vaikutuksista, jolloin saumojen ilma- ja sadevesitiiveys heikkenevät ja betonisandwich-rakenteeseen kohdistuvat rakennusfysikaaliset kuormitukset kasvavat. Näiden tekijöiden seurauksena rakenteen kosteustekninen toimivuus heikkenee ja lämpöhäviöt rakenteen läpi kasvavat uuden rakenteen ominaisuuksiin verrattuna.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on arvioida laskennallisesti mineraalivillaeristetyn betonisandwich-rakenteen elementtisaumojen vaurioitumisen vaikutusta asuinkerrostalon energiankulutukseen. Tulosten tarkoituksena on mahdollistaa taloyhtiön julkisivujen saumojen korjaamisen kannattavuuden arviointi energiatehokkuuden näkökulmasta.

2. PERUSTEORIA BETONISANDWICH-SEINIEN LÄMPÖHÄVIÖISTÄ

2.1. Johtumislämpöhäviöt rakenteiden läpi

Tässä selvityksessä käytettävä rakenteiden lämpöhäviöiden laskenta perustuu standardeihin SFS-EN ISO 6946 [1] ja SFS-EN ISO 10456 [2].

Homogeenisista materiaalikerroksista koostuvan betonisandwich-rakenteen korjaamaton U-arvo lasketaan seuraavasti:

$$U = \frac{1}{R_s + R_{bet} + R_{eriste}} \quad (1)$$

jossa

R_s sisältää rakenteen sisä- ja ulkopinnan pintavastukset, m^2K/W

R_{bet} sisältää teräsbetonista valmistetun sisä- ja ulkokuoren lämmönvastuksen, m^2K/W

R_{eriste} on lämmöneristekerroksen lämmönvastus, m^2K/W .

Sisä- ja ulkopinnan pintavastusten taulukkoarvot ovat yhteensä $0,13 m^2K/W + 0,04 m^2K/W = 0,17 m^2K/W$.

Teräsbetonisten sisä- ja ulkokuorten yhteenlaskettu paksuus on tyypillisesti välillä $0,14–0,23 m$, jolloin niiden yhteenlaskettu lämmönvastus on välillä $0,061–0,10 m^2K/W$, kun teräsbetonin lämmönjohtavuus on $2,3 W/(mK)$.

Vastaavasti taas $90–240 mm$ paksun lämmöneristekerroksen lämmönvastus on välillä $2,00–6,86 m^2K/W$, kun lämmöneristeen lämmönjohtavuus on välillä $0,035–0,045 W/(mK)$. Lämmöneristekerroksen lämmönvastus on siis betonisandwich-rakenteessa noin $8–30$ -kertainen verrattuna rakenteen muiden kerrosten lämmönvastukseen. Rakenteen lopullinen, ns. korjattu U-arvo lasketaan rakenteen korjaamattoman U-arvon sekä U-arvon korjaustermin summana. Standardin SFS-EN ISO 6946 mukaan laskettaessa betonisandwich-

rakenteen U-arvon korjaustermi sisältää vain sisä- ja ulkokuoren mekaaniset kiinnikkeet, jotka on valmistettu eri vuosikymmenillä hieman toisistaan poikkeavilla tavoilla. Koska mekaanisten kiinnikkeiden korjaustermin laskennassa saumojen vaurioituminen vaikuttaa vain rakenteen eri lämmönvastusten osamäärään, ovat sen muutokset pieniä muiden suureiden rinnalla. U-arvon mekaanisista kiinnikkeistä aiheutuva korjaustermi on näin ollen oletettu eri tapauksissa vakioksi ja jätetty eri tapauksia vertailtaessa laskelmista pois.

Uudempien betonisandwich-rakenteiden lämmöneristekerroksessa käytetään usein tuuletusuritusta edistämään rakenteeseen päätyneen ylimääräisen kosteuden kuivumista, mutta vanhemmissa rakenteissa näitä ei ole ollut käytössä. Nyt käsiteltävissä laskelmissa on tehty oletus, että lämmöneristekerroksessa ei ole tuuletusuritusta, vaan että lämmöneristekerros voidaan käsitellä yksiaineisena homogeenisena ainekerroksena.

Lämpövirta rakennuksen ulkovaipan yli lasketaan U-arvoja sekä viivamaisia ja pistemäisiä lisäkonduktansseja käytettäessä seuraavasti:

$$H_{joht} = \sum_i U_i A_i + \sum_j \psi_j L_j + \sum_k \chi_k n_k \quad (2)$$

jossa

- H_{joht} on johtumisen ominaislämpöhäviö ulkovaipan läpi, W/K
- U_i, A_i ovat kunkin ulkovaipan pinta-alaosion U-arvot ja pinta-alat, W/(m²K) ja m²
- ψ_j, L_j ovat rakenneosien viivamaisiin liitoksiin liittyvät lisäkonduktanssit ja niiden pituudet, W/(mK) ja m
- χ_k, n_k ovat rakenneosien pistemäisiin liitoksiin liittyvät lisäkonduktanssit ja niiden lukumäärät, W/K ja -.

Ulkovaipan johtumisen ominaislämpöhäviöstä saadaan laskettua rakenneosien läpi siirtynyt lämpöenergia kertomalla ominaislämpöhäviö rakenneosan yli vallitsevalla lämpötilaerolla ja ajanjakson pituudella. Tällöin laskentajakson pituuden tulee olla niin pitkä (tyypillisesti kuukausi), että rakenteen lämpökapasiteetti ei vaikuta olennaisesti laskentatuloksiin, vaan U-arvo ja lisäkonduktanssit kuvaavat keskimääräistä lämpövirtaa rakenteen läpi.

Johtumislämpöhäviöiden kasvusta aiheutuva energiankulutuksen muutos saadaan laskettua seuraavasti:

$$\Delta Q_{joht} = \sum_{j=1}^{12} (H_{joht,2,j} - H_{joht,1,j}) \cdot \Delta T_j \cdot \Delta t_j \quad (3)$$

jossa

- ΔQ_{joht} on tilojen lämmitysenergiantarpeen kasvu vuodessa, kWh
- $H_{joht,2}, H_{joht,1}$ ovat muuttuneen tilanteen ja vertailutilanteen mukaiset tilojen ominaislämpöhäviöt, W/K
- ΔT_j on lämpötilaero sisä- ja ulkoilman välillä ajanjaksolla j , K
- Δt_j on ajanjakson j pituus, h

Kaavassa (3) oleva termi $\Delta T \Delta t$ vastaa lämmitystarvelukua (lämmityksen astetuntien summaa), joka Suomessa on perinteisesti laskettu käyttäen 17 °C sisälämpötilaa [3]. Tätä sisälämpötilaa on käytetty myös nyt käsiteltävissä laskelmissa. Sisälämpötila 17 °C ei kuvaa suoraan rakennusten huonelämpötilaa, vaan

rakennuksen lämmitysjärjestelmän rakennukseen luovuttaman energian määrää. Koska tämän raportin laskelmissa ei ole tehty erikseen sisäisten lämpökuormien (henkilöt, laitteet, auringonsäteily) laskentaa, on niiden lämmitysenergiankulutusta pienentävä vaikutus otettu huomioon käyttämällä edellä mainittua matalampaa 17 °C sisäilman laskentalämpötilaa. Jos rakennuksen huonetilojen lämpötila on korkeampi kuin tavanomainen 21 °C nimellisarvo, niin tällöin laskennassa olisi perusteltua nostaa 17 °C lämpötilaa samalla määrällä. Kaavan (3) mukaisessa tilanteessa rakennuksen energiankulutus on suoraan verrannollinen sisä- ja ulkoilman väliseen lämpötilaeroon, mutta tätä testattiin lyhyesti lopullisten laskelmien valmistuttua (luku 4.3).

Suomalaisten asuinkerrostalojen kaukolämmönkulutus on suuruusluokkaa 150–250 kWh/(m²,a), riippuen muun muassa rakennuksen maantieteellisestä sijainnista ja sen käytöstä [4; 5, luku 3; 6, s. 82].

Kosteuspitoisuuden kasvu kasvattaa rakenteen lämpökapasiteettia, mikä teoriassa pienentää tilojen jäähdystarvetta kesällä. Varsinkaan vanhemmissa asuinkerrostaloissa erillistä tilojen jäähdytystä ei kuitenkaan yleensä ole, minkä lisäksi jäähdytyksen energiankulutus on nykyisissä ilmasto-olosuhteissa usein selvästi lämmitysenergiankulutusta pienempi. Näiden lisäksi sisätilojen lämpökapasiteettiin vaikuttaa ensisijaisesti huonetilojen kalusteet ja rakenteen sisäpinnat, kun taas kosteuspitoisuuden kasvu tapahtuu ensisijaisesti rakenteen lämmöneristekerroksessa sekä sen ulkopuolisissa rakenneosissa. Kosteuspitoisuuden kasvusta aiheutuvan ominaislämpökapasiteetin kasvun vaikutukset arvioitiin kokonaisuutena pieniksi ja jätettiin tarkasteluista pois.

Johtumislämpöhäviöiden lisäksi vaipan lämpöhäviöihin vaikuttavat myös ilmavuodot rakenteiden läpi ja ilmapirtaukset lämmöneristekerroksessa. Rakennuksen ilmatiiviyden muuttuminen betonisandwich-elementtien julkisivusaumojen kunnon heikentyessä ja samalla ilmapirtausten kasvu lämmöneristekerroksessa ovat kuitenkin laajempia kysymyksiä, joiden arviointi on rajattu tämän selvityksen ulkopuolelle.

2.2. Lämmöneristeiden lämmönjohtavuus

Rakennusmateriaalien lämmönjohtavuus on tehollinen arvo, joka pitää sisällään kaikki lämmön siirtymismuodot. Koska nestemäisen veden lämmönjohtavuus 0,60 W/(mK) on korkeampi kuin esimerkiksi kuivan lämmöneristeen lämmönjohtavuus 0,035–0,045 W/(mK), kasvattaa lämmöneristeen kastuminen (kosteuspitoisuuden nousu) eristekerroksen tehollista lämmönjohtavuutta. Standardissa SFS-EN ISO 10456 on esitetty seuraava lauseke materiaalien lämmönjohtavuuden muuttumiselle lämmöneristekerroksen keskilämpötilan, kosteuspitoisuuden ja ikääntymisen seurauksena:

$$\lambda_2 = \lambda_1 F_T F_m F_a \quad (4)$$

$$F_m = \exp(f_\psi(\psi_2 - \psi_1)) \quad (5)$$

jossa

λ_2, λ_1 ovat loppu- ja alkutilanteen lämmönjohtavuudet, W/(mK)

$F_T F_m F_a$ ovat lämpötilan, kosteuden ja ikääntymisen muunnoskerroimet, -

f_ψ on kosteuspitoisuuden muutokseen liittyvä materiaaliominaisuusparametri, m³/m³

ψ_2, ψ_1 ovat loppu- ja alkutilanteen kosteuspitoisuudet, m³/m³

Mineraalivillan ja betonin lämmönjohtavuuksien muutoksen materiaaliparametrille f_{ψ} on annettu standardissa SFS-EN ISO 10456 arvo 4, kun kosteuspitoisuus on mineraalivillalla vähemmän kuin $0,15 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ja betonilla vähemmän kuin $0,25 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Standardin taulukon alaviitteessä on mainittu, että kyseinen menettely ei ole mineraalivillalle luotettava, jos rakenteeseen on jatkuva kosteuslähde lämmöneristeen lämpimälle puolelle. Tätä selvitystä varten on tehty oletus, että menetelmää voidaan käyttää lämmöneristeen lämmönjohtavuuden muutoksen arviointiin.

Mineraalivillaeristeiden eurooppalainen tuotestandardi SFS-EN 13162 [7] määrittelee tuotteiden lämmönjohtavuuden ilmoitettavaksi 10 °C keskilämpötilassa, joka on yksi standardin SFS-EN ISO 10456 mukaisista referenssilämpötiloista. Suomen ilmasto-olosuhteissa betonisandwich-rakenteiden keskilämpötila on ulko- ja sisäilman lämpötilan perusteella laskettuna noin $(5+21)/2 \text{ °C} = 13 \text{ °C}$ ja se ei juuri riipu lämmöneristekerroksen paksuudesta tai lämmöneristeen lämmönjohtavuudesta, koska lämmöneriste on lähes symmetrisesti keskilämpötilapisteen molemmilla puolilla. Lämmönjohtavuuden määritystilanteen ja lopullisen käyttölämpötilan välistä lämpötilaeroa ei kuitenkaan ole otettu nyt tehtävissä tarkasteluissa huomioon ($F_T = 1,0$), koska korjaus olisi sama kaikille tarkasteltaville tapauksille.

Ikääntymisen vaikutus materiaalien lämmönjohtavuuteen on oletettu pieneksi ja jätetty tarkasteluista pois ($F_a = 1,0$).

Rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa mallintavien laskentaohjelmien materiaalitetokannat ovat hyödyllisiä vertailukohtia eri materiaaliominaisuuksille. Rakennusfysikaalisiin laskentatarkasteluihin tarkoitettun WUFI-ohjelman lähdemateriaaleissa [8] on esitetty seuraava kaavamuoto materiaalin lämmönjohtavuuden riippuvuudelle kosteuspitoisuudesta.

$$\lambda_2(w) = \lambda_1 \left(1 + b \cdot \frac{w}{\rho_{mat}} \right) \quad (6)$$

jossa

λ_1, λ_2 ovat materiaalin lämmönjohtavuudet alku- ja lopputilanteessa, $\text{W}/(\text{mK})$

b on kokeellisesti määritettävä materiaaliominaisuus, joka kuvaa lämmönjohtavuuden muuttumista kosteuspitoisuuden funktiona, $1/(\text{kg}/\text{kg})$

w on materiaalin kosteuspitoisuus, kg/m^3

ρ_{mat} on kuivan materiaalin tiheys, kg/m^3 .

Kaavassa esiintyvä termi w/ρ_{mat} on materiaalin kosteuspitoisuus massayksikköä kohti (kg -vettä/ kg -kuivaa materiaalia).

Delphin-laskentaohjelma käyttää oletuksena seuraavaa yleisesti käytettyä lauseketta lämmönjohtavuuden riippuvuudelle materiaalin kosteuspitoisuudesta [9, s. 101]:

$$\lambda_2(w) = \lambda_1 + \lambda_{vesi} \cdot \frac{w}{\rho_{vesi}} \quad (7)$$

jossa

λ_{vesi} on nestemäisen veden lämmönjohtavuus, $0,6 \text{ W}/(\text{mK})$.

ρ_{vesi} on nestemäisen veden tiheys, $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$

Kaavassa esiintyvä termi w/ρ_{vesi} on materiaalin kosteuspitoisuus tilavuusyksikköä kohti (m^3 -vettä/ m^3 -kokonaistilavuutta kohti). Jos mineraalivillan kosteuspitoisuus kasvaa $1 \text{ kg}/m^3$, niin tällöin mineraalivillan lämmönjohtavuus kasvaa $0,0006 \text{ W}/(mK)$, joka on $1,3$ – $1,7$ % kuivan lämmöneristeen lämmönjohtavuudesta $0,035$ – $0,045 \text{ W}/(mK)$.

Asettamalla kaavojen vasemmat puolet yhtä suuriksi, huomataan jälkimmäisen kaavan olevan ensimmäisen erikoistapaus, jossa $b = \frac{\lambda_{vesi} \rho_{mat}}{\lambda_1 \rho_{vesi}}$. Mineraalivillalle kerroin b saa tällöin arvon $0,67$ – $1,37$, kun mineraalivillan lämmönjohtavuus on $0,035$ – $0,045 \text{ W}/(mK)$ ja tiheys 50 – $80 \text{ kg}/m^3$. Kun b -termistä kerrotaan lämmöneristeen tiheys pois, päädytään samoihin lämmönjohtavuuden kasvun muutosprosentteihin kosteuspitoisuutta w (kg/m^3) kohti kuin edellä. Lämmönjohtavuuden kasvun mittaustulokset voivat luonnollisesti poiketa yksinkertaisemman kaavan antamista arvoista, mitä on mahdollista ottaa huomioon b -kertoimen avulla.

WUFI-ohjelman materiaalikirjastossa mineraalivillan lämmönjohtavuuden kosteuspitoisuusriippuvuus on annettu pistepareina taulukkomuodossa. Kyseiset arvot sisältävät pienen kosteuspitoisuuden kasvualueen, jolloin materiaalin lämmönjohtavuus ei kuitenkaan vielä juurikaan kasva. Tässä tutkimuksessa on testattu kaavan (7) mukaista lineaarista mallia, mutta suurin paino on annettu kuitenkin kaavan (4) mukaiselle lämmönjohtavuuden käyttäytymiselle.

Teräsbetonin korkeammasta lämmönjohtavuudesta johtuen ulkokuoren lämmönvastuksen absoluuttinen muutos on lämmöneristekerroksen lämmönvastuksen muutokseen nähden hyvin pieni (noin 1 % mineraalivillan lämmönvastuksen muutoksesta), joten sisä- ja ulkokuoren lämmönvastus oletettiin laskelmissa vakioksi $0,10 \text{ m}^2K/W$.

2.3. Viistosateen määrä julkisivuille

Vapaa viistosade kuvaa häiriöttömästi putoavan sateen vaakakomponenttia ja se laskettiin standardin SFS-EN ISO 15927-3 [10] perusteella seuraavasti:

$$I_F = \frac{2}{9} v r^{\frac{8}{9}} \quad (8)$$

jossa

- I_F on vapaa viistosade mittaustaikojen mukaisissa sade- ja tuuliolosuhteissa, mm/h
- v on tuulen nopeus, m/s
- r on vaakapinnalle tulevan sateen määrä, mm/h

Eri ilmansuuntiin oleville julkisivuille kohdistuvaa viistosadetta laskettaessa tarvitaan pohjatiedoksi vapaan viistosateen määrä eri ilmansuuntiin. Tämä lasketaan vallitsevan tuulen suunnan ja julkisivun normaalin välisen kulman kosinin avulla. Laskennassa otetaan huomioon vain tarkasteltavan julkisivun edestä ja viistosti sivuilta (enintään 90° kulmassa) tulevan viistosateen.

Kaavamuodossa viistosateen julkisivulle tuleva normaalikomponentti lasketaan siis seuraavasti:

$$I_A = I_F \cdot \cos(D - \Theta) \quad (9)$$

jossa

- I_A on tuulen suunnan ja julkisivun normaalin suunnan huomioon ottava viistosateen määrä mittaustaikojen mukaisissa olosuhteissa, mm/h
- D on tuulen suunta pohjoisesta laskettuna (itä = 90°)
- Θ on tarkasteltavan seinän normaalin suunta pohjoisesta laskettuna (itä = 90°).

Tietyn rakennuksen seinäpinnalle osuvan viistosateen määrään vaikuttavat vapaan viistosateen määrän lisäksi tuulen nopeuden muuttuminen mittaustaikojen rakennustaikalle siirryttäessä, rakennustaikojen maastonmuodot, rakennusta viistosateelta suojaavat esteet sekä tarkastelu kohta julkisivupinnalla. Ulkoseinäpinnalle osuvan viistosateen määrä lasketaan standardin SFS-EN 15927-3 mukaan seuraavasti:

$$I_W = I_A C_R C_T O W \quad (10)$$

jossa

- I_W on seinäpinnalle osuvan viistosateen määrä, mm/h
- I_A on vapaan viistosateen määrä lentokenttäolosuhteissa, mm/h
- C_R on maaston rosoisuuskerroin, -
- C_T on rakennusta ympäröivän maaston pinnanmuotokerroin, -
- O on ympäristön suojaisuuskerroin, -
- W on rakennuksen ja seinäpinnan geometriaan liittyvä seinäkerroin, -

Lauseke sisältää siis tuulen mukana kulkevan vapaan viistosateen määrän sääaseman mukaisissa olosuhteissa, joka sitten muunnetaan rakennuksen todellisia maasto-olosuhteita kuvaavaan arvoon.

Maastoluokkaa kuvaava rosoisuuskerroin lasketaan seuraavasti:

$$C_R(z) = \begin{cases} K_R \ln\left(\frac{z}{z_0}\right), & \text{jos } z \geq z_{min} \\ C_R(z_{min}), & \text{jos } z < z_{min} \end{cases} \quad (11)$$

jossa

z on tarkastelukorkeus maanpinnasta, m

K_R, z_0, z_{min} ovat mallin kertoimia (SFS-EN 15927-3, taulukko 1).

Standardin SFS-EN 15927-3 maastoluokat I-IV vastaavat rakennusten tuulikuormia määrittävän standardin SFS-EN 1991-1-4 [11] maastoluokkia. Maaston rosoisuuskerroin mittaolosuhteissa vastaa 10 m korkeutta maastoluokassa II.

Ympäröivän maaston suojaisuuskerroin O on standardissa SFS-EN 15927-3 annettu arvoja välillä 0,2–1,0, kun etäisyys rakennuksesta sitä tarkastelukorkeudella ympäröiviin esteisiin (puusto, muut rakennukset, ym.) on 4–120 m.

2.4. Viistosateen rakenteita rasittava osuus

Viistosateen tunkeutuminen ulkoseinärakenteiden sisään on monimutkainen ilmiö, jonka laskennalliseen tarkasteluun kehitetyt laskentamallit sisältävät edelleen huomattavia yksinkertaistuksia ja epävarmuuksia. Peruslähtökohta kuitenkin on, että tuulen mukana kulkeutuvien sadepisaroiden osuessa seinäpinnan tasoon, osa roiskuu pois, osa jää julkisivupintaan ja osa kulkeutuu julkisivupinnan taakse. Julkisivupintaan jäävä viistosade voi periaatteellisesti joko imeytyä julkisivupintaan tai lähteä valumaan painovoiman vaikutuksesta alaspäin.

Julkisivupinnasta pois roiskuva vesi ei kuormita rakenteita, jolloin se osuus viistosateesta voidaan jättää pois laskelmista. Betonisandwich-elementin ulkokuoreen imeytyvä vesi kasvattaa betonin lämmönjohtavuutta, mutta koska ulkokuoren lämmönjohtavuus on pieni suhteessa koko rakenteen lämmönjohtavuuteen, ei ulkokuoren lämmönjohtavuuden muutosta tarvitse ottaa huomioon tämän tutkimuksen laskelmissa. Tällöin jäljelle jäävät:

- a) suoraan julkisivupinnan taakse lämmöneristekerrokseen kulkeutuva osuus viistosateesta sekä
- b) julkisivupintaan tarttunut sekä siitä
 - o diffuusiolla (b1)
 - o valumalla (b2) lämmöneristekerrokseen kulkeutunut kosteus.

Uuden betonisandwich-rakenteisen rakennuksen ulkoilmaa vasten oleva julkisivupinta on lähtökohtaisesti olla sellainen, että viistosadetta ei päädy suoraan julkisivupinnan taakse (a-tapaus). Tällainen tilanne voisi kuitenkin olla mahdollinen esimerkiksi silloin, kun uuden rakennuksen julkisivujen saumaustyötä ei ole vielä tehty tai vanhan rakennuksen julkisivusaumoissa on suuria puutteita. Viistosateen suora sataminen lämmöneristekerrokseen asti on poikkeuksellinen tilanne, jolloin suositellaan välittömiä korjaustoimenpiteitä rakenteiden toimivuuden säilyttämiseksi.

Koska mineraalivilla ei ime vettä kapillaarisesti, aiheuttaa ulkokuoren kastuminen lämmöneristeen kosteuspitoisuuden nousua vain diffuusion kautta, ei kapillaarisesti. Tämän lisäksi julkisivupintaan tarttunut viistosade rasittaa lämmöneristekerrosta diffuusiolla myös saumauksiltaan ehjän julkisivupinnan tapauksessa. Näin ollen julkisivupintaan tarttuneen ja siitä ulkokuoreen imeytymällä siirtynyttä kosteutta (b1-tapaus) ei ole tarpeen ottaa tämän tutkimuksen laskelmissa huomioon, koska nämä ilmiöt vaikuttavat myös ehjän julkisivun kosteusolosuhteisiin.

Julkisivupintaa pitkin tapahtuva viistosateen valuminen (b2-tapaus) voi sen sijaan aiheuttaa rakenteen sisään ylimääräisiä kosteuskuormituksia silloin, kun valuva kosteus pääsee tunkeutumaan esimerkiksi irronneen julkisivusauman raosta tai irronneista pellitysten saumoista.

Vesikalvon muodostuminen julkisivupinnalle edellyttää pinnalle satavan viistosadeintensiteetin ylittävän pintaan absorboituvan ja pinnasta haihtuvan kosteusvirran tiheyksien summan. Sadekuuron aikaan julkisivupinnan kosteuspitoisuus nousee veden imeytyessä siihen, eli vesikalvon muodostuminen ja sen valuminen julkisivupintaa pitkin ovat ajasta riippuvia ilmiöitä [12]. Tässä raportissa esitetty laskentatarkasteluja varten on kuitenkin tehty oletus, että viistosade pystyy aiheuttamaan julkisivupinnalle vesikalvon välittömästi. Sadekuuron käynnistyessä tämä oletus tuottaa todellista suuremman valuvan kosteuden määrän, mutta sadekuuron pitkittyessä taas kosteusvirran kasautumista alempiin kerroksiin ja näin ollen aliarvioi valuvan veden määrän niiden kohdalla.

Julkisivupintaan osuvasta viistosateesta rakenteen sisään päätyvän kosteuden määrä voidaan esittää seuraavasti [13]:

$$G = \eta \cdot I_W \cdot H \cdot W \quad (12)$$

jossa

G on kosteuskuorma rakenteen sisään viistosateesta, kg/h

η on viistosateen tunkeumakerroin, -

H, W ovat julkisivussa olevaa reikää tai rakoa koskevan valuma-alueen korkeus ja leveys, m.

Standardi ASHRAE 160-2016 [14] määrittelee tunkeumakertoimelle perusarvon 1 % (yksi prosentti), joka lasketaan tasaisesti seinäpinnalle tulevasta viistosademäärästä I_W . Edellä viitatus tutkimuksen (Olsson 2018 [13]) osana tehdyissä laboratorikokeissa, viistosateen tunkeumakerroin vaihteli 0,5–2% välillä julkisivupinnalle olevan reiän valuma-alueelle osuvan viistosateen määrästä. Nämä luvut eivät ole keskenään täysin vertailukelpoisia, sillä valuma-alueen osuus koko julkisivupinta-alasta voi jälkimmäisessä tapauksessa vaihdella.

Rakenteen sisään päätyvän viistosateen määrä ei vielä suoraan kerro rakenteen kosteuspitoisuuden kasvua, koska kosteuspitoisuuden kasvu kiihdyttää myös kosteuden haihtumista rakenteesta. Betonisandwich-rakenteen ulkokuori hidastaa huomattavasti ylimääräisen kosteuden kuivumista eristetilasta ulkoilmaan, mutta toisaalta ulkokuoren taakse usein järjestetyt tuuletusurat nopeuttavat ylimääräisen kosteuden kuivumista. Tämän selvityksen mukaisia laskelmia varten on tehty oletus, että ulkokuoren taakse päätynyt vesi käyttäytyy kuin ulkoilman lämpötilassa oleva vapaa vesi, joka haihtuu rakenteesta pois ulkokuoren muodostaman diffuusiovastuksen ($s_d = 80 \cdot 0,08 \text{ m} = 6,4 \text{ m}$) läpi. Tuuletusurien vaikutusta rakenteissa olevaan kosteuden nettomäärään ei ole tässä tutkimuksessa otettu huomioon.

Lämmöneristekerroksen nettomääräinen kosteuspitoisuuden kasvu laskettiin kuukausitasolla vähentämällä ensin rakenteeseen tunkeutuneesta viistosateesta haihtuneen kosteuden osuus ja laskemalla tämän jälkeen rakenteeseen jääneen kosteuden määrä kumulatiivisena summana vuoden alusta lukien. Laskennassa tarkasteltiin ainoastaan vetenä satavaa osuutta viistosadetta, joka määriteltiin sateeksi niinä ajanhetkinä, jolloin ilman lämpötila on vähintään 0°C.

2.5. Lämpöhäviöiden muutos usean vuoden ajanjakson aikana

Tarkasteltaessa vuototilanteiden aiheuttamia muutoksia lämmöneristekerroksen kosteuspitoisuuteen, synnyttää sauman vaurioituminen aina kosteuskuormien kasvamista, jolloin lämmöneristekerroksen kosteuspitoisuus nousee vaurioitumattomaan tapaukseen nähden. Jos ylimääräiset kosteuskuormat ovat riittävän pieniä suhteessa rakenteen kuivumiskykyyn, pysyy kosteustasojen nousu rakenteen sisällä maltillisena. Vastaavasti, jos rakenteeseen päätyy enemmän kosteutta, kuin mitä sieltä kuivuu pois, kasvaa rakenteen sisältämän kosteuden määrä nettomääräisesti. Viistosateen kertymisen arvioiminen rakenteiden sisään usean vuoden ajanjaksolla sisältää kuitenkin huomattavia epävarmuuksia, koska laskentajakson pidentyessä laskentaan liittyvät epävarmuudet kumuloituvat ja voivat lopulta aiheuttaa huomattavia virheitä.

Tehdasvalmisteisia mineraalivillalämmöneristeitä käsittelevä standardi SFS-EN 13162 (2015) [7] sisältää standardin piiriin kuuluvien lämmöneristeiden testaamisen lyhyt- ja pitkäkestoisella osittaisen upotuksen kokeella ja asettaa näiden kummankin kokeen tuloksille tietyt yläraja-arvot. Standardin sallima lyhytkestoisessa (24 h) osittaisupotuskokeessa imeytyneen veden määrä on 1,0 kg/m² ja vastaavassa

pitkäkestoisessa (28 d) kokeessa $3,0 \text{ kg/m}^2$. Lämmöneristepaksuuden ollessa 140 mm, nämä yläraja-arvot vastaavat $7,1$ ja $21,4 \text{ kg/m}^3$ keskimääräisiä kosteuspitoisuuden kasvuja. Laskentatarkasteluissa (erityisesti perustapauksen, luku 3.3) mukaisissa tapauksissa kosteuspitoisuuden kasvu oli näiden rajojen alueella, mutta laskentatarkasteluissa esiintyi myös kyseisiä rajoja korkeampia kosteuspitoisuuden nousuja, erityisesti ohuimmassa lämmöneristekerroksessa viivamaisiin alueisiin keskittyvien kosteuskuormien tapauksessa (Olsson-malli, luku 3.2). Lyhyt- ja pitkäkestoisen osittaisupotuskokeen rajoja ei kuitenkaan säädelty laskennassa, koska todelliseen rasiustilanteeseen arvioitiin vaikuttavan useita sellaisia tekijöitä, jotka eivät ole mukana testausstandardien mukaisessa koetilanteessa. Näitä ovat useiden vuosikymmenten mittainen rasiusaika, kosteuden tunkeutuminen lämmöneristeeseen useista eri suunnista, eri vuosikymmenillä valmistettujen mineraalivillalämmöneristeiden erot, vuotovesien käyttäytyminen betonisandwich-rakenteiden sisällä ja lämmöneristekerrokseen päässeen kosteuden mahdollisuus uudelleenjakaantumiseen kapean viivamaisen alueen sijaan.

Uusien betonielementtijulkisivujen saumojen tavanomainen teknisen kunnan käyttöikäarvio on 15 vuotta, johon verrattuna todellinen käyttöikä voi vaihdella rasiolosuhteiden ja saumojen kestävyuden normaalin vaihtelun mukaan. Jos oletetaan uusien saumojen olevan täysin tiiviitä viistosadevuotojen suhteen ja luvussa 3.2 esitettävien tilanteiden vastaavan täysin vaurioituneita tilanteita, saadaan julkisivusaumojen vaurioitumiselle esitettyä seuraavan mukainen periaatteellinen kehitys.

Vaurioitumisen eteneminen, periaatepiirros



Kuva 2.1 Periaatekuva rakennuksen saumavaurioiden kehittymisestä, jossa 0 % vaurioitumisaste vastaa täysin uusia saumoja ja 100 % vaurioitumisaste luvun 3.2 mukaisia vauriotilanteita. Tässä raportissa energiakustannusten laskenta on tehty harmaalla sävytetylle viiden vuoden ajanjaksolle.

Laskentatarkastelut kuvaavat tilannetta, jossa elementtien väliset saumat ovat saavuttaneet teknisen käyttöikänsä ja rakennuksen julkisivurakenteisiin kohdistuu kauttaaltaan luvun 3.2 mukaiset vauriotilanteet. Tällöin lämpöhäviöiden muutokset kuvaavat saumojen korjaamisen viivästymisestä aiheutuvia kustannuksia. Laskentatuloksissa esiintyneen kosteuspitoisuuden nettomääräisen kasvun vuoksi arviointiin otettiin mukaan myös tilanne, jossa nettomääräiset vaikutukset kumuloituvat vuosi vuodelta. Tällöin usean vuoden ajalta kertyvän lämmitysenergiankulutuksen alaraja-arvo laskettiin olettamalla lämpöhäviön muutoksen pysyvän vakiona vuodesta toiseen ($1 + 1 + \dots$) ja yläraja taas olettamalla nettomääräisten vaikutusten kumuloituvan vuosi vuodelta ($1 + 2 + 3 + \dots$). Tällöin viiden vuoden aikana ensiksi mainitun laskentamenetelmän kokonaislämpöhäviö on viisi kertaa ensimmäisen vuoden lämpöhäviö ja jälkimmäisen laskentamenetelmän kokonaislämpöhäviö on 15 kertaa ensimmäisen laskentavuoden lämpöhäviö.

Usean vuoden aikana tapahtuvasta energiankulutuksen kasvusta laskettiin kyseisen energiamäärän hinta, kertomalla energian määrä (kWh) kaukolämmön hinnalla (eur/kWh). Energian hinnaksi oletettiin 80 eur/MWh (sis. tehomaksu + energiamaksu + verot) [15]. Energian hinnan muutoksen ja diskonttauskoron vaikutus katsottiin pieneksi verrattuna laskennan muihin virhelähteisiin ja jätettiin kustannuslaskelmista pois.

3. TARKASTELEVAT TAPAUKSET

3.1. Rakennus ja sen ympäristö

Seinäpinnoille kohdistuvan viistosateen laskentaa varten tarvittavina tuulen nopeus ja -suunta-arvoina sekä vaakapinnalle tulevan sateen määränä käytettiin Suomen ilmasto-olosuhteisiin valittuja rakennusfysikaalisia testivuosia. Testivuosina käytettiin nykyilmastoa (1980-2009) sekä 2050-ilmastoa (2035-2064) kuvaavia testivuosia Jokioisissa ja Vantaalla. Kyseiset testivuodet on tarkoitettu rakenteille, joita rasittaa ensisijaisesti ulkoilman suhteellinen kosteus tai viistosade, kyseisessä järjestyksessä.

Arvot on laskettu tunnitteisesta datasta ja tämän jälkeen summattu yhteen 730 h mittaisilta jaksoilta. Kalenterikuukausien pituudet vaihtelevat välillä 672–744 h.

Kosteuden kuivuminen laskettiin säädatatiedostojen mukaisilla lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvoilla, olettaen lisäksi sisälämpötilaksi 17 °C (lämmitystarvelukujen mukaisesti). Vaipan läpi tapahtuvien lämpöhäviöiden laskennassa lämpötilaeroista lasketut lämmityksen asetunnit asetettiin nollassi niinä kuukausina, joina ulkoilman lämpötilan kuukausikeskiarvo oli korkeampi, kuin sisälämpötila 17 degC.

Maastoluokkaan sidottuina C_R -kertoimina käytettiin standardin SFS-EN 15927-3 mukaisia maastoluokkia I (järvien/merien rannat sekä tasainen ja esteetön maasto) ja IV (kaupunkien keskustat). Pinnanmuotokertoimen C_T arvoksi asetettiin yksi (1), eli rakennuksia ympäröivä maasto oletettiin tasaiseksi. Ympäristön suojaisuuskertoimen O arvoa vaihdeltiin laskelmissa välillä 0,4–0,8, joka vastaa 15–100 m etäisyyttä ympäröiviin esteisiin. Seinäkertoimen W arvona käytettiin räystäättömän kerrostalon arvoja siten, että ylimmälle kerrokselle käytettiin arvoa $W = 0,5$ ja muille kerroksille arvoa $W = 0,2$ (SFS-EN 15927-3, taulukko 4).

Laskelmissa tarkasteltiin seuraavia rakennustyyppejä (L x S x K) sekä niiden ulkoseinäelementtien lämmöneristetasoja:

- Rakennustyyppit
 - Keskikorkea pistetalo (kuusi kerrosta, yksi porraskäytävä, 16 m x 16 m x 18 m)
 - Matala lamellitalo (kolme kerrosta, kolme porraskäytävää, 50 m x 12 m x 9 m)
 - Korkea lamellitalo (kahdeksan kerrosta, neljä porraskäytävää, 80 m x 12 m x 24 m)
- Lämmöneristetasot
 - 90 mm (nimellispaksuus 1960- ja 1970 -lukujen taite), $\lambda_1 = 0,045$ W/(mK)
 - 140 mm (nimellispaksuus 1970- ja 1980 -lukujen taite), $\lambda_1 = 0,040$ W/(mK)
 - 240 mm (nimellispaksuus vuodesta 2010 eteenpäin), $\lambda_1 = 0,035$ W/(mK)

Jokaiseen porraskäytäviin liittyi rakennuksen yhdellä pitkällä sivulla yksi parveketorni (siivousparvekkeet) ja sitä vastakkaisella pitkällä julkisivulla kaksi parveketornia (huoneistoparvekkeet). Yhden parveketornin leveydeksi oletettiin kaikissa tapauksissa kolme metriä. Parvekkeiden oletettiin toimivan julkisivuja suojaavina rakenteina siten, että viistosadetta ei päädy seinäpinnalle asti. Rakennuksessa oletettiin olevan parvekkeiden ulkopuolella ikkunoita lyhyillä sivuilla yksi kappale kussakin kerroksessa ja pitkällä sivuilla yksi ikkuna neljää julkisivumetriä kohti. Ikkunoiden koko oli kaikissa tapauksissa 2,0 m x 1,4 m (l x k). Yhden parveketornin porraskäytävää kohti sisältävä pitkä julkisivu oletettiin perustapauksessa etelän suuntaiseksi.

3.2. Saumojen vaurioitumistilanteet

Nyt tehtäviä laskentatarkasteluja varten määriteltiin seuraavat tapaukset (kts. luku 2.4):

- Vertailutilanne, jossa viistosade ei aiheuta ylimääräisiä kosteuskuormia ulkoseinärakenteeseen.
- Seinäpinnalle tulevasta viistosateesta 1 % oletetaan päätyvän tasaisesti lämmöneristekerrokseen ja kasvattavan mineraalivillaeristeen kosteuspitoisuutta ("ASHRAE").
- Pysty- tai vaakasauman leveydeksi oletetaan 15 mm ja tälle alueelle osuvasta sateesta 2 % kulkeutuu lämmöneristekerrokseen. Lisäksi 0,5 % vaakasaumojen tai ikkunan alareunan ja alapuolisen vaakasauman väliselle alueelle osuvasta viistosateesta kulkeutuu alapuolisen vaakasauman läpi. Nämä kosteuskuormat aiheuttavat kosteuspitoisuuden kasvua 0,2 m levyisellä alueella. ("Olsson")

Jälkimmäinen vuototilanne sisälsi kolmen eri kosteuskuorman ja niitä vastaavien saumapituuksien ja pinta-alojen laskennan (pystysauma, vaakasauma + valuma kerroksen alueelta, vaakasauma + valuma ikkunan alapuolelta). Ikkunan alareunan alapuolella olevan vaakasauman tapauksessa on oletettu, että ikkunoiden vesipeltien olevan ehjiä ja suojaavan rakenteita asianmukaisesti sateelta, jolloin ikkunan yläpuolelta ja ikkunapinnasta itsestään ei valu vettä ikkunan alapuoliseen vaakasaumaan. Kasvavalle kosteuspitoisuudelle alttiiden pinta-alojen ja saumapituuksien määrät on esitetty seuraavassa taulukossa.

Taulukko 3.1 Eri rakennustyyppien bruttoalat (kerrostasoalojen summat) sekä kahteen eri viistosateen tunkeumamalliin liittyvät seinäpinta-alat ja saumapituudet.

Rakennustyyppi	Sadevuoto	Viistosadekuormien laskentaan liittyvä seinäpinta-ala (ASHRAE) tai saumapituus (Olsson)				
		Pohjoinen	Itä	Etelä	Länsi	Yhteensä
Keskikorkea pistetalo (bruttoala 1536 m ²)	ASHRAE, m ²	138	271	179	271	860
	Olsson, m	87	150	119	150	506
Matala lamellitalo (bruttoala 1800 m ²)	ASHRAE, m ²	221	100	283	100	703
	Olsson, m	159	54	206	54	473
Korkea lamellitalo (bruttoala 7680 m ²)	ASHRAE, m ²	1030	266	1251	266	2813
	Olsson, m	760	144	928	144	1976

Taulukon arvoista huomataan, että korkean lamellitalon yhteenlasketut pinta-alat ja saumapituudet ovat huomattavasti keskikorkeaa pistetaloa ja matalaa lamellitaloa suurempia (noin nelinkertaiset). Rakennusten bruttoalat on laskettu kerrostasoalojen summana, vähentämättä pinta-alasta porraskäytävien tai rakenneosien pinta-alaa.

3.3. Yhteenveto laskelmissa käytetyistä muuttujista

Seuraavaan taulukkoon on koottu yhteenveto laskennan muuttuvista lähtötiedoista ja niille annetuista arvoista. Eri yhdistelmien suuresta määrästä johtuen kullekin suurelle on tässä raportissa valittu perusarvo, johon eri muuttujien vaikutuksia verrataan.

Taulukko 3.2 Laskennan muuttuvat lähtötiedot ja niiden perusarvot.

Suure	Arvojoukko, perustapaus tummennettu
Rakennusfysiikan ilmastollinen testivuosi	Jokioinen 2004 , Jokioinen 2050, Vantaa 2007, Vantaa 2050
Rakennuksen sijainnin maastoluokka	IV (kaupungin keskusta) , I (meren tai järven ranta)
Ympäristön suojaisuuskerroin	$O = 0,8$ tai 0,4
Rakennuksen koko ja muoto	Keskikorkea pistetalo , matala lamellitalo, korkea lamellitalo
Rakennuksen ilmansuunta	Pitkä tuuletusparvekkeet sisältävä julkisivu etelään tai itään
Vaipan lämmöneristetaso	140 mm ja 0,040 W/(mK) ; 90 mm ja 0,045 W/(mK); 240 mm ja 0,035 W/(mK)
Lämmöneristekerrokseen päätyvän kosteuden määrä	ASHRAE 160 tai Olsson 2018
Lämmönjohtavuuden kosteusriippuvuutta kuvaava malli	SFS-EN ISO 10456 tai lineaarinen malli

4. TULOKSET

4.1. Viistosateen määrä

Seuraavassa taulukossa on esitetty vetenä satavan vapaan viistosateen määrä eri testivuosina.

Taulukko 4.1 Vapaan viistosateen I_F määrä eri testivuosien olosuhteissa, kun ulkoilman lämpötila $T_e > 0^\circ\text{C}$. Yksikköinä mm/730 h ja mm/a.

Ajanjakso (dt = 730 h)	Jokioinen 2004	Jokioinen 2050	Vantaa 2007	Vantaa 2050
1	2	2	124	171
2	16	56	10	14
3	13	14	34	40
4	4	4	67	73
5	45	46	28	29
6	88	94	43	45
7	116	122	73	74
8	54	53	60	62
9	89	92	126	137
10	28	29	76	83
11	54	72	128	161
12	74	99	149	188
Yhteensä	584	685	919	1077

Testivuoden Vantaa 2050 vapaa viistosademäärä vuoden aikana yhteensä on lähes kaksinkertainen verrattuna Jokioinen 2004 -testivuoden viistosademäärään.

Seuraavassa taulukossa on esitetty viistosateen määrä eri ilmansuuntiin perustapauksen lähtötiedoilla.

Taulukko 4.2 Viistosateen I_A määrä eri ilmansuuntaan oleville pystypinnoille perustapauksessa. Yksikköinä ovat mm/730 h ja mm/a.

Ajanjakso (dt = 730 h)	Julkisivun ilmansuunta, astetta pohjoisesta myötäpäivään							
	0	45	90	135	180	225	270	315
1	0	0	1	2	2	0	0	0
2	1	1	0	6	13	13	6	2
3	4	5	5	6	6	4	1	2
4	1	2	2	1	0	1	2	2
5	7	5	11	19	23	21	18	12
6	29	13	15	16	14	30	53	54
7	52	27	17	20	28	36	53	62
8	8	17	24	28	22	18	12	10
9	17	14	10	29	55	55	30	16
10	2	6	10	16	18	14	5	1
11	8	2	0	2	23	42	41	20
12	4	1	2	29	61	59	27	6
Yhteensä	133	92	97	174	265	293	249	188

Yksityiskohtaisempi kuormitusprofiili vaihtelee eri tekijöiden seurauksena, mutta viistosateen suurimmat määrät osuvat pääsääntöisesti etelä-länsi -ilmansuuntiin oleville julkisivupinnoille.

Seuraavassa taulukossa on esitetty viistosateen määrä etelän suuntaiselle julkisivulle, kun maastoluokkina on joko I tai IV.

Taulukko 4.3 Vetenä satavan viistosateen määrä I_W julkisivupinnalle (mm/730 h ja mm/a) perustapauksen lähtötiedoilla maastoluokille I ja IV. Kertoimen $W = 0,5$ mukainen tilanne vastaa ylintä kerrosta ja 0,2 loppuosaa julkisivusta.

Ajanjakso (dt = 730 h)	Maastoluokka I		Maastoluokka IV	
	W = 0,5	W = 0,2	W = 0,5	W = 0,2
1	0,9	0,4	0,5	0,2
2	6,4	2,6	3,5	1,4
3	3,2	1,3	1,7	0,7
4	0,1	0	0	0
5	11,6	4,6	6,3	2,5
6	7,4	2,9	4	1,6
7	14,4	5,8	7,9	3,1
8	11,1	4,5	6,1	2,4
9	28,1	11,2	15,3	6,1
10	9,1	3,6	4,9	2
11	11,8	4,7	6,4	2,6
12	31	12,4	16,9	6,8
Yhteensä	135,1	54	73,5	29,4

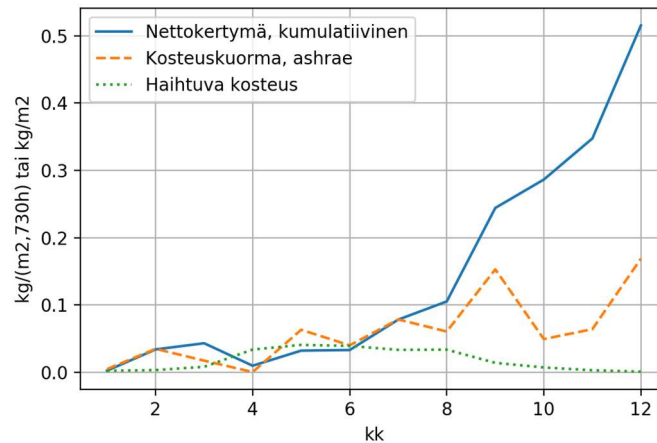
Siirtymisellä rannikon välittömästä läheisyydestä kaupungin keskusta pienentää viistosademäärää noin 45 %, eli kaupunkien keskustoissa olevien rakennusten julkisivut ovat huomattavasti vähemmän alttiina viistosateen vaikutuksille, kuin rannikolla. Toisaalta hyvin avoimella paikalla olevien rakennusten julkisivuihin kohdistuu kaupunkien keskusta-alueiden rakennuksiin verrattuna noin kaksinkertainen viistosadekuorma.

Julkisivujen yläosa saa nyt tehdyissä laskelmissa suurimman viistosadekuorman. Ylimpään kerrokseen verrattuna muiden kerrosten viistosadekuorma on 60 % pienempi.

Ympäristön suojauskerroksella on myös suuri vaikutus seinäpinnalle osuvan viistosateen määrän: Suojauskerroksen puolittaminen arvosta $O = 0,8$ arvoon 0,4 puolittaa suoraan seinäpinnalle osuvan viistosateen määrän ja näin ollen myös rakenteen sisään laskennassa päätyvän nestemäisen veden määrän.

4.2. Kosteuspitoisuuden nousu ja lämmönjohtavuuden muutos lämmöneristekerroksessa

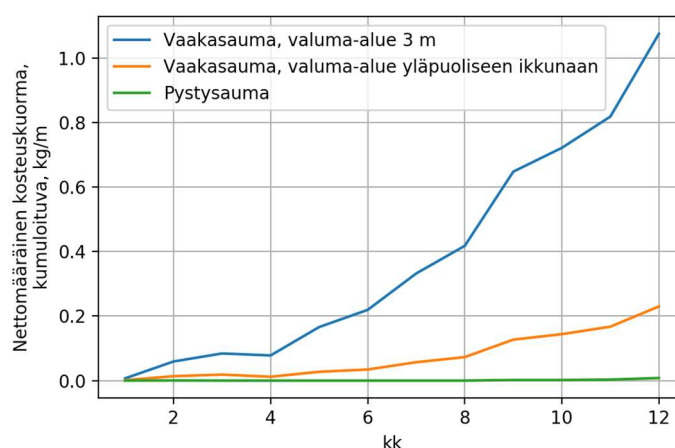
Seuraavassa kuvassa on esitetty lämmöneristekerroksen sisältämän kosteuden määrän kasvu perustapauksessa, eteläseinän yläosassa, kun viistosateesta 1 % tunkeutuu lämmöneristekerrokseen.



Kuva 4.1 Eteläjulkisivun yläosan kuukausittainen kosteuskuorma (kg/m²) rakenteeseen perustapauksessa ja haihtuva kosteus sekä rakenteeseen jäävän kosteuden kumulatiivinen summa.

Edellä olevan kuvan mukainen tilanne oli laskelmissa hyvin tyypillinen etelän suuntaan olevilla julkisivuilla, joilla viistosademäärät ovat eri ilmansuunnista suurimmat. Vähemmän viistosadetta saavilla pohjoiseen ja itään olevilla julkisivuilla kosteuden haihtumiskapasiteetti pystyi joissain tapauksissa estämään kosteuden nettomääräisen kumuloitumisen. Haihtuvan kosteuden määrä vuodessa yhteensä oli 0,22, 0,24, 0,27 ja 0,30 kg/(m²,a) testivuosi Jokiainen 2004, Jokiainen 2050, Vantaa 2007 ja Vantaa 2050.

Seuraavassa kuvassa on esitetty "Olsson"-sovelluksen mukaiset nettomääräiset kosteuden määrän muutokset elementin alareunan vaakasauman, ikkunan kohdalla olevan vaakasauman ja elementtien välisen pystysauman kohdalla.



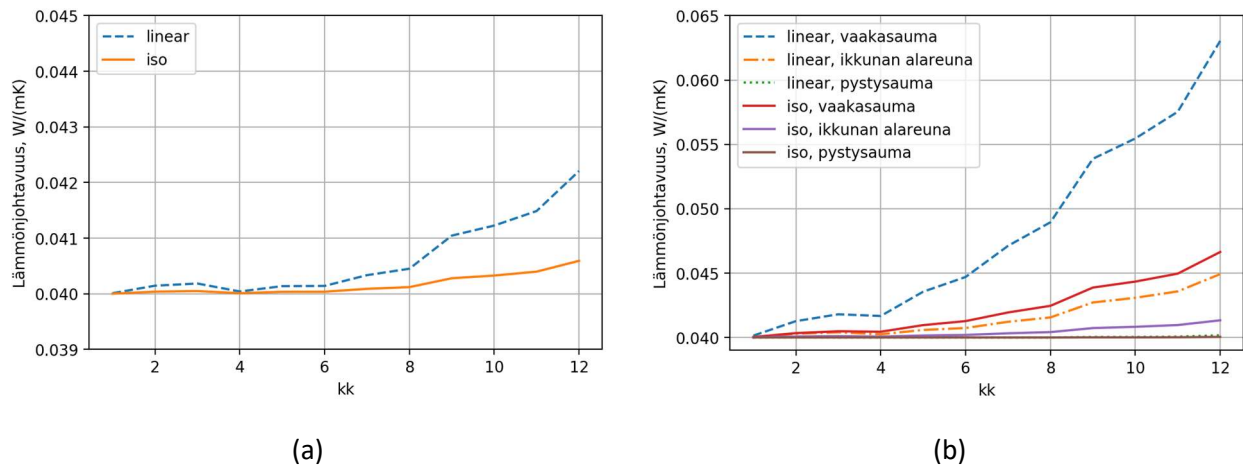
Kuva 4.2 Kosteuden nettomäärän muutos (kg/m) julkisivuelementtien sauma-alueilla, laskettuna soveltaen Olsson (2018) -lähdettä.

Kuvasta huomataan, että kerroksen korkuisen valuma-alueen kohdalla oleva elementin alareunan vaakasauma saa kaikkein suurimman kosteuskuormituksen. Sen sijaan pystysauman kohdalle ei

muodostunut kosteuden määrän nettomääräistä kasvua. Ikkunan alapuolinen vaakasauma jäi näiden kahden eri ääritapauksen väliin.

Koska rakenteeseen tunkeutuneen kosteuden määrä ei riippunut rakenteen lämmöneristepaksuudesta, olivat kosteuspitoisuuden w (kg/m^3) muutokset pienempiä paksumman lämmöneristekerroksen tapauksessa. Kosteuspitoisuuden kasvu oli eteläseinän yläosassa vuoden lopussa perustapauksessa (ASHRAE-mallin mukaan) $3,7 \text{ kg}/\text{m}^3$, 90 mm lämmöneristekerroksen tapauksessa $5,7 \text{ kg}/\text{m}^3$ ja 240 mm paksun lämmöneristekerroksen tapauksessa $2,2 \text{ kg}/\text{m}^3$.

Seuraavissa kuvissa on esitetty lämmöneristeen lämmönjohtavuuden kasvu kosteuspitoisuuden kasvun funktiona kahdella eri viistosademallilla ja kahdella lämmönjohtavuuden laskentamallilla laskettuna.

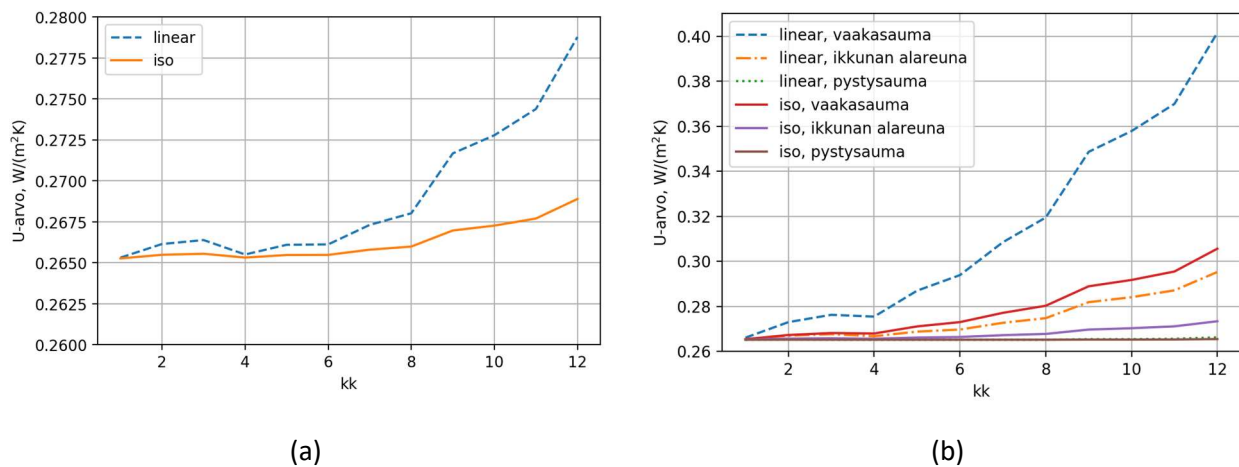


Kuva 4.3 Lämmöneristeen lämmönjohtavuuden muuttuminen materiaalin kosteuspitoisuuden kasvaessa. a) ASHRAE-mallin mukaiset kosteuskuormat, b) Olsson-mallin avulla määritetyt kosteuskuormat. linear = lineaarisen mallin mukainen lämmönjohtavuuden kasvu, iso = SFS-EN ISO 10456 -standardin mukainen lämmönjohtavuuden muutos. Huomaa toisistaan poikkeavat pystyakselien asteikot.

Kuvaajan perusteella lineaarisen laskentamallin käyttäminen tuottaa laskelmissa suuremman lämmönjohtavuuden kasvun, kuin ISO-mallin mukainen lämmönjohtavuuden muutos. Lämmönjohtavuuden arvoja tarkasteltaessa ero on hieman yli kolminkertainen.

Viistosateen tunkeumamalleja vertailtaessa paikallisen kosteuskuormituksen aiheuttava Olsson-malli tuottaa kuormitettuihin kohtiin selvästi tasajakautunutta ASHRAE-mallia suuremman kosteuskuorman ja samalla myös kosteuspitoisuuden muutoksen. Näistä seuraa erityisesti seinän korkuisen vuotoalueen alapuolisen sauman takana olevan lämmöneristekerroksen lämmönjohtavuuden huomattava nousu ulkokuivaan vertailutilanteeseen nähden.

Seuraavissa kuvaajissa on esitetty lämmönjohtavuuden muutoksia vastaavat ulkoseinärakenteiden U-arvojen muutokset laskentatarkastelujen perustapauksessa (luku 3.3).



Kuva 4.4 U-arvojen muuttuminen kahdella eri viistosateen tunkeumamallilla (a) ASHRAE, b) Olsson) ja kahdella lämmönjohtavuuden kosteuspitoisuusriippuvuusmallilla (SFS-EN ISO 10456 ja lineaarinen malli). Huomaa pystyakseleiden eri mittakaavat.

U-arvojen muuttuminen vastaa kuvassa 4.3 esitettyä lämmönjohtavuuden kehittymistä. Lämmöneristekerroksen kosteuspitoisuuden noustessa sen lämmönjohtavuus kasvaa, jolloin myös koko rakenteen U-arvo kasvaa. Myös muiden tekijöiden vaikutukset vastaavat lämmönjohtavuuden osalta esitettyjä arvoja: keskitetyn tunkeumamallin ja lämmönjohtavuuden lineaarisen kosteuspitoisuusriippuvuuden käyttäminen aiheuttivat laskelmissa huomattavasti suuremmat rakenteen U-arvon muutokset suhteessa vertailupareihinsa.

4.3. Energiankulutuksen kasvu

Seuraavassa taulukossa on esitetty rakennuksen energiankulutuksen kasvu perustapauksen lähtötiedoilla ensimmäisen vuoden laskentajakson aikana.

Taulukko 4.4 Johtumisenergiankulutuksen kasvu (kWh/a) lämmöneristeen kastumisen seurauksena perustapauksen lähtötiedoilla. Tulokset koskevat laskennan ensimmäistä vuotta.

		Maastoluokka I		Maastoluokka IV	
		ISO	linear	ISO	linear
Keskikorkea pistetalo	ASHRAE	60,5	224,9	21,2	79,3
	Olsson	48,4	168,9	23,7	85,5
Matala lamellitalo	ASHRAE	61,7	229,1	25,3	94,3
	Olsson	42,7	148,3	22,4	80,3
Korkea lamellitalo	ASHRAE	207,1	770,4	81,0	302,5
	Olsson	150,8	529,5	78,5	283,5

Keskikorkean pistetalon ja matalan lamellitalon tulokset ovat melko samanlaisia, kun taas korkean lamellitalon arvot ovat selvästi näitä kahta suurempia (noin 3–4 kertaisia). Selvä ero on myös kahden eri maastoluokan välillä siten, että energiankulutuksen kasvu ranta-alueilla on laskentatulosten perusteella noin 2–4 -kertainen kaupungin keskusta-alueeseen verrattuna. Lämmönjohtavuuden kosteuspitoisuusriippuvuutta

kuvaavan funktion valinnalla on edellisen taulukon tuloksiin huomattavan suuri vaikutus siten, että lineaarista mallia käyttävät tulokset ovat myös noin 3–4 -kertaisia ISO-mallin mukaisiin tuloksiin nähden. Kahden eri viistosateen tunkeumamallin välillä erot sen sijaan olivat edelle mainittuihin muuttujiin nähden pieniä. Seuraavaan taulukkoon on koottu tuloksia eri testivuoden valinnan vaikutuksista perustapauksen energiankulutukseen.

Taulukko 4.5 Testivuoden valinnan vaikutus energiankulutuksen kasvuun perustapauksen lähtötiedoilla.

	Jokioinen 2004	Jokioinen 2050	Vantaa 2007	Vantaa 2050
Keskikorkea pistetalo	21,2	23,3	49,2	52,6
Matala lamellitalo	25,3	29,2	69,1	71,5
Korkea lamellitalo	81,0	93,1	252,9	262,9

Taulukossa esitettyjen arvojen perusteella tarkasteltavien tapausten energiankulutuksen kasvu oli 3–15 % suurempaa tulevaisuuden (2050) ilmastossa nykyilmastoon verrattuna. Testivuosien välinen ero oli tätä suurempi siten, että Vantaan testivuosien olosuhteissa energiankulutuksen kasvu oli noin 2–3 -kertainen verrattuna Jokioisen testivuosien olosuhteisiin. Seuraavaan taulukkoon on koottu tuloksia koskien lämmöneristepaksuuden vaikutusta energiankulutuksen muutoksiin.

Taulukko 4.6 Lämmöneristepaksuuden vaikutus energiankulutuksen lisäykseen.

	Lämmöneristepaksuus ja rakenteen U-arvo		
	90 mm	140 mm	240 mm
	$U_1 = 0,44 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	$U_2 = 0,27 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	$U_1 = 0,14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Keskikorkea pistetalo	52,1	21,2	6,8
Matala lamellitalo	62,0	25,3	8,1
Korkea lamellitalo	198,8	81,0	25,9

Viistosateen tunkeutumisen laskentamallit tarkastelevat tilannetta vain julkisivupinnan kannalta, jolloin betonisen ulkokuoren taakse tunkeutunut kosteus jakautuu eri paksuisiin lämmöneristekerroksiin, aiheuttaen eri tapauksissa toisistaan poikkeavat kosteuspitoisuuden (kg/m^3) nousun. Ilmiön vaikutus laskentatuloksiin oli huomattava aiheuttaen ohuimman 90 mm eristekerroksen tapauksessa noin 8-kertaisen energiankulutuksen kasvun ja keskimmäisen 140 mm eristekerroksen tapauksessa 3-kertaisen kasvun paksuimpaan 240 mm tilanteeseen verrattuna.

Seuraavaan taulukkoon on koottu energiankulutuksen lisäys muutamassa valitussa vertailutapauksessa.

Taulukko 4.7 Eri rakennustyyppien energiankulutusten vuosittaisia lisäyksiä (kWh/a) laskennan ensimmäisenä vuonna eri tapauksissa. Laskennan muut lähtötiedot vastaavat perustapauksen lähtötietoja. Puolipisteen vasemmalla ja oikealla puolella olevat luvut tarkoittavat Jokioinen 2004- ja Vantaa 2007 -testivuosien mukaisia tuloksia. Matalimman ja korkeimman kulutuksen vaihteluvälit on alleviivattu. Kerroin $O = 0,4$ kuvaa suojaisaa rakennuspaikkaa ja kerroin $0,8$ avointa rakennuspaikkaa.

Talotyyppi	Lämmöneristepaksuus, mm	Maastoluokka I		Maastoluokka IV	
		$O = 0,4$	$O = 0,8$	$O = 0,4$	$O = 0,8$
Keskikorkea pistetalo	90	44,3; 106,0	148,7; 282,3	14,4; 42,7	52,1; 120,8
	140	18,1; 43,2	60,5; 114,7	<u>5,9</u> ; 17,4	21,2; 49,2
Matala lamellitalo	90	48,5; 137,9	151,6; 359,0	17,9; 63,5	62,0; 169,9
	140	19,7; 56,1	61,7; 145,7	7,3; <u>25,9</u>	25,3; 69,1
Korkea lamellitalo	90	155,6; 501,1	<u>508,8</u> ; <u>1316,6</u>	62,0; 225,1	198,8; 621,4
	140	63,4; 204,0	207,1; 534,6	25,3; 91,7	81,0; 252,9

Edellä olevassa taulukossa energiankulutuksen lisäys oli Vantaa 2007 -testivuoden olosuhteissa 1,9–3,6 -kertainen verrattuna Jokioinen 2004 -testivuoden olosuhteisiin. Taulukon pienimmät arvot esiintyvät keskikorkean pistetalon ja matalan lamellitalon tapauksessa, kun ne sijaitsevat suojaisella rakennuspaikalla ($O = 0,4$) kaupunkien keskusta-alueella ja niissä on 140 mm paksu ulkoseinän lämmöneristys. Näissä tapauksissa energiankulutuksen lisäys oli 5,9–25,9 kWh/a.

Suurimmat arvot esiintyvät korkean lamellitalon tapauksessa, joka sijaitsee avoimella rakennuspaikalla ($O = 0,8$), avoimessa maastossa ja ulkoseinän lämmöneristepaksuus on tarkastelluista tapauksista ohuempi 90 mm. Tässä tapauksessa energiankulutuksen kasvu oli 508,8–1316,6 kWh/a.

Sisäilman laskentalämpötilan nostamista arvosta 17 °C arvoon 21 °C testattiin taulukon 4.7 alleviivatuille tilanteille. Jos ulkoilman lämpötila on 5 °C, niin tällöin kaavan (3) mukainen energiankulutus ilman kosteuspuiteisuuden muutoksia kasvaa kertoimella $(21 - 5) / (17 - 5) = 1,33$. Raportin mukaisten yksityiskohtaisempien laskelmien perusteella tarkistettujen tapauksien energiankulutuksen kasvu oli melko lähellä tätä arvoa (1,29...1,36). Sisälämpötilan vaikutusta arvioitaessa on kuitenkin tärkeää muistaa, että lämmitysenergiankulutuksen laskentaan liittyvä 21 °C laskentalämpötila vastaa noin 25 °C ympärivuotista huonelämpötilaa (huonelämpötilan tavoitearvo 21 °C + nousu perustasoon $(21 - 17) °C = 4 °C$). Erityisesti vanhemmissa rakennuksissa korkeamman laskentalämpötilan käyttäminen on suositeltavaa perustella mittauksin tai muulla vastaavalla menetelmällä.

4.4. Energiankulutuksen kasvu usean vuoden ajanjakson aikana

Kaikissa edellä esitetyissä laskelmissa on tarkasteltu rakenteen läpi tapahtuvien lämpöhäviöiden muutoksia ensimmäisen laskentavuoden aikana. Luvun 4.2 tulosten perusteella sadevuodot aiheuttivat kosteuden nettomääräistä kertymistä rakenteeseen vuoden aikana, jolloin lähtökohtaisesti lämpöhäviöt tulisivat olevaan seuraavina vuosina aina suurempia edelliseen vuoteen verrattuna.

Seuraavassa taulukossa on esitetty arvio kolmen ja viiden vuoden aikana tapahtuvalle lämpöhäviön kasvulle ja siitä aiheutuvalle kustannukselle. Energiankulutuksen kasvun raja-arvot on esitetty luvussa 4.3.

Taulukko 4.8 Kolmen ja viiden vuoden ajalle laskettu lämpöhäviön yhteenlaskettu kasvu sekä siitä aiheutuva kustannus. Energian hinta on 80 eur/MWh (sis. alv 24 %).

Aika teknisen käyttöiän päättymisestä, vuotta		Kaupungin keskusta-alue, suojaisa ympäristö, rv. 70-80-lukujen taite, 1500--1800 brm ²		Meren ranta tai vastaava, avoin ympäristö, rv. 60-70-lukujen taite, 7700 brm ²	
		Vakiosuuruinen lisä	Kumuloituva lisä	Vakiosuuruinen lisä	Kumuloituva lisä
3	kWh	18–78	35–155	1500–3900	3100–7900
	eur	1–6	3–12	120–310	250–630
5	kWh	30–130	89–389	2500–6600	7600–19700
	eur	2–10	7–31	200–530	610–1580

Taulukossa esitettyjen tulosten perusteella pienen energiankulutuksen kasvun tapauksessa energiankulutuksen kasvusta aiheutuva lisäkustannus oli 1–31 euroa, laskettuna 3–5 vuoden ajalle ja koko rakennusta kohti. Vastaavasti suuremman lämpöhäviön kasvun tapauksessa kasvaneesta lämmitystarpeesta aiheutunut kustannuslisä oli 120–630 euroa kolmen vuoden ajalta ja 200–1580 euroa viiden vuoden ajalta. Tuloksia arvioitaessa on tärkeätä muistaa, että ne liittyvät tilanteeseen, jossa julkisivusaumat ovat jo vaurioituneet ja johtavat siten viistosadekuorman kautta kasvaneisiin julkisivun lämpöhäviöihin (kts. luku 2.5).

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä tutkimuksessa on selvitetty julkisivusaumojen vaurioitumisen vaikutuksia betonisandwich-seinärakenteiden lämpöhäviöihin ja taloyhtiön energiankulutukseen. Työ tehtiin laskennallisesti määrittämällä ensin viistosateesta aiheutuvien vuotojen määrä betonisandwich-elementin lämmöneristekerrokseen ja tämän jälkeen laskemalla kosteuspitoisuuden kasvusta aiheutunut johtumislämpöhäviön lisäys. Lopuksi ensimmäisen laskentavuoden tulosten avulla arvioitiin lämpöhäviöiden kasvua usean vuoden ajanjaksolla ja niistä aiheutuvia kustannuksia.

Herkkyystarkastelujen perusteella tuloksiin vaikuttaa useita eri tekijöitä, joista kullakin voi olla huomattava vaikutus kosteuskuormien määrään ja niistä aiheutuvaan lämpöhäviöiden kasvuun. Näitä ovat ulkoilman olosuhteita kuvaavan testivuoden valinta, rakennuspaikan ympäristöä kuvaava maastoluokka, rakennusta viistosateelta suojaavat esteet, lämmönjohtavuuden kosteuspitoisuusriippuvuutta kuvaava malli ja betonisandwich-elementin lämmöneristekerroksen paksuus (ohuessa sadevuotojen vaikutukset suurempia). Vaikutuksiltaan pienempiä tekijöitä olivat rakennuksen muoto (pistetalo tai saman suuruinen lamellitalo), viistosateen tunkeumamalli ja ilmastonmuutos.

Laskentatarkasteluissa esiintyi useita eri tilanteita, joissa rakenteeseen päätynyt kosteus ei ehtinyt kuivumaan vuoden aikana rakenteesta pois vaan aiheutti kosteuden nettomääräistä kertymistä rakenteeseen. Kaupunkien keskusta-alueilla sijaitsevissa keskikorkeissa pistetaloissa ja matalissa lamellitaloissa (noin 1700 brm²) lämmöneristekerroksen kasvaneen kosteuspitoisuuden vaikutus koko rakennuksen energiankulutukseen oli kuitenkin hyvin pieni, aiheuttaen korkeimmillaan noin 30 euron lisäyksen rakennuksen lämmitysenergiankulutukseen viiden vuoden ajanjaksolla. Sen sijaan avoimella ja tuulisella paikalla sijaitsevan, edellisiä suuremman korkean lamellitalon (noin 7700 brm²) lämmitysenergiakustannukset kasvoivat tätä enemmän, ollen noin 100–1600 euroa 3–5 vuoden ajanjaksolla. Nämä arvot vastaavat tilannetta, jossa rakennuksen julkisivussa on laajasti erilaisia vuotoja mahdollistavia puutteita ja vaurioita.

Rakennusten energiatehokkuuden lisäksi rakenteiden rakennusfysikaalisen toiminnan varmistaminen on erittäin tärkeää. Viistosade voi aiheuttaa varsinkin laajojen valuma-alueiden päätteessä oleviin vuotokohtiin huomattavia paikallisia kosteusrasituksia, mikä altistaa niissä olevat materiaalit homeenkasvulle, betonin pakkasrapautumiselle, raudoitteiden ruostumiselle ja muille kosteuteen liittyville vaurioitumismekanismeille. Rakenteiden kunnon seuraaminen sekä niiden hyvän lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan varmistaminen edesauttavat sekä hyvän energiatehokkuuden, että kosteusteknisen toimivuuden saavuttamista.

LÄHTEET

- [1] SFS-EN ISO 6946 (2017) Building components and building elements. Thermal resistance and thermal transmittance. Calculation methods. Finnish standards association SFS ry, Helsinki. 48 p.
- [2] SFS-EN ISO 10456 (2008) Building materials and products. Hygrothermal properties - Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values. Finnish standards association SFS ry, Helsinki. 25 p.
- [3] <https://ilmatieteenlaitos.fi/lammitystarveluvut>, Viitattu 22.8.2019
- [4] https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/taloyhtiot/energiaeksperttitoiminta/tietoa_energian-ja_vedenkulutuksesta/lammitysenergiankulutus, viitattu 22.8.2019
- [5] Möttönen, V., Vainio, T. & Nissinen, K. (2014) Lähiörakennusten perusparantaminen - vaikutusten arviointi. Tutkimusraportti VTT-R-03208-14. 121 s + 2 liites.
- [6] Hurmaava lähiö. Energiatohokas lähiökorjaaminen -hankkeen loppujulkaisu. Elina Alatalo (toim.) Tampereen teknillinen yliopisto, arkkitehtuurin laitos, kevät 2012. 150 s.
- [7] SFS-EN 13162 (2015) Thermal insulation products for buildings. Factory made mineral wool (MW) products. Specification. Finnish standards association SFS ry, Helsinki. 47 p.
- [8] Kunzel, H. (1995) Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters. Franhofer Institute for Building Physics. ISBN 3-8167-4103-7. 65 p.
- [9] Scheffler, G. (2008) Validation of hygrothermal material modelling under consideration of the hysteresis of moisture storage. Dresden University of Technology. 236 p.
- [10] SFS-EN ISO 15927-3 (2009) Rakennusten lämpö- ja kosteustekninen käyttäytyminen. Säätiöjen laskenta ja esittäminen. Osa 3: Pystypintojen viistosadeindeksin laskenta tuulen ja sateen tuntitiedoista. Suomen standardisoimisliitto SFS. 17 s.
- [11] SFS-EN 1991-1-4 (2011) Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-4: Yleiset kuormat. Tuulikuormat. Suomen standardisoimisliitto SFS. 254 s.
- [12] Blocken, B., Derome, D. & Carmeliet, J. (2013) Rainwater runoff from building facades: A review. Building and Environment 60, pp. 339-361.
- [13] Olsson, L. (2018) Driving Rain, Intrusion Rates and Phenomenology of Leakages in Defects of Façades: A New Calculation Algorithm. PhD thesis. ISBN 978-91-7597-813-0, Chalmers tekniska högskola, series number 4494.
- [14] ANSI/ASHRAE Standard 160-2016. Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings.
- [15] https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/kaukolammon_hintagraafit.html#material-view, viitattu 20.8.2019

LIITTEET

Liite 1: Ulkoilman olosuhteet, 1 s.

Tampereella 27.9.2019



Anssi Laukkarinen
Renovatek Oy

LIITE 1: Ulkoilman olosuhteet

Seuraavassa taulukossa on esitetty laskelmissa käytettyjen rakennusfysikaalisten testivuosien kuukausikeskiarvot sisä- ja ulkoilman välisen lämpötilaeron (dT, Ts = 17°C), vaakapinnalle tulevan sateen kokonaismäärän (precip, mm/kk), tuulen nopeuden (ws, m/s) ja tuulen suunnan (wd, astetta idän kautta pohjoisesta) osalta.

Rakfys-testivuosi	Suure	730 h ajanjakso vuoden alusta nro.											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Jokioinen 2004	dT	24,6	21,7	18,8	11,5	7,3	4,6	1,4	1,4	5,7	12,2	17,7	17,9
	precip	17	54	14	6	59	122	130	84	98	30	46	64
	ws	3,2	3,8	3,3	2,9	3,5	3,3	3,3	3,4	3,7	3,3	3,6	4
	wd	157	241	280	157	266	263	189	183	230	167	244	222
Jokioinen 2050	dT	21,4	18,8	16,4	9,8	5,7	3	-0,1	-0,2	4	10,6	15,6	15,6
	precip	17	60	14	6	63	130	138	86	102	31	55	70
	ws	3,3	4	3,3	2,9	3,5	3,4	3,3	3,3	3,8	3,3	3,7	4,1
	wd	175	240	283	156	272	262	194	202	234	190	244	227
Vantaa 2007	dT	19,5	25,9	13,9	11,8	5,5	1,1	-0,4	-0,3	5,9	10,7	17	15,5
	precip	97	20	28	51	40	44	61	64	106	69	86	90
	ws	4,9	3,7	3,9	5,3	4,1	3,5	4,5	3,6	4,4	4	5	5,7
	wd	266	63	246	285	204	298	228	243	212	248	257	238
Vantaa 2050	dT	16,7	22,6	12,2	10	3,8	-0,4	-1,9	-1,8	4,2	9	14,7	13
	precip	109	21	29	57	41	46	63	66	114	78	103	105
	ws	5	3,8	3,9	5,4	4,1	3,6	4,5	3,6	4,5	4	5,1	5,8
	wd	255	64	236	286	215	254	233	244	217	243	243	239

Tuulen suunnan kuukausikeskiarvon laskennassa on otettu huomioon kulmasuureen epäjatkuvuus (360° == 0°).

Lämmityksen astetuntien lukumäärät eri vuosina olivat:

- Jokioinen 2004, 105764 Kh
- Jokioinen 2050, 88369 Kh
- Vantaa 2007, 92489 Kh
- Vantaa 2050, 77526 Kh.

Ennustettu ilmastonmuutos näkyy lämmitystarvelukujen pienenemisenä noin 16 % verran ja vaakapinnalle tulevan kokonaissademäärän kasvamisena noin 7-10 % verran nykyilmastoon nähden.