

Antti Kauppila

Matalaenergiakerrostalon ulkoseinien lämpö- ja kosteustekninen toiminta

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinöörityö

25.4.2014

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Antti Kauppila Matalaenergiakerrostalon ulkoseinien lämpö- ja kosteustekninen toiminta 62 sivua + 1 liitettä 25.4.2014
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Rakennustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Rakennetekniikka
Ohjaajat	Kiinteistöjohtaja Eero Lukkarinen Yliopettaja Jukka Yrjölä Yliopettaja Kari Suvanto
<p>Tässä opinnäytetyössä käsitellyn tutkimuksen tavoitteena oli tutkia Lahden Talot Oy:n omistaman, vuonna 2011 Lahteen valmistuneen, matalaenergiakerrostalon kuorimuurattujen ulkoseinien lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa. Työ kuuluu RYM Oy:n Sisäympäristötutkimusohjelmaan, jonka tavoitteena on löytää ratkaisuja, joilla edistetään tilan käyttäjien tuottavuutta, viihtyvyyttä ja terveyttä ekologisesti kestäväällä tavalla. RYM Oy on vuonna 2009 perustettu kiinteistö- ja rakennusalan huippuosaamisen pääomasijoitusyhtiö, jonka osakkaita Metropolia Ammattikorkeakoulu sekä Lahden kaupunki ovat.</p> <p>Tutkimuksen näkökulmana oli tarkastella ulkoseinien kosteus- ja lämpötekniisen toiminnan ja tuuletusraon ilmanvaihtuvuuden riippuvuutta toisistaan. Pääasiallinen tavoite oli selvittää, millä tuuletusraon ilmanvaihtuvuuden arvolla seinärakenne saavuttaa kosteustekniisen toimivuuden. Lisäksi tavoitteena oli tarkastella U-arvon laskennan soveltamista kuorimuurattujen seinien tapauksessa. Tutkittavia seiniä olivat rakennuksen etelä-, pohjois- ja itäseinät. Tutkimus toteutettiin pääasiassa WUFI Pro 4.2 -simulointiohjelmaa hyväksikäyttäen. Lisäksi muita tutkimusmenetelmiä olivat käsin laskenta sekä paikanpäällä pohjoisen puoleisen seinän tuuletusraosta suoritettut kenttämittaukset.</p> <p>Laskennallisista tutkimustuloksista havaittiin, että seinärakenteiden kosteustekninen toimivuus saavutetaan etelänpuoleisella seinällä ilmanvaihtuvuuden arvolla 25 (1/h). Pohjois- ja itäseinien kohdalla seinärakenne puolestaan toimii kosteusteknisesti oikein jo ilmanvaihtuvuuden arvolla 5 (1/h). Tarkasteltaessa tuuletusraon U-arvon vaikutusta koko rakenteen U-arvon määrittämisessä, havaittiin, että tuuletusraon määrittäminen tuulettumattomaksi parantaa seinän U-arvoa noin 4 %.</p> <p>Vertailtaessa laskennallisia tuloksia ja paikanpäällä suoritettuja mittauksia, todettiin, että seinärakenne toimii pohjoisseinän osalta kosteusteknisesti oikein. Pohjoisseinällä mitatuksi tuuletusraon ilmavirtaukseksi saatiin 0,03 m/s ja tälle arvolle laskettu ilmanvaihtuvuuden arvo on tällöin 5,4 (1/h). Virtausnopeus tuuletusraossa on kuitenkin niin pieni, että on syytä vähintäänkin kyseenalaistaa sen U-arvoa heikentävä vaikutus. Tämän tutkimuksen perusteella päädyttiinkin siihen tulokseen, että laskettaessa kuorimuurattujen seinien U-arvoja, tulisi tuuletusraon huomioiminen koko rakenteen U-arvolaskennassa perustella jollain muulla tavalla, kuin nykymääräysten mukaisten tuuletusraon sisään- ja ulosvirtausaukkojen yhteenlasketun pinta-alan mukaan.</p>	
Avainsanat	matalaenergia, WUFI, rakennusfysiikka, kosteus, lämpö, home

Author Title Number of Pages Date	Antti Kauppila Heat and moisture behavior of the low-energy apartment building's exterior walls 62 pages + 1 appendices 25 April 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Specialisation option	Structural Engineering
Instructors	Eero Lukkarinen, Director of real estate Jukka Yrjölä, Principal Lecturer Kari Suvanto, Principal Lecturer
<p>This thesis studies the heat and moisture behavior of the brick clad exterior walls of a low-energy apartment building that was built in 2011. The owner of the building is Lahden Talot PLC and the building is situated in Lahti. This thesis is part of the RYM PLC's Indoor Environment research program which aims at creating solutions that promote productivity, comfort and health in an ecologically sustainable way. RYM PLC was founded in 2009, and Metropolia and the city of Lahti are shareholders in the company.</p> <p>This thesis examines how the heat and moisture behavior of the exterior walls depends on the air changing rate in the ventilation gap. The main goal was to find out what is the sufficient rate of air change in the ventilation gap that ensures the correct moisture technical functioning of the exterior wall. In addition, the goal was to examine the U-value calculation methods for brick-clad exterior walls. The exterior walls that were studied were the southern, northern and eastern walls of the building. The study was primarily carried out by using WUFI Pro 4.2 simulation program. Complementing research methods were manual calculation and measurements made in the ventilation gap of the southern wall.</p> <p>The calculated results show that the exterior wall's moisture technical functionality is achieved by a south-facing wall when the air changing rate in the ventilation gap is 25 (1/h). For the northern and eastern walls the moisture technical functionality is achieved when the air changing rate in the ventilation gap is 5 (1/h). When studying the U-value calculation methods in brick-clad exterior walls, it was found that if the ventilation gap is defined as unventilated, the U-value improves about 4 %.</p> <p>When the calculated results were compared with the measurements, it was found out that the north-facing wall functions correctly from a moisture technical point of view. The measured air flow in the northern wall's ventilation gap was 0.03 m/s so the calculated value of the air changing is 5.4 (1/h). Ventilation flow in the gap is, however, so small that the conclusion of this study is that the current regulations concerning the U-value calculation should be changed in the case of brick-clad exterior walls.</p>	
Keywords	low-energy, WUFI, building physics, moisture, heat, mould

Sisällys

Käsitteet

1	Johdanto	1
1.1	Tutkimuksen tausta ja tavoitteet	1
1.2	Tutkimuksen rajaus	2
2	Rakennusfysiikan teoria	3
2.1	Yleistä	3
2.2	Kosteus	3
2.2.1	Kosteuspitoisuus ja hygroskooppisuus	3
2.2.2	Kosteuslähteet	6
2.2.3	Kosteuden siirtymismuodot	10
2.3	Lämpö	14
2.3.1	Lämmön siirtymismuodot	14
2.4	Tuuletusrako muuratussa julkisivussa	19
2.5	Mikrobit seinärakenteissa	22
3	Tutkimuskohde	24
3.1	Yleistä	24
3.2	Tutkittava seinärakenne	26
4	Tutkimusmenetelmät	28
4.1	Simulointiohjelmat	28
4.1.1	Yleistä	28
4.1.2	Simulointi WUFI-ohjelmalla	29
5	Kosteus- ja lämpötekniset laskelmat	35
5.1	Yleistä	35
5.2	Tuuletusraon ilmanvaihtuvuus ja kosteustekninen toiminta	35
5.3	U-arvo muuratussa julkisivussa	48
5.3.1	Hyvin tuulettuvan seinärakenteen U-arvon laskenta	49
5.3.2	Vaihtoehtoinen U-arvon laskenta	51
6	Mittauksien ja laskennan vertailu	53
6.1	Mittalaitteet	53
6.2	Mittaustulokset	54

6.3	Mittaustulosten tarkastelu	57
7	Yhteenveto	58
7.1	Johtopäätökset	58
7.2	Pohdinta ja jatkotutkimusmahdollisuudet	59
	Lähteet	61
	Liitteet	
	Liite 1. WUFI-ohjelman materiaaliarvot	

Käsitteet

Diffuusio	Diffuusio on fysikaalinen ilmiö, jolla tarkoitetaan vesihöyry-molekyylin liikettä kaasuseoksessa. Diffuusion suunta on suuremmasta vesihöyryn osapaineesta tai pitoisuudesta kohti pienempää.
Diffuusiovastuskerroin	Diffuusiovastuskerroin μ kuvaa, kuinka paljon suurempi materiaalin diffuusiovastus on verrattuna saman paksuiseen ilmakerrokseen samassa lämpötilassa.
Hygroσκοoppisuus	Hygroσκοoppisuus tarkoittaa, että aine pystyy imemään ilmasta kosteutta ja luovuttamaan sitä. Hygroσκοoppisuus edellyttää, että aine on rakenteeltaan huokoista.
Ilmanvaihtuvuus	Ilmanvaihtuvuus n kertoo, kuinka monta kertaa jonkin tilan sisältämä ilman tilavuus vaihtuu yhden tunnin aikana. Tässä työssä ilmanvaihtuvuuden arvoa käytetään kuvaamaan tuuletusraon ilman vaihtuvuutta. Yksikkö on (1/h).
Lämmönjohtavuus	Lämmönjohtavuus λ kertoo, kuinka paljon lämpöenergiaa siirtyy aikayksikössä yhden pinta-alayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen rakenneosan läpi, kun vallitsee jatkuvuustila ja lämpötilaero rakennusosan eri puolilla on yksikön suuruinen. Yksikkö on (W/(m*K)).
Lämmönläpäisykerroin	Lämmönläpäisykerroin eli U-arvo ilmoittaa lämpövirran tiheyden, joka jatkuvuustilassa läpäisee rakennusosan, kun lämpötilaero rakennusosan eri puolilla on yksikön suuruinen. Yksikkö on (W/(m ² *K)).
Lämmönvastus	Lämmönvastus R on vastaluku lämmönläpäisykerroimelle. Yksikkö on ((m ² *K)/W).
Matalaenergiarakennus	Termiä matalaenergiarakennus käytetään yleisnimityksenä matalaenergiatalolle ja passiivitalolle.

Ominaislämpökapasiteetti	Ominaislämpökapasiteetti c_p ilmaisee materiaalin lämmönsitomiskyvyn vakiopaineessa ja -tilavuudessa. Ominaislämpökapasiteettiin vaikuttaa materiaalin kosteuspitoisuus. Yksikkö on (J/(kg*K)).
RakMk	Suomen rakentamismääräyskokoelma. Sisältää täydentäviä säännöksiä ja ohjeita maankäyttö- ja rakennuslakiin sekä asetukseen.
S_d -arvo	S_d -arvo ilmaisee, kuinka paksua ilmakerrosta aine vastaa diffuusionvastukseltaan. Yksikkö on (m).
Suhteellinen kosteus	RH (Relative Humidity) eli suhteellinen kosteus kertoo, kuinka paljon kosteutta ilmassa on verrattuna maksimimäärään tietyssä lämpötilassa. Yksikkö on (%).

1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta ja tavoitteet

Suomi on yhtenä Euroopan Unionin jäsenmaana sitoutunut tavoitteisiin energiatehokkuuden parantamiseksi ja kasvihuonepäästöjen vähentämiseksi sekä uusiutuvan energian käytön lisäämiseksi. Rakennettuun ympäristöön panostamisella on ratkaiseva merkitys näiden tavoitteiden saavuttamisessa, sillä rakennuksissa käytettävän ja rakentamiseen kuluvan energian osuus energian loppukäytöstä on yli 40 % ja kasvihuonepäästöistä lähes 40 %. [19, s. 3, 7.]

Matalaenergiarakentaminen on yksi merkittävä askel energiatehokkuuden parantamiseksi ja kasvihuonepäästöjen vähentämiseksi. Usein matalaenergiarakentamisesta puhuttaessa esiin nousee kuitenkin käytettyjen eristepaksuuksien ja rakenteiden äärimmäisyyksiin viedyn tiiveyden yhteys rakenteiden kosteusongelmiin. Väistämätön fakta on kuitenkin se, että tulevaisuudessa energiatehokkuusmääräysten kiristyessä, matalaenergiarakentaminen tulee korvaamaan vielä nykyään käytetyt perinteisemmät rakenteet kokonaan.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on tutkia Lahdessa sijaitsevan, Lahden Talot Oy:n omistaman, matalaenergiakerrostalon ulkoseinien lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa. Pääasiallisena tavoitteena on tutkia tuuletusraon ilmanvaihtuvuuden vaikutusta tutkimuskohteen ulkoseinien lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan. Tutkimus toteutetaan WUFI Pro 4.2 -simulointiohjelmaa sekä käsin laskentaa hyväksikäyttäen. Lisäksi paikalla tutkimuskohteessa suoritetaan kenttämittauksia, joiden arvoja verrataan laskennallisesti saatuihin tuloksiin.

Tutkimus kuuluu RYM Oy:n Sisäympäristö-tutkimusohjelman työpakettiin 2: Sisäympäristön energiatehokas hallinta, osuuteen F: Piloting and monitoring.

Sisäympäristö-tutkimusohjelman tavoitteena on löytää ratkaisuja, joilla edistetään tilan käyttäjien tuottavuutta, viihtyvyyttä ja terveyttä ekologisesti kestävällä tavalla. Painopistealueita ovat käyttäjäkeskeiset tilat ja niiden energiatehokas hallinta, hyvän sisäympäristön ansaintamallit sekä inspiroivien oppimisympäristöjen suunnittelu ja toteutus. Ohjelmaan osallistuvat yritykset hakevat ennakkoluulottomasti uusia markkinoita tulevaisuuden sisäympäristöistä, joihin ihmiset menevät virkistymään ja edistämään hyvinvointiaan. [1.]

RYM Oy on vuonna 2009 perustettu kiinteistö- ja rakennusalan huippuosaamisen pääomasijoitusyhtiö, johon kuuluu 53 osakasta. Metropolia Ammattikorkeakoulu sekä Lahden kaupunki kuuluvat yhtiön osakkaisiin. RYM Oy puolestaan kuuluu strategisen huippuosaamisen keskittymään (SHOK), jossa sen tehtävänä on tutkia rakennetun ympäristön toimintaa. Keskittymän tavoitteena on entistä tiiviimpi yhteistyö elinkeinoelämän ja tutkimusmaailman välillä. [1; 2.]

1.2 Tutkimuksen rajaus

Tutkimus rajataan koskemaan niin sanottuja seinien keskialueita, jolloin muun muassa seinien nurkka-alueiden analysointi ei kuulu tämän tutkimuksen aihepiiriin. Seinien keskialueet määritellään tässä tapauksessa alueiksi, joissa voidaan lämmön siirtymisen katsoa olevan tutkittavaan pintaan nähden kohtisuoraa. Laskelmilla saadut tulokset vastaavat tällöin todellista tilannetta mahdollisimman tarkasti ja tutkimustuloksiin vaikuttavia häiriötekijöitä on mahdollisimman vähän.

Tutkimuksella pyritään vastaamaan seuraaviin kysymyksiin:

- Mikä vaikutus tuuletusraolla on matalaenergiakerrostalossa seinän kosteustekniseen toimintaan?
- Onko matalaenergiataloissa tuuletusraon ilmanvaihtuvuudella vaikutusta seinän U-arvoon?
- Voidaanko tuuletusraollisen seinärakenteen U-arvon laskentakaavaa soveltaa kuorimuurattujen seinien tapauksessa?

Tuuletusraon toiminnan havainnollistamiseen on tässä tutkimuksessa käytetty ilmanvaihtuvuutta, joten tuuletusraossa vallitsevien ilmavirtauksien tarkempi laskenta ja analysointi eivät kuulu tutkimuksen aihepiiriin. Lisäksi lämmönläpäisykertoimen arvoja tutkittaessa, ei rakenteissa esiintyviä mahdollisten kylmäsiltojen aiheuttamia lisäkonduktansseja ole myöskään huomioitu.

2 Rakennusfysiikan teoria

2.1 Yleistä

Puhuttaessa rakennusfysiikasta, tarkoitetaan fysiikan osa-aluetta, joka on keskittynyt rakennetun ympäristön tutkimiseen lämmön, kosteuden, akustiikan ja valon toiminnan kannalta. Tässä tutkimuksessa tarkastellaan rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa, joten muut rakennusfysiikan osa-alueet on rajattu teoriaosiesta pois. [11, s. 151.]

Rakenteita tarkasteltaessa on huomioitavaa, että lämpö- ja kosteustekninen toiminta ovat aina riippuvaisia toisistaan. Vesi heikentää ratkaisevasti lämmöneristeiden toimintaa ja näin ollen kosteusteknisesti väärin suunnitellun rakennuksen lämmöneristyskyky heikkenee ajan mittaan. Yhtälö toimii myös toisinpäin; lämmöneristyksellä voidaan vaikuttaa kosteuteen ja sen tiivistymispaikkoihin. Lämmöneristeiden eristyskyvyn heikkenemisen lisäksi, rakenteiden liiallisella kosteudella on lisäksi useita muitakin haittavaikutuksia. Laho, pakkasvauriot, korrosio ja home ovat kaikki seurausta kosteusteknisesti väärin toimivista rakenteista. Yleisesti voidaankin todeta, että liiallinen kosteus on vaikuttava tekijä lähes kaikissa rakenteiden vauriotapauksissa. [24, s. 8.]

On tärkeää muistaa, että rakennusfysikaaliset tarkastelut ovat aina usean muuttuvan tekijän summa ja näin ollen monet rakennusfysikaaliset laskelmat ovatkin erittäin monimutkaisia ilman huomattavia yksinkertaistuksia. Johtuen suuresta muuttujien määrästä, monien rakennusfysikaalisten ilmiöiden tarkastelu käsin laskennan avulla on usein lähes mahdotonta. Esimerkkinä laskennan kannalta tehtävästä yksinkertaistuksesta on ilman tilavuuden vaihtelu lämmön ja paineen vaikutuksen suhteen, mikä jätetään tavallisesti laskennassa huomioimatta. [12, s. 2.]

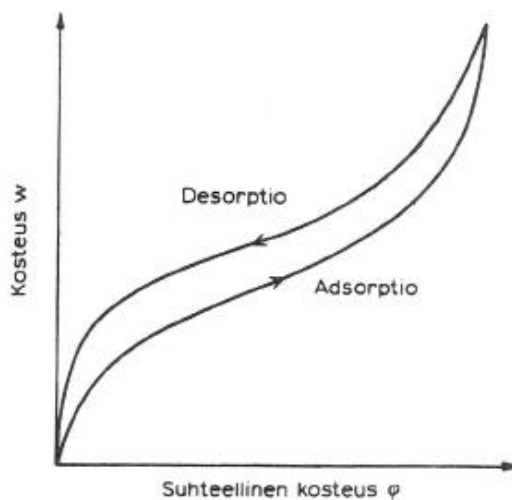
2.2 Kosteus

2.2.1 Kosteuspitoisuus ja hygroskooppisuus

Rakennusmateriaalin kosteuskäyttäytymiseen vaikuttaa suuresti materiaalin huokosrakenne, kokonaishuokostilavuus sekä huokosjakauma. Mitä enemmän materiaali sisältää pieniä huokosia, sitä enemmän se varastoi hygroskooppista kosteutta. Hygroskooppisella kosteudella tarkoitetaan rakennusmateriaalin huokosiin varastoitunutta

kosteutta. Huokoskoon ylittäessä 10^{-7} m luokitellaan materiaali ei-hygroskooppiseksi ja kosteuden sitoutuminen tapahtuu tällöin ainoastaan adsorption eli pintavoimien välityksellä huokosen pintaan. Hygroskooppisilla aineilla kosteuden sitoutuminen puolestaan tapahtuu sekä adsorption että kapillaarikondensaation vaikutuksesta. Kapillaarikondenssin esiintyminen on näin ollen edellytys materiaalin hygroskooppisuudelle. Adsorptiona sitoutuneeseen veden määrään vaikuttavat lämpötila, suhteellinen kosteus ja materiaalin huokospinnan ala. [13, s. 31.]

Ei-hygroskooppisen materiaalin ollessa kosketuksissa kosteaan ilmaan, pysyy materiaali kuivana. Hygroskooppisen materiaalin kosteuspitoisuus puolestaan seuraa ympäröivän ilman suhteellista kosteutta. Hygroskooppinen materiaali sitoo itseensä kosteutta, kunnes se saavuttaa tasapainotilan ympäristönsä kanssa. Tästä tasapainotilasta käytetään nimitystä hygroskooppinen tasapainokosteus. Tasapainokosteus ilmaistaan yleensä tasapainokosteuskäyränä, joka kuvaa materiaalin tasapainokosteuden suhdetta ilman suhteelliseen kosteuteen. Materiaalien tasapainokosteus riippuu paitsi lämpötilasta, myös siitä, onko kyseessä kostuminen eli adsorptio vai kuivuminen eli desorptio. Kuvassa 1 on esitetty aineen hygroskooppisuutta kuvaava sorptiokäyrä. [13, s. 31.]

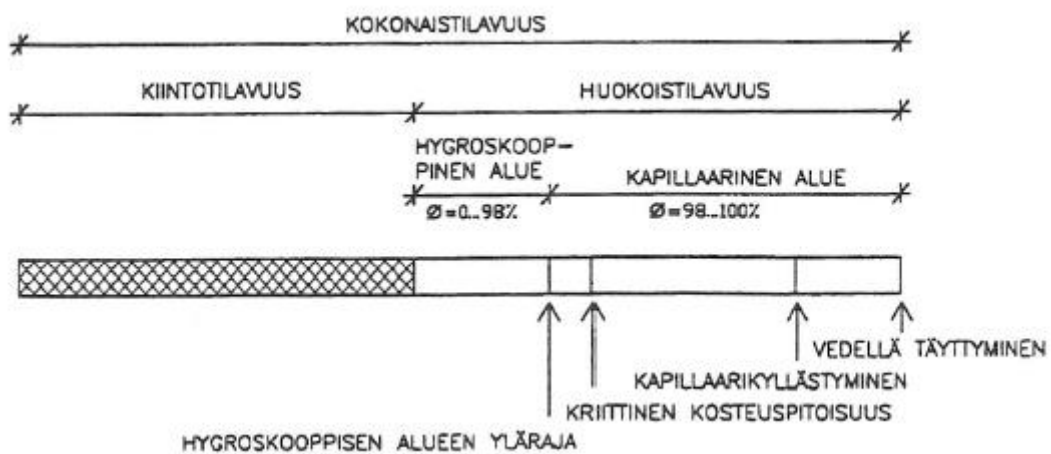


Kuva 1. Aineen hygroskooppisuutta kuvaava sorptiokäyrä [13, s. 32].

Tasapainokosteuteen liittyy aina niin kutsuttu hystereesi-ilmiö, jonka mukaan desorptiossa materiaalin tasapainokosteus on suurempi kuin adsorptiossa. Tämä mahdollistaa kosteuden siirtymisen kuivemmasta materiaalista kostempaan, mikäli jälkimmäisen materiaalin huokosalipaine on suurempi. Hystereesi-ilmiöstä johtuen kapillaarisesti

sitoutunut vesi jää materiaalin kuivuessa osittain materiaalin huokosverkkoon ja poistuu sieltä vasta, kun ympäröivän ilman suhteellinen kosteus laskee riittävästi. [13, s. 32.]

Tasalämpöisissä olosuhteissa materiaalin kyky varastoida vettä on rajallinen. Suhteellinen kosteus, joka vastaa likimain hygroskooppista kyllästyskosteuspitoisuutta on noin 98 %. Hygroskooppisen alueen yläraja riippuu kuitenkin paljon materiaalin huokosrakteista. Hygroskooppisen alueen ylärajan ylittyessä alkaa kapillaarinen tiivistyminen, jonka edellytyksenä on, että materiaali on kosketuksessa vapaaseen veteen. Tällöin kosteuden siirtyminen tapahtuu jatkuvana nestevirtauksena materiaaliin. Pistettä, jossa kapillaarinen veden yhtäjaksoinen siirtyminen alkaa, kutsutaan kriittiseksi kosteuspitoisuudeksi. Kun materiaali on veden kanssa kosketuksissa riittävän kauan, saavuttaa se kapillaarisen kyllästyskosteuden. Kapillaarinen kyllästyskosteus on käytännössä katsottu suurin materiaalin saavuttama kosteuspitoisuus normaaliolosuhteissa. Tyhjiökäsittelyllä on lisäksi mahdollista saavuttaa tila, jossa kaikki ilma on poistunut materiaalin huokosista ja huokokset ovat vedellä täyttyneitä. Tätä tilaa kutsutaan materiaalin maksimikosteuspitoisuudeksi. Kuvassa 2 on esitetty materiaalin kostumisen vaiheet. [13, s. 32.]



Kuva 2. Materiaalin kostumisen vaiheet [13, s. 33].

Rakennuksen ulkoseiniä tarkasteltaessa, rakennusmateriaalit ovat pääosin hygroskooppisella alueella, jolloin materiaalien vesipitoisuus riippuu ympäristön suhteellisesta kosteudesta. Ulkoseinien tapauksessa kapillaarinen kosteuden siirtyminen tulee kyseeseen lähinnä silloin, kun materiaaleissa on rakennusaikaista kosteutta tai rakenteessa on kosteusvaurio. Lisäksi viistosateen aiheuttaman kosteusrasituksen seurauksena tapahtuu kapillaarista kosteuden siirtymistä.

2.2.2 Kosteuslähteet

Ulkoseinärakenteisiin kohdistuvia kosteuslähteitä ovat sade, sisä- ja ulkoilman kosteus sekä rakennusaikainen kosteus. Ulkopuolinen kosteusrasitus vaihtelee voimakkaasti vuodenaikojen ja ympäristöolosuhteiden muuttuessa. Ulkopuolinen kosteusrasitus voi olla joko rakennusta kuivattava tai kasteleva riippuen auringonsäteilyn, ulkoilman suhteellisen kosteuden ja viistosateen voimakkuudesta. Rakennusmateriaalien valmistuksessa, kuljetuksessa, varastoinnissa sekä rakennustyön aikana rakenteisiin voi lisäksi sitoutua ylimääräistä kosteutta. Rakennusaikaisen kosteuden määrä riippuu useasta tekijästä ja näin ollen sen tarkka määrittäminen on vaikeaa. Tässä tutkimuksessa rakennusaikaisen kosteuden määränä on käytetty pääasiassa WUFI-ohjelmassa määritettyjä arvoja. [13, s. 24.]

Sisäilman kosteus on peräisin sisätilojen käytöstä vapautuvasta kosteudesta: pyykin kuivattamisesta, peseytymisestä ja ruuanlaitosta sekä ihmisistä ja eläimistä vapautuneesta kosteudesta. Sisäilman kosteus riippuu myös ilmanvaihdosta ja tätä kautta ulkoilman kosteuspitoisuudesta. Pääsääntöisesti sisäilman kosteuspitoisuus on kuivatetuja tiloja lukuun ottamatta korkeampi kuin ulkoilman kosteuspitoisuus. Näin ollen sisäilman tuoma kosteuslisä vaikuttaa merkittävästi ulkoseinärakenteen kosteustekniseen toimintaan. Luvussa 4.1.2 on kuvattu tässä tutkimuksessa käytettävä sisäilman kosteuslisä. [13, s. 24.]



Kuva 3. Rakennuksen kosteuslähteet [21].

Ilman kosteus

Ilman kosteudella tarkoitetaan ilmassa kaasumaisessa muodossa olevaa veden eli vesihöyryn määrää ja se voidaan ilmoittaa joko vesihöyryn osapaineena (Pa), suhteellisenä kosteutena (%) tai absoluuttisena kosteutena (g/m^3). Ilmaan sitoutuneen veden määrä on riippuvainen vallitsevasta paineesta sekä lämpötilasta, ja se on sitä suurempi, mitä korkeampi lämpötila on. [13, s. 24.]

Ilman suhteellisella kosteudella tarkoitetaan vesihöyryn tai osapaineen määrää verrattuna tarkasteltavan hetken enimmäisarvoon eli kyllästyskosteuteen. Kyllästyskosteus tarkoittaa tilaa, jossa ilma on täysin vesihöyryn kyllästävä ja kosteus alkaa tiivistyä pisaroiksi eli kondensoitua. Suhteellinen kosteus siis kuvaa, kuinka lähellä kastepistettä ollaan. Suhteellinen kosteus φ voidaan ilmaista kaavan 1 avulla seuraavasti:

$$\varphi = \frac{p}{p_k} * 100 \% \quad (1)$$

missä, φ on suhteellinen kosteus (%)
 p on vesihöyryn osapaine tai absoluuttinen kosteus (Pa) tai (g/m^3)
 p_k on vesihöyryn kyllästyskosteus (Pa) tai (g/m^3)

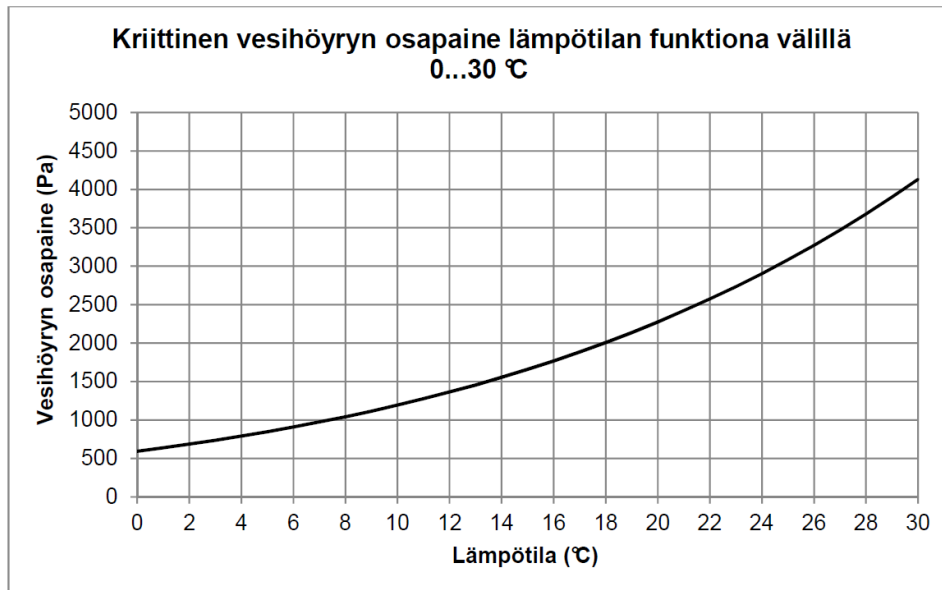
Rakennusfysikaalista toimintaa tarkasteltaessa ilmanpaineen vaihtelut voidaan kuitenkin olettaa hyvin pieniksi ja näin ollen ilman kyky varastoida vesihöyryä voidaan katsoa riippuvan vain lämpötilasta. Kaavassa 2 on kuvattu kylläisen ilman vesihöyryn pitoisuuden ja lämpötilan välistä suhdetta ja tilanne on esitetty graafisesti kuvassa 4. Kaavassa 2 esiintyvällä kriittisellä lämpötilalla tarkoitetaan fysikaalista vesihöyryn maksimilämpötilaa. Kun kriittinen vesihöyryn lämpötila ylittyy, se luokitellaan fysikaalisissa tarkasteluissa kaasuksi. Kaava on voimassa lämpötilan ollessa alueella 0...50 °C. [12, s. 6.]

$$p_k = p_{c,k} * e^{(2,3026 * k * (1 - \frac{T_c}{T}))} \quad (2)$$

missä, p_k on kylläisen vesihöyryn osapaine (Pa)
 $p_{c,k}$ on vesihöyryn osapaine kriittisessä lämpötilassa $217,5 * 10^5$ (Pa)
 T_c on veden kriittinen lämpötila 647,4 (K)
 k on lämpötilasta riippuva kerroin, joka lasketaan kaavassa 3

$$k = 4,39553 - 6,2442 * \left(\frac{T}{1000}\right) + 9,953 * \left(\frac{T}{1000}\right)^2 - 5,151 * \left(\frac{T}{1000}\right)^3 \quad (3)$$

missä, T on lämpötila (K)



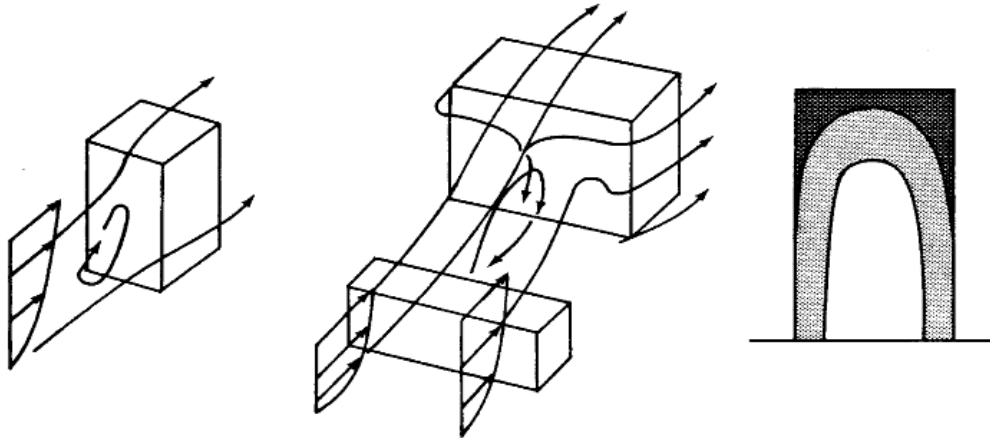
Kuva 4. Kaavan 3 kuvaaja esitetty graafisesti [12, s. 7].

Viistosade

Sadetta esiintyy Suomen ilmasto-olosuhteissa lumena, vetenä tai räntänä. Seinärakenteita tutkittaessa merkittävin tekijä on vetenä esiintyvän sateen vaakasuuntainen komponentti eli viistosateen vaikutus. Viistosateen määrään vaikuttavat sateen ja tuulen voimakkuus, sadepisaroiden koko, rakennuksen muoto, rakennuksen sijainti sekä ilmavirtaukset rakennuksen ympärillä. Lisäksi ympäröivät rakennukset ja niiden etäisyys sekä ympäröivän puuston määrä vaikuttavat viistosateen määrään. [25, s. 52; 13, s. 27.]

Viistosateen osuuden voidaan katsoa olevan suoraan verrannollinen tuulen nopeuteen. Voimakkaimpia tuulet ovat meren rannikkoalueilla ja laajoilla peltoaukeilla, joissa maanpinnan muodot ja kasvillisuus eivät rajoita ilmavirtauksia. Aukeilla alueilla viistosateelle alttiimpia ovat yleensä rakennuksen eteläpuoleiset julkisivut ja rannikkoalueilla

lounaanpuoleiset julkisivut. Tuuli aiheuttaa rakennuksen ympärille virtauskenttiä, joissa tuulen nopeus voi poiketa huomattavasti vapaan tuulen arvosta. Etenkin rakennuksen reuna-alueilla tuulen virtausnopeudet ovat suuria, mikä näkyy viistosateen suurempana jakautumisena rakennuksen yläosiin ja nurkka-alueille. Lisäksi ympäröivien rakennusten suojaava vaikutus on huomattava. Kuvassa 5 on esitetty tuulen ja viistosateen periaatteellinen jakautuminen ulkoseinällä. [13, s. 28.]



Kuva 5. Tuulen ja viistosateen jakautuminen ulkoseinällä [13, s. 28].

Vapaan viistosateen r_v (mm/h) osuus voidaan laskea kaavan 4 avulla, olettamalla, että viistosade on lineaarinen funktio tuulen nopeudesta ja sademäärästä.

$$r_v = 0,222 \cdot v \cdot r_h = DRF \cdot v \cdot r_h \quad (4)$$

missä, DRF on viistosadekerroin, Driving Rain Factor (s/m)
 v on tuulen nopeus (m/s)
 r_h on vaakapinnalle tulevan sateen intensiteetti (mm/h)

Kaava perustuu sadepisaran keskimääräiseen koon ja putoamisnopeuden väliseen suhteeseen. Tällöin kaavassa esitetty viistosade koostuu halkaisijaltaan 1,2 mm pisaroista, joiden putoamisnopeus $v_d = (1/0,222) \text{ m/s} = 4,5 \text{ m/s}$. Viistosadekerroin DRF puolestaan riippuu rakennuksen korkeudesta sekä ympäröivien rakennusten ja puiden suojaavasta vaikutuksesta. Matalissa rakennuksissa puustolla ja ympäröivien rakennusten suojaavalla vaikutuksella on huomattavasti suurempi vaikutus viistosateen suuruuteen, kuin korkeissa rakennuksissa. Mittauksilla onkin todettu viistosadekerroimen vaihtelevan välillä 0,02..0,26. [13, s. 29.]

WUFI-ohjelmassa viistosateelle on määritetty neljä erilaista viistosadekerrointa, rakennuksen korkeudesta riippuen [15]:

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

2.2.3 Kosteuden siirtymismuodot

Kosteus siirtyy rakenteisiin ja rakenteiden sisällä useilla eri tavoilla ja erilaisten voimien vaikutuksesta. Nesteinä olevaa vettä siirtyy rakenteissa vedenpaineen, tuulen, kapillaarisen imun sekä painovoiman vaikutuksesta. Vesihöyryä vettä liikuttavia siirtymismuotoja ovat puolestaan diffuusio ja konvektio. [11, s. 70.]

Vesihöyryyn diffuusio

Vesihöyryyn diffuusiolla tarkoitetaan yleisesti kaasuseoksessa, tässä tapauksessa ilmassa, tapahtuvaa vesihöyrymolekyylin liikettä. Vesihöyrypitoisuuksien ero rakenteen eri puolilla pyrkii tasoittumaan ja saa aikaan diffuusion. Termodynamiikan toisen pääsäännön mukaisesti vesihöyry siirtyy diffuusiolla suuremmasta vesihöyrypitoisuudesta pienempään. Rakennusfysiikassa diffuusiota tarkastellaan kosteuden siirtymismuotona, jossa tasaantumisenopeus riippuu rajapintojen diffuusiovastuksista. 1-dimensioisessa tapauksessa diffuusiolla siirtyvän kosteusvirran tiheys g voidaan laskea kaavassa 5 esitetyn Fickin lain avulla. [11, s. 72; 12, s. 8.]

$$g = -D \frac{dv}{dx} \quad (5)$$

missä, g on kosteusvirta ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$)
 D on vesihöyryyn diffuusiokerroin (m^2/s)
 v on kosteuspitoisuus etäisyydellä x (g/m^3)
 x on etäisyys (m)

Kosteusvirran tiheyden sijaan materiaalin diffuusionvastuksen kuvaamiseen käytetään kuitenkin yleensä joko diffuusionvastuskerrointa μ tai niin sanottua S_d -arvoa. Dif-

fuusionvastuskerroin μ kuvaa ilman vesihöyrynläpäisevyyden ja materiaalin vesihöyrynläpäisevyyden suhdetta. Mitä suurempi on diffuusionvastuskerroin, sitä voimakkaammin materiaali vastustaa vesihöyryn diffuusiota. Kaavassa 6 on esitettyä diffuusionvastuskertoimen laskenta. [12, s. 8.]

$$\mu = \frac{\delta_i}{\delta} \quad (6)$$

missä, μ on diffuusionvastuskerroin (-)

δ_i on ilman vesihöyrynläpäisevyys $188 \cdot 10^{-12}$ (kg/(m*s*Pa))

δ on tarkasteltavan materiaalin vesihöyrynläpäisevyys (kg/(m*s*Pa))

S_d -arvo puolestaan ilmoittaa, kuinka paksun ilmakerroksen vesihöyrynvastusta kyseinen materiaalikerros vastaa. Kumibitumikermi, jonka S_d -arvo on 200 m vastaa vesihöyrynvastukseltaan näin ollen 200 m paksuista ilmakerrosta. Tutkimuksessa käytettävässä WUFI-ohjelmassa on hyödynnetty S_d -arvoa seinien sisäpuolisten pintojen pinoitteita mallinnettaessa. [12, s. 8.]

Vesihöyryn konvektio

Ilmavirtauksien mukana tapahtuvaa vesihöyryn siirtymistä kutsutaan vesihöyryn konvektioksi. Rakenteen eri puolilla vallitsevat paine-erot aiheuttavat ilmavirtauksia, joiden mukana vesihöyry liikkuu. Paine-eroja synnyttävät muun muassa tuuli, lämpötilaerot sekä ilmanvaihtojärjestelmät. Kun ilmavirran suunta on lämpimästä sisäilmasta rakenteen läpi kohti kylmempää ulkoilmaa, jäähtyy virtaava ilmassa ja seurauksena voi olla kosteuden tiivistymistä rakenteisiin. Vastaavasti ilmavirran suunnan ollessa ulkoa sisäänpäin, kuivattaa rakenteen läpimenevä virtaus rakennetta, sillä ilmankosteuden sitomiskyky kasvaa lämpötilan noustessa. Vesihöyryn konvektio ilmenee rakenteissa joko luonnollisena, esimerkiksi huokoisessa lämmöneristeessä esiintyvänä konvektiona, tai pakotettuna, rakenteessa olevien reikien kautta tapahtuvana, konvektiona. Vesihöyryn konvektion voidaan laskea kaavalla 7. [11, s. 70; 13, s. 37; 12, s. 7.]

$$G = R_a * (v_k - v_p) \quad (7)$$

missä, G on kosteusvirta
 R_a on ilmavirta
 v_k on korvausilman kosteuspitoisuus (g/m^3)
 v_p on poistoilman kosteuspitoisuus (g/m^3)

Kapillaarinen kosteuden siirtyminen

Kapillaarinen kosteuden siirtyminen tarkoittaa kosteuden siirtymistä rakenteen huokosissa nesteenä. Jotta kapillaarinen siirtyminen olisi mahdollista, on materiaalin oltava kosketuksissa vapaaseen veteen tai toiseen kapillaarisella kosteusalueella olevaan materiaaliin ja lisäksi materiaalin rakenteen on oltava riittävän huokoista. Betoni, tiili sekä puu ovat esimerkkejä rakennusmateriaaleista, joissa kapillaarista kosteuden siirtymistä tapahtuu. [11, s. 71–72; 12, s. 8.]

Kapillaarinen imu aiheutuu veden pintajännitysvoimien aiheuttamasta huokosalipaineesta, jonka puolestaan aiheuttaa sitoutuneen veden alhaisempi höyrynpaine. Kapillaarista imua voidaan kuvata kaavalla 8. [13, s. 38; 12, s. 8.]

$$p = \frac{2\sigma}{r} * \cos(\theta) \quad (8)$$

missä, p on kapillaaripaine
 σ on veden pintajännitys 0,073 (N/m)
 r on huokosputken halkaisija (m)
 θ on veden ja putken välinen reunakulma

Kaavasta voidaan havaita, että huokosessa vallitseva alipaine on sitä suurempi, mitä pienempi on huokosen säde. Kaavassa esiintyvä kosketuskulma θ riippuu materiaalin ominaisuuksista ja pinnassa esiintyvistä epäpuhtauksista. Yleisimmille rakennusmateriaaleilla tämä kulma on kuitenkin likimain nolla, jolloin kapillaarinen imu on riippuvainen vain pintajännityksen ja huokosputken säteestä. Kaavan 8 avulla saadaan johdettua nesteen kapillaarista nousukorkeutta kuvaava kaava 9. Kaavoista 8 ja 9 on hyvä

huomata, että vaikka ne kuvaavatkin kapillaari-ilmiötä ympyräputkissa, voidaan tuloksia kuitenkin soveltaa suoraan kapillaarinousun arviointiin huokoisissa aineissa. [12, s. 9.]

$$h = \frac{2\sigma}{g \cdot \rho \cdot r} \quad (9)$$

missä, h on veden kapillaarisen nousun korkeus (m)
 σ on veden pintajännitys 0,073 (N/m)
 g on putoamiskiihtyvyys 9,81 (m/s²)
 ρ on nesteen tiheys, veden tiheys 1000 (kg/m³)
 r on huokosputken halkaisija (m)

Kapillaarisesti imeytyneen nesteen määrä materiaalissa riippuu ajasta ja sitä on kuvattu kaavassa 10 [12, s. 9].

$$G = A \cdot \sqrt{t} \quad (10)$$

missä, G on imeytynyt nestemäärä (kg/m²)
 A on materiaali- ja kosteuskohtainen kapillariteettikerroin (kg/(m²·t^{1/2}))
 t on aika (s)

Myös kapillaarisesti imeytyneen nesteen tunkeutumissyvyys on ajasta riippuvainen ja se voidaan ilmoittaa kaavan 11 avulla [12, s. 10].

$$x = B \cdot \sqrt{t} \quad (11)$$

missä, x on nesterintaman sijainti kappaleessa (m)
 B on materiaalikohtainen nesteen läpäisykerroin (m/s^{1/2})
 t on aika (s)

Kosteuden kapillaarista siirtymistä voi tapahtua huokoisissa materiaaleissa jo alhaisissa kosteuspitoisuuksissa. Tällöin kuitenkin määrävänä kosteuden siirtymismekanismi

mina toimii diffuusio. Nestemäinen veden siirtyminen tulee huokoisissa materiaaleissa hallitsevaksi, kun materiaalin kosteus ylittää kriittisen kosteuden. Tällöin huokosiin muodostuu yhtenäinen ja jatkuva vesiverkosto. Tyypillisenä huokoisen materiaalin kriittisenä kosteuspitoisuutena on pidetty 98 % suhteellista kosteutta. [13, s. 40.]

2.3 Lämpö

2.3.1 Lämmön siirtymismuodot

Lämmön siirtymisessä lämpöenergiaa välittyy lämpötilaeron vaikutuksesta. Lämpöenergian liike on lämpöopin sääntöjen mukaisesti aina korkeammasta lämpötilasta kohti matalampaa lämpötilaa. Lämmön siirtymisen muotoja on kolme: johtuminen, konvektio ja säteily. Yleensä lämpöenergiaa välittyy samanaikaisesti useamman lämmönsiirtymismuodon kautta. [11, s. 70–71; 13, s. 12.]

Johtuminen

Johtumisella tarkoitetaan toisiinsa kosketuksissa olevien kappaleiden välistä lämpöenergian siirtoa. Lämmön siirtyminen tapahtuu joko systeemin sisällä tai molekyylien keskinäisten törmäysten välityksellä ilman aineen siirtymistä. Homogeenisessa materiaalissa johtumalla siirtyvän lämpövirran tiheys q saadaan kaavalla 12.

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (12)$$

missä, q on lämpövirran tiheys (W/m^2)
 λ on ainekohtainen lämmönjohtavuus ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)
 T on lämpötila (K)
 x on etäisyys (m)

Kaavasta voidaan havaita, että lämmön virtaussuunta on laskevan lämpötilan suuntaan eli lämpötila pyrkii tasaantumaan siirtymällä lämpimämmästä tilasta kylmempää kohteen. Lämmönjohtavuuden lisäksi materiaalin kykyyn johtaa lämpöä vaikuttaa olennaisesti materiaalin ominaislämpökapasiteetti, joka kuvaa kuinka paljon lämpöenergiaa

materiaaliin sitoutuu lämpötilaeroa ja massaa kohti. Nämä molemmat suureet ovat lämpötilan ja kosteuspitoisuuden funktioita, jotka on kokeellisesti määritetty useimmille rakennusmateriaaleille. [12, s. 3; 13, s. 13.]

Rakennuksen vaippaa suunniteltaessa on kosteuden, ilmavirtauksen ja materiaaliominaisuuksien hajonta tavallisesti otettu huomioon käyttämällä normaalista lämmönjohtavuutta λ_n tai lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoa λ_U . Vaikka materiaalin lämmönjohtavuusarvolla kuvataankin materiaalin kykyä johtaa lämpöä, sisältää se yleensä myös kaikki muut rakenteessa esiintyvät lämmönsiirtymismuodot, sillä huokoisissa materiaaleissa, kuten mineraalivillassa, konvektiolla ja säteilyllä on huomattavan suuri vaikutus materiaalin lämmönjohtokykyyn. [13, s. 13.]

Ulkoseinissä lämmön johtumista tarkastellaan tyypillisesti yksisuuntaisena tasotapauksena, jolloin lämpövirran oletetaan siirtyvän rakenteen läpi ainekerrosten suhteen kohtisuorassa suunnassa. Lämmönjohtavuuden sijasta lämmöneristyksen suunnittelussa käytetään tyypillisemmin lämmönvastusta, joka ilmoittaa rakennekerroksen tai materiaalin lämmönsiirtymisvastuksen. Lämmönvastus R määritellään lämmönjohtavuuden λ ja homogeenisen materiaalikerroksen d suhteena. [13, s. 14.]

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (13)$$

Kokonaisen rakennusosan, esimerkiksi ulkoseinän, lämmönvastus taas kuvataan tyypillisesti lämmönläpäisykertoimena U . U -arvo kuvaa rakennusosan läpi siirtyvää lämpövirtaa pinta-ala-yksikön suuruisen alueen läpi lämpötilaeron ollessa yhden asteen suuruinen. U -arvo on rakennusosan kokonaislämmönvastuksen käänteisluku. Luvussa 5.3 on esitetty U -arvon laskentakaava RakMk:n osan C4 (2012) mukaan, kun lämpö siirtyy ainekerrosten läpi kohtisuorassa suunnassa. [13, s.14.]

Rakenteessa esiintyvien kylmäsiltojen vaikutus otetaan huomioon laskemalla rakenteelle lämmönvastuksen ylä- ja alalikiarvot. Kokonaislämmönvastus saadaan näiden arvojen keskiarvona. Mikäli ylä- ja alalikiarvojen suhde on suurempi kuin 1,5 tai metallirakenne läpäisee lämmöneristekerroksen, ei edellä esitettyä menetelmää voida käyttää lämmönvastuksen määrittämiseen. Tällöin on otettava kylmäsiltojen aiheuttama lämmönläpäisykertoimen lisäys huomioon numeerisella laskennalla ISO 10211 (2007) standardin mukaan. [13, s. 15.]

U-arvon laskennassa käytettävät pintavastuksien arvot riippuvat pinnan suunnasta, pintaan tulevasta ja pinnasta poistuvasta säteilystä ja ilmavirtauksista. Tässä opinnäytetyössä käytettävät pintavastuksien arvot on määritelty RakMk:n osassa C4 (2012). Ulkoseinien sisäpinnassa pintavastuksena käytetään arvoa $0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ ja ulkopinnassa arvoa $0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$. Mikäli rakenne kuitenkin rajoittuu tuuletustilaan, tai hyvin tuuletettuun ilmarakoon, voidaan ulkopinnan pintavastuksena käyttää sisäpinnan pintavastuksen arvoa. [7, s. 22; 13, s. 15.]

Konvektio

Lämmönsiirtymisessä konvektiolla tarkoitetaan lämpöenergian siirtymistä liikkuvan nesteen tai kaasun mukana. Rakennusfysiikassa konvektion väliaineena toimii yleensä ilma. Myös lämmönsiirtymisessä konvektio voi olla pakotettua tai luonnollista. Pakotetun konvektion saa aikaan jokin ulkopuolinen voima, kuten tuuli, paine-ero tai ilmanvaihto. Luonnollinen eli vapaa konvektio puolestaan aiheutuu pelkästään lämpötilaerojen aiheuttamista ilman tiheyseroista. Ulkoseinärakenteissa konvektio johtuu pääasiassa seinärakenteen sisä- ja ulkopinnan erilaisesta lämpötilasta, sisätilojen alipaineisuudesta ja huokoisessa eristeessä tapahtuvasta sisäisestä lämpövirtauksesta eli sisäisestä konvektiosta. [12, s. 3; 13, s. 16.]

Tyypillisesti ulkoseinissä on käytetty huokoisia lämmöneristeitä, joissa ilmenee sisäistä konvektiota. Sisäisellä konvektiolla tarkoitetaan siis ilman liikkumista avohuokoisen lämmöneristeen sisällä. Sisäisen konvektion voimakkuus kasvaa sen mukaan, mitä paksumpi ja ilmaa läpäisevämpi lämmöneristyskerros on. Tässä tutkimuksessa sisäisen konvektion vaikutuksia ei ole otettu huomioon, sillä niiden tarkka analysointi edellyttäisi erityisten virtausohjelmien käyttöä. [13, s. 16.]

Säteily

Säteily on lämpöenergian siirtymistä sähkömagneettisena aaltoliikkeenä. Sähkömagneettiset aallot etenevät valon nopeudella ja osuessaan absorboivaan aineeseen ne muuttuvat lämmöksi. Kaikki kappaleet, joiden lämpötila on absoluuttista nollapistettä ($-273,15 \text{ °C}$) korkeampi emittoivat tätä sähkömagneettista säteilyä jatkuvasti. Säteily on lämmönsiirtymistavoista ainoa, joka ei tarvitse väliainetta edetäkseen. Materiaalien pinta vaikuttaa heijastuvan ja absorboituvan säteilyn määrään ja siihen, kuinka paljon kappale itse emittoi lämpösäteilyä. Mustaksi kappaleeksi kutsutaan kappaletta, joka

absorboi kaiken siihen kohdistuvan säteilyn. Kaavassa 14 on esitetty mustan kappaleen säteilemä teho Q_m . [12, s. 4; 13, s. 18.]

$$Q_m = \sigma * T^4 \quad (14)$$

missä, Q_m on säteilyteho (W/(m²*K))
 σ on Stefan-Boltzmann vakio $5,67*10^{-8}$ (W/(m²*K⁴))
 T on lämpötila (K)

Todellisten kappaleiden ominaisuudet poikkeavat kuitenkin aina mustan kappaleen ominaisuuksista. Todellisten kappaleiden säteilytehon ja ideaalisen mustan kappaleen säteilytehon suhdetta kutsutaan emissiviteetiksi ϵ . Emissiivisyys vaihtelee välillä 0...1 ja on voimakkaasti riippuvainen kappaleen pinnan laadusta. Tyypillisesti rakennusmateriaalien pintojen emissiviteetit ovat varsin suuria, yleensä välillä 0,8 - 0,95. Kun säteilytehon laskennassa huomioidaan emissiviteetti, saadaan todelliselle säteilyteholle seuraava kaava 15. [12, s. 4; 13, s. 18.]

$$Q_s = \epsilon * \sigma * T^4 \quad (15)$$

missä, Q_s on säteilyteho (W/(m²*K))
 ϵ on pinnan emissiviteetti (-)
 σ on Stefan-Boltzmann vakio $5,67*10^{-8}$ (W/(m²*K⁴))
 T on lämpötila (K)

Säteilyn kohdatessa materiaalin pinnan, osa säteilystä absorboituu, osa heijastuu ja osa taas läpäisee kappaleen. Rakennusfysiikassa kiinteiden kappaleiden ei oleteta läpäisevän säteilyä. Tärkeänä poikkeuksena on kuitenkin lasi, joka läpäisee lyhytaaltoista säteilyä. Kaavassa 16 on esitetty säteilyn eri muuttujien suhde.

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (16)$$

missä, ρ on heijastuskerroin (-)
 α on absorptiokerroin (-)
 τ on läpäisykerroin (-)

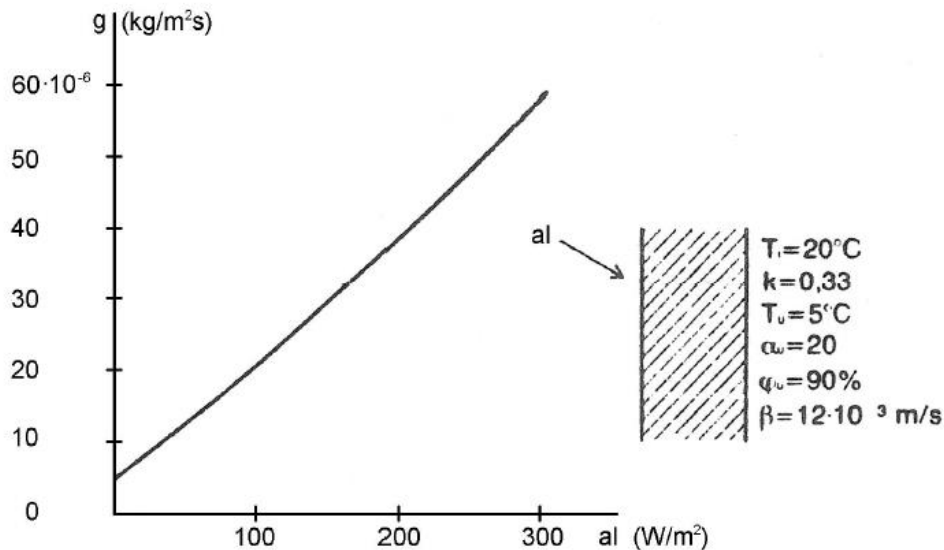
Auringonsäteilyä käsitellään rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa rakennuksen vaipan ulkopintaan vaikuttavana lämmönlähteenä, jonka seurauksena vaipan ulkopinnan lämpötila ja vaipan läpäisevä lämpövirta muuttuu. Laskennassa käytettävä auringon säteilyteho koostuu suoraan ilmakehän läpäisevästä säteilystä eli suoran säteilyn sekä ilmakehän ainehiukkasista ja pilvistä heijastuneen säteilyn eli hajasäteilyn summasta. Säteilyn teho riippuu ulkoseinillä puolestaan auringon kohtauskulmasta. WUFI-ohjelmassa vaipan pystysuoralle pinnalle kohtisuoraan tulevan suoran säteilyn teho $I_{sol,N}$ saadaan kaavasta 17. [15; 13, s. 22.]

$$I_{sol,N} = I_{sol} \cos \gamma \cos \phi = (I_{glob} - I_{diff}) \cos \gamma \cos \phi \quad (17)$$

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

Laskennassa voidaan olettaa hajasäteilyn olevan kaikkiin suuntiin tasan jakautunutta ja suuntariippumatonta. Näin ollen sen suuruus riippuu ainoastaan pinnan kaltevuuskulmasta. Laskennassa voidaan huomioida myös auringonsäteily, joka heijastuu ympäristöstä, esimerkiksi maan pinnasta, tarkasteltavaan seinäpintaan. Tämän säteilyn määrä riippuu ympäristön auringonsäteilyn heijastuskertoimesta. Ympäristöstä heijastuvalla säteilyllä on vaikutusta seinän pintalämpötilaan tapauksessa, jossa seinäpinnan heijastuskerroin poikkeaa huomattavasti maanpinnan heijastuskertoimesta. [13, s. 22.]

Materiaalien absorboidessa auringonsäteilyä niiden pintalämpötila sekä pinnan läheisen ilman lämpötila nousee. Tämä lisää ilman kyllästysvajausta, jolloin rakenteiden kuivuminen tehostuu. Auringonsäteilyllä on lisäksi kosteutta rakenteiden ulko-osista sisäänpäin siirtävä vaikutus. Tämä kosteuden siirtyminen seinärakenteen sisäosiin on merkittävää etenkin tiilimuuratuissa julkisivuissa, joissa viistosade on kastellut rakenteen. Muuraukseen ja muurauksen taakse päässyt kosteus haihtuu auringonsäteilyn vaikutuksesta muurauksen takana olevaan tuuletusrakoon ja siirtyy diffuusiovirtauksen vaikutuksesta seinän sisäosiin. Rakenteen pintalämpötila sekä rakenteesta haihtuva vesimäärä riippuvat auringonsäteilyn voimakkuudesta. Kuvassa 6 on esitetty haihtuvan kosteusmäärän ja auringonsäteilyn välistä riippuvuutta eräälle seinälle. [13, s. 23.]



Kuva 6. Erään seinärakenteen kuivumisnopeus auringonsäteilyn funktiona [13, s. 23].

2.4 Tuuletusrako muuratussa julkisivussa

Ulkoseinässä olevan tuuletusraon tarkoitus on poistaa joko sisältä tai ulkoa julkisivun taakse päässyt kosteus sekä vesi rakennetta vaurioittamatta. Tuuletusraon kosteudenpoistokyky riippuu tuuletusraossa olevan ilmavirtauksen nopeudesta, rakoon virtaavan ilman kosteuspitoisuudesta sekä ilman lämpenemisestä raossa. Auringonsäteilyllä on merkittävä vaikutus tuuletusraossa tapahtuvaan ilmavirtaukseen, sillä se lämmittää tuuletusraossa olevaa ilmamassaa ja lisää näin raossa tapahtuvaa konvektiovirtausta. Virtaavan ilman nopeus riippuu voimakkaasti tuuletusraon rakenteesta ja sen yhtenäisyydestä sekä sisääntulo- ja poistoaukkojen määrästä ja niiden muodosta. Rakenteissa, joissa ilma-aukkoja on harvassa tai tulo- ja poistoaukot ovat pieniä, on ilmavirtaus rajoitettua ja tilan ilmanvaihtuvuus näin ollen selvästi pienempi kuin täysin avoimilla rakenteilla. Ilmanvaihtuvuutta tuuletusraossa kuvataan termillä n (1/h), joka ilmoittaa kuinka monta kertaa tuuletusraon tilavuus vaihtuu yhden tunnin aikana. [13, s. 43.]

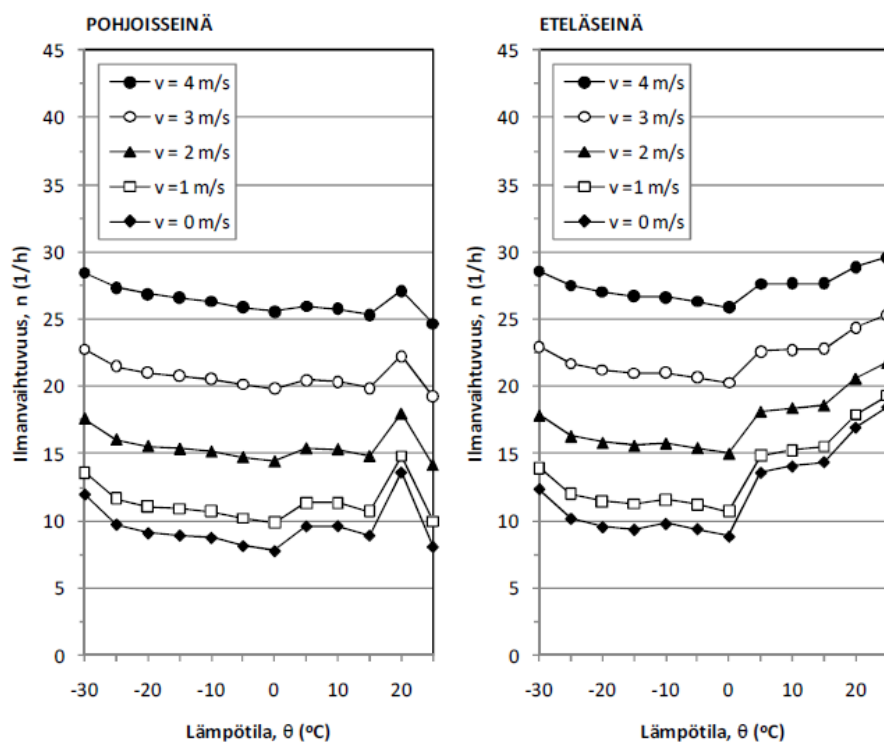
Kuorimuurauksella tarkoitetaan eriytettyä, itsensä kantavaa julkisivurakennetta, joka muodostaa kantavan seinärakenteen ulkopuolelle rakennusta säältä suojaavan ja rakennukselle ulkonäön antavan julkisivuvaipan. Kuorimuurin taakse jätetään tyypillisesti avoin tuuletusrako, jonka paksuus vaihtelee välillä 30...50 mm. Muuraustyön sekä lämmöneristeiden asennustyön huolellisuudesta riippuen, tuuletusrako saattaa kuitenkin

kin olla paikoin laastin tai eristeen tukkima. Tiilimuurin alaosassa tuuletus on tavallisesti toteutettu jättämällä joka kolmas pystysauma auki alimmassa tiilikerroksessa. Yläosassa puolestaan muuraus on jätetty joko koko matkaltaan täysin avoimeksi tai vaihtoehtoisesti suojattu pellityksellä siten, että yläosan virtausaukko on jatkuva ja yhtenäinen. [13, s. 50.]

Tiili on rakenteeltaan huokoista ainetta. Johtuen tästä huokosrakenteesta, tiilen kapillaarinen vedelläytymisaste on noin 15 paino-%. Viistosateella ohut kuorimuuraus voikin näin olla lähes täydellisesti vedellä kyllästynyt. Muuraukseen imeytynyt vesi siirtyy tuuleturakoon vesihöyryinä ja nostaa tuuletusraon suhteellista kosteutta. Lisäksi pystysaumoista tuuletusrakoon valuvalla vedellä on suuri merkitys tuuletusraon suhteelliseen kosteuteen. Tuuletusrako pystyy poistamaan kosteutta rakenteen pinnalta vain, jos tuuletusraossa virtaavan ilman vesihöyrynpitoisuus on pienempi kuin rakenteen haihduttavan pinnan vesihöyrynpitoisuus. Tuuletusraon lämpötilalla on merkittävä vaikutus siihen, toimiiko tuuletusrako rakennetta kuivattavasti vai tuuleeko tuuletusraon kautta lisää kosteutta seinärakenteeseen. [13, s. 43.]

Ilmavirtaus tuuletusraossa kasvaa ulkolämpötilan ja tuuletusraon lämpötilan eron kasvaessa. Tiiliverhoilussa ulkoseinässä tuuletusraossa vallitseva lämpötila on pakkas kautena keskimäärin 2 °C korkeampi kuin ulkoilma. Korkeampi lämpötila johtuu tiiliseinän lämpökapasiteetista sekä ulkoilmaa pienemmästä ilman virtausnopeudesta, jolloin ilmavirran jäähdytysvaikutus on pienempi. Tiiliseinä luovuttaa päivällä varaamaansa lämpöä hitaasti tuuletusrakoon, joten se pysyy lämpimänä pitkään myös yöaikana. Kesällä lämpötilaero tuuletusraon ja ulkoilman välillä on huomattavasti suurempi; etelänpuoleisilla julkisivuilla tuuletusraon ilma on keskimäärin 10 °C ja pohjoisilla seinillä 2-3 °C lämpimämpi kuin ulkoilma, johtuen auringonsäteilyn lämmittävästä vaikutuksesta. Lämpötilan nousu tuuletusraossa laskee ilman suhteellista kosteutta pienentäen näin homehtumisriskiä ja vähentäen kosteuden kondensoitumista rakenteeseen [13, s. 43.]

Tampereen teknillisellä yliopistolla on tutkittu ilmavirtausta muuratusta julkisivussa koerakennuksista ajanjaksolla 8.2.2002–28.2.2003. Kuvassa 7 on esitetty ilmanvaihtuvuus tuuletusraossa lämpötilan ja kohtisuoraan rakennusta vasten puhaltavan tuulen nopeuden funktiona muuratuissa julkisivuissa. Ilmaraon paksuudeksi on oletettu TTY:n tekemässä tutkimuksessa 30 mm. [13, s. 51.]



Kuva 7. Ilmanvaihtuvuus kuorimuuratussa seinässä pohjois- ja eteläjulkisivuilla eri tuulen nopeuksilla [13, s. 52].

Kuten kuvasta 7 voidaan todeta, kesäkaudella ilmanvaihtuvuus on etelänpuoleisilla julkisivuilla 14-30 ja pohjoisen puoleisilla julkisivuilla 10-25 vaihtoa tunnissa, riippuen tuulen voimakkuudesta. Pakkaskautena ilmanvaihtuvuus taas vaihtelee sekä etelä-, että pohjoisjulkisivuilla välillä 8-28 1/h. Kuviosta voidaan havaita, että etelänpuoleisilla julkisivuilla auringonsäteilyn vaikutuksen ollessa pohjoispuolen julkisivuja suurempi, myös ilmanvaihtuvuus tuuletusraossa kasvaa. Toisessa TTY:llä tehdyssä tutkimuksessa puolestaan havaittiin, että ilmavirtaus alle 10 °C lämpötilassa oli hyvin hidasta ja rakenne näytti toimivan alhaisissa lämpötiloissa pääosin suljetun ilmavälin tavoin. Lisäksi Ruotsissa, Lundin yliopistolla tehtyjen laajojen kenttämittauksien mukaan on havaittu normaalien sääolosuhteiden aikana tiilijulkisivujen ilmanvaihtuvuuden olevan vain 0,3-8 vaihtoa tunnissa. Ruotsissa tehtyjen tutkimusten rakenteissa ilmavälin leveys vaihteli välillä 20–50 mm. [13, s. 52.]

Aikaisemmin todettiin, että muurattujen rakenteiden tuuletusraot saattavat olla paikoin laastin tukkimat ja tuuletusraon leveys saattaa näin vaihdella monin paikoin ilmoitetusta nimellislevydestä. Lisäksi ikkunoiden alapuolisissa osissa tuuletuvuus on heikompaa kuin muualla seinärakenteessa. Ottaen huomioon nämä seikat, sekä edellä esitettyjen

tutkimusten tulokset, voidaan päätellä kuorimuurattujen julkisivujen tuuletusraoissa tapahtuvan ilmavirtauksen olevan paikoitellen todella vähäistä. Eteläjulkisivuilla auringonsäteilyn lämmittävä vaikutus kuitenkin kasvattaa tuuletusraon lämpötilaa ja lisää raon ilmanvaihtuvuutta, joten eteläpuoleisilla seinillä raossa tapahtuvan virtaukset voidaan olettaa muita julkisivuja suuremmiksi.

2.5 Mikrobit seinärakenteissa

Elinympäristössämme on monia erilaisia mikro-organismeja eli mikrobeja, kuten bakteereja, viruksia sekä home- ja lahottajasieniä. Mikrobeja esiintyy muun muassa ihmisissä, ruoka-aineissa, rakennusmateriaaleissa sekä testiileissä. Ulkoilman mikrobilähteitä ovat maaperä, kasvit, vesi sekä erilaiset pistemäiset lähteet, kuten viljapelot ja teollisuuslaitokset. Rakennuksia ympäröivässä luonnossa mikrobit ovat tärkeä osa luonnon ainesosien kiertokulkua ja uusiutumista, mutta rakennuksissa ne voivat aiheuttaa monenlaista haittaa tai vauriota itse rakennuksille sekä monenlaisia pitkäkestoisiakin sairauksia ihmisille. Sisäilmassa esiintyvät mikrobit taas ovat pääosin peräisin korvausilman kautta ulkoilmasta, joten rakenteissa esiintyvä mikrobilajisto onkin sisäilmassa hyvin samanlainen kuin ulkoilmassa. Rakenteita tutkittaessa käyteen erilaisista rakenteissa esiintyvistä mikrobeista tavallisesti yleisnimitystä homeet. [12, s. 12; 11, s. 151.]

Homeet tarvitsevat kasvaakseen ja lisääntyäkseen riittävästi happea ja ravintoa sekä otollisen lämpötilan ja kosteuden. Jopa pelkkä rakennusvaiheessa betonin pinnalle jäänyt pöly voi sisältää riittävästi ravintoa homeiden kasvun käynnistymiseen. Näin ollen ravintoa on yleensä rakenteiden pinnoilla ja ympäröivässä ilmassa riittävästi tarjolla ja homeiden kasvu onkin mahdollista minkä tahansa materiaalin pinnalla, jos vain kosteutta on riittävästi tarjolla. [13, s. 57; 11, s. 153.]

Homeiden kasvu edellyttää, että ilman suhteellinen kosteus on jatkuvasti vähintään 80 % RH ja lämpötila on +5...50 °C. Homekasvu on kuitenkin selvästi havaittavissa vasta, kun ilman suhteellinen kosteus pysyy pitkään yli 90 % RH. Suotuisissa olosuhteissa, jolloin jatkuva suhteellinen kosteus ylittää 97 % RH ja lämpötila on noin +20 °C, homehtuminen nopeutuu huomattavasti. Tällöin kasvua voi tapahtua muutaman päivän tai viikon aikana ja kasvua havaitaan kaikissa materiaaleissa. Alle 0 °C:n lämpötilassa

homeet eivät kasva. Taulukossa 1 on esitetty rakennuksen ulkovaipan homehtumisriskin kasvaminen suhteellisen kosteuden ja lämpötilan mukaan. [11, s. 154; 13, s. 57]

Taulukko 1. Rakennusosien homehtumisriski lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mukaan [26, s. 6].

Rakennusosa	Homehtumisriski			
	suhteellinen kosteus < 70 %	70...80 %	80...90 %	> 90 % ja kapillaarialue
Rakennuksen ulkovaipan sisäosat, väliseinät ja välipohjat	vähäinen, vaikka kosteusrasitus on jatkuva	vähäinen, jos kosteusrasitus esiintyy lyhyinä jaksoina	*vähäinen, jos kosteusrasitus esiintyy lyhyinä jaksoina	rakennusosa on pääsääntöisesti korjattava, ellei kosteuspitoisuus esiinny vain lyhyinä jaksoina, esimerkiksi märkätilojen sisäpinnoilla
Rakennuksen ulkovaipan ulko-osat	vähäinen, vaikka kosteusrasitus on jatkuva	vähäinen, jos kosteusrasitus esiintyy lyhyinä jaksoina tai pidempiaikaisesti vuoden kylmimpänä aikana	*vähäinen, jos kosteusrasitus esiintyy lyhyinä jaksoina tai kylminä vuodenaikoina	*rakennusosa on pääsääntöisesti korjattava, jos kosteuspitoisuus esiintyy pitkinä jaksoina, ellei rakenteen lämpötila ole samanaikaisesti alle 0 °C.

*Edellyttää laskennallista analyysiä.

Kun materiaalin kosteuspitoisuus ylittää rakenteen sietokyvyn, homeet aktivoituvat ja levittäytyvät. Suotuisissa olosuhteissa niiden kasvu voi käynnistyä jo muutamassa päivässä. Riittävä kosteus ja lämpötila sekä näiden vaikutusaika ovat kriittisiä mahdollisen homekasvun kehittymiselle. Mikäli homekasvu on ehtinyt alkaa, ei kostuneen rakenteen väliaikainen kuivuminen yleensä tuhoa kasvustoa. Näin ollen rakennuskosteus tai satunnainen kertaluontoinen kastuminen voivat aiheuttaa tilanteen, jonka aikana homeet lähtevät kasvamaan. Kosteuden poistuttua rakenteesta, kasvu taantuu, mutta homeet jäävät rakenteeseen. Vaikka kasvualusta kuivuisikin täysin, jotkin mikrobit voivat säilyttää elinkykynsä useiden kuukausien tai jopa vuosien ajan. [13, s. 58.]

Suomen ilmasto-olosuhteissa ulkoseinissä esiintyvät kosteus- ja lämpötilaolot ylittävät poikkeuksetta ainakin paikallisesti homeiden kasvun riskirajan. Kriittisimpiä kausia homeen kasvulle rakennuksen rungon kylmissä osissa ovat erityisesti syksyn kosteat olosuhteet, jolloin ilman lämpötila pysyy yli 0 °C ja suhteellinen kosteus on samaan aikaan yli 80 % RH. Homeiden kasvun täydellinen estäminen rakenteen uloimmissa osissa onkin vaikeaa, sillä pelkkä ulkoilman kosteus aiheuttaa rakenteeseen homeriskin ylittävän kosteusrasituksen. Ulkoilmaan rajoittuviin rakenneosiin, kuten tuuletusraon sisä- ja ulkopintoihin, voikin muodostua Suomen ilmastossa luonnollista homeen kasvua. Lisäksi tuulensuojalevyn sisäpinta on alttiina ulkoilman kosteudesta

johtuvalle homehtumiselle. Useat lämmöneristeet sekä tuulensuojalevyt sisältävätkin nykyään homeiden kasvua ehkäiseviä homeenestoaineita. [13, s. 63-64.]

3 Tutkimuskohde

3.1 Yleistä



Kuva 8. Lanssikatu 3-5 A-talo kuvattuna keväällä 2014.

Tutkimuskohteena tässä opinnäytetyössä toimii Lahdessa, Niemen kaupunginosassa, osoitteessa Lanssikatu 3-5, sijaitseva Lahden Talot Oy:n omistama asuinkerrostalo. Kohde koostuu kahdesta matalan varasto-/pyöräkatoksen yhdistämästä rapusta. Koska molemmat raput ovat erillisiä rakennuksia, käytetään niistä yleisesti nimitystä A- ja B-talo. Kohde on valmistunut vuonna 2011 ja siihen kuuluu yhteensä 56 vuokra-asuntoa. Molemmat talot ovat 6-kerroksisia matalaenergiakerrostaloja joiden bruttopinta-ala on yhteensä noin 4100 m². Kaikissa asunnoissa on lemmikkieläinten pitäminen kielletty ja lisäksi kiinteistön tontti on savuton. [3, s. 4; 4, s. 3.]

Talot sijaitsevat rinnetontilla, joka rajoittuu tontin itäsvulta metsäalueeseen. Länsipuolella tonttia kulkee Niemenkatu. Molemmat rakennukset on sijoitettu tontille niin, että lukuun ottamatta muutamia päätyasuntojen pohjoiseen ja etelään aukeavia parvekkeita, sijaitsevat kaikki parvekkeet läntisellä julkisivulla. Näin ollen läntiset julkisivut koostuvatkin kokonaan lasitetuista parvekkeista. Tontilta länteen päin on matkaa Vesijärven

rantaan noin 200 m. Tontilta pohjoiseen on lisää kerrostaloja ja eteläpuolella tonttia on metsää. [3, s. 4; 4, s. 3.]

Talojen pohjaratkaisut ovat maan tasolla sijaitsevia 1. kerroksia lukuun ottamatta peilikuvia toisistaan. A-talon puolella ensimmäiseen kerrokseen on sijoitettu talopesula ja B-talossa puolella väestönsuoja sekä lämmönjakohuone. Asuin kerroksia molemmissa taloissa ovat kerrokset 1.- 5. ja 6. kerroksessa on molemmissa taloissa talosaunat ja pesutilat, sekä varastotilaa. Lisäksi ilmanvaihdon konehuoneet sijaitsevat 6. kerroksissa. [4, s. 4.]

Vaikka rakennus sijaitseekin kaukolämpöalueella, ei sitä ole liitetty kaukolämpöverkoston, vaan pääasiallisena lämmitys- ja jäähdytyslähteenä toimivat porakaivot, joista energia otetaan kahden maalämpöpumpun avulla. Lisälämpöä saadaan tarvittaessa B-talon vesikatolle sijoitetuista aurinkokeräimistä sekä sähkövastuksista. Aurinkokeräimet ja sähkövastukset on sijoitettu lämminvesivaraajan yhteyteen. Kaikissa asunnoissa on lattialämmitys, jota voidaan käyttää lämmityskauden ulkopuolella myös jäähdytykseen. [4, s. 4.]

Matalaenergiarakennukset jaotellaan yleisesti kahteen energiatehokkuusluokkaan: matalaenergiatalo ja passiivitalo. Matalaenergiatalon määritelmäksi vaaditaan, että laskennalliset lämpöhäviöt ovat enintään 85 % rakennukselle määritetystä vertailulämpöhäviöstä. Vertailulämpöhäviöllä tarkoitetaan tällä hetkellä voimassa olevia rakentamismääräyksissä määritellyjä rakennusosien lämmönläpäisykertoimien arvoja. Lisäksi matalaenergiatalon määritelmän mukaan rakennuksen tilojen lämmitys- ja jäähdytysenergian ostoenergian ominaiskulutus ja nettoenergian ominaistarve on rajattu välille 26–50 kWh/(m²a). Taulukossa 2 on esitetty tutkimuskohteen suunnitelmissa ilmoitetut rakenneosien laskennalliset U-arvot sekä RakMk C3 (2010) mukaiset vertailuarvot. [5; 27, s.12.]

Taulukko 2. Rakenneosien U-arvot ja RakMk C3 (2010) mukaiset vertailuarvot [8; 6, s. 7].

Rakenneosa	U-arvo (W/m ² K)	Vertailuarvo (W/m ² K)
Ulkoseinä	0,15	0,17
Yläpohja	0,10	0,09
Maanvarainen alapohja	0,14	0,16
Ikkuna	0,76	1,00
Ulko-ovi	1,40	1,00

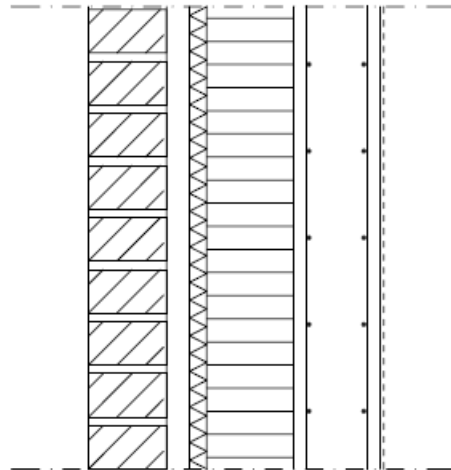
Kuten taulukosta havaitaan, esimerkiksi ulko-ovien U-arvo ylittää määräyksissä annettua arvoa. Rakennusten lämpöhäviöt tuleekin aina osoittaa tasauslaskelmalla, joka tehdään erikseen lämpimille ja puolilämpimille tiloille. Tasauslaskelma ottaa huomioon eri rakenneosien lämpöhäviöiden suhteellisen osuuden kokonaislämpöhäviöön nähden. Tällöin yhden rakennusosan ylittynyt U-arvo ei ole rajoittava tekijä, mikäli muiden rakenneosien U-arvoilla voidaan alentaa kokonaislämpöhäviö vaadittavalle tasolle. Tässä työssä tarkastellussa rakennuksessa ikkunapinta-alojen ja ulkoseinien pinta-alojen osuus koko vaipan pinta-alasta on suuri ja näiden U-arvo on reilusti alle vertailuarvojen. Muiden rakennusosien osuus puolestaan on suhteellisen pieni, jolloin niiden vaikutus kokonaislämpöhäviöön on huomattavasti pienempi, ja näin matalaenergiatalon vaatimukset täyttyvät. [3, s. 4.]

3.2 Tutkittava seinärakenne

Tässä tutkimuksessa tarkasteltavan seinän rakenteena on kuvan 9 mukainen polyuretaanieristetty betoninen sisäkuorielementti, jonka julkisivuverhouksena on kuorimuuraus. Kyseinen rakenne toimii rakennuksen kantavana seinärakenteena. Kantavia ulkoseiniä ovat kaikki muut rakennuksen seinät, paitsi parvekkeiden taustalla olevat sandwich-elementit. Kantavia seiniä on näin ollen rakennuksen etelä-, pohjois- ja itäisivuilla. [8.]

Kantavissa seinissä tuuletusraon toiminta on toteutettu seinän alaosassa jättämällä kuorimuurauksen alimman tiilirivin joka toinen pystysauma auki. Yläosastaan muuraus on koko matkaltaan auki ja suojattu pellityksellä. Kuorimuurauksessa käytetty julkisivutiili on Wienerberger Oy:n valmistama puhtaaksimuurattu reikätiili, tuotenimeltään Tuo-

hi. Polyuretaanieristeenä seinässä on käytetty diffuusiotiivistä molemmin puolin alumiinilaminaatilla pinnoitettua SPU AL 150 -eristettä. Palosuojalevynä seinässä toimii Paroc Oy:n valmistama mineraalivilla. Pintamateriaalina kaikille asuntojen sisäseinille on käytetty vesiohenteisia Tikkurilan Novaplast-maaleja. Tarkemmat materiaaliominaisuudet löytyvät liitteestä 1. [8.]



135 mm	<p>TIILI, RT 285x135x85 Laasti M100/600 Ruostumattomat muuraussiteet 4–6 kpl/m², kallistus ulospäin Tarvittavat raudotteet ruostumatonta terästä Liikuntasaumat n. 6...12 m välein ARK ja RAK suunnitelmien mukaan</p>
40 mm	TUULETUSVÄLI
30 mm	<p>PALOSUOJALEVY, mineraalivilla ≥ 140 kg/m³ Lämmönjohtavuus: Lambda declared 0,037 W/m²K Esim: Paroc FPS 14 Mekaaninen kiinnitys eristeeseen työmaalla</p>
150 mm	<p>LÄMMÖNERISTE, POLYURETAANI, CE-hyväksytty Lämmönjohtavuus: Lambda declared 0,024 W/m²K Kiinnitys sisäkuoreen valun yhteydessä Levyjen väliin polyuretaanivaakto</p>
150 mm	<p>TERÄSBETONI, SISÄKUORIELEMENTTI rakennesuunnitelmien mukaan Sisäpinnasta poistetaan sementtiliima</p> <p>PINTAMATERIAALI JA -KÄSITTELY Ks. huoneselitys</p> <p>Lämmönläpäisykerroin: $U = 0,15$ W/m²K Rakenteen paloluokka: REI 60</p>

Kuva 9. Kantavan ulkoseinän rakenne [8].

4 Tutkimusmenetelmät

Pääpaino tutkimuksessa oli tarkastella seinärakennetta WUFI 1D -simulointiohjelmalla. Toisena tutkimusmenetelmänä toimi käsin laskenta. Näiden lisäksi tutkimuksessa tehtiin kenttämittauksia rakennuksen pohjoisseinällä olevasta tuuletusraosta. Mittauksissa tarkasteltiin tuuletusraossa vaikuttavaa ilmavirtausta, suhteellista kosteutta sekä lämpötilaa.

Ensimmäisessä vaiheessa tutkittiin seinärakenteiden kosteus- ja lämpöteknistä toimintaa WUFI Pro 4.2 -simulointiohjelmalla. Kosteus- ja lämpöteknisen toiminnan tarkastelu aloitettiin keräämällä tietoa tutkittavan seinärakenteen koostumuksesta. Tiedot kerättiin pääasiassa kohteesta saatavilla olevista rakennekuvista, sekä haastatteleamalla Lahden Talot Oy:n henkilöstöä. Seuraavassa vaiheessa tutkittiin seinärakenteen U-arvon laskentaa RakMk C4 (2012) mukaisilla laskukaavoilla. Lopuksi kenttämittauksilla saatuja tuloksia analysoitiin ja verrattiin laskennallisesti saatuihin tuloksiin.

4.1 Simulointiohjelmat

4.1.1 Yleistä

Simulointiohjelmat ovat rakennusfysikaalista toimintaa tarkasteltaessa välttämätön apuväline, sillä monimutkaisten laskelmien suorittaminen käsin on käytännössä katsoen mahdotonta. Simulointiohjelmia hyödynnettäessä on aina varmistuttava, että käyttäjä on perehtynyt ohjelman toimintaan ja tuntee sen toimintaperiaatteet. Jotta käyttäjä ymmärtäisi ohjelmaan syötettävien materiaali- ja olosuhdearvojen sekä reunaehtojen merkityksen, on hänellä näin ollen oltava tarvittava tietämys rakennusfysiikasta. [12, s. 15.]

Simulointiohjelmia käytettäessä on myös hyvä muistaa, että niiden laskenta perustuu approksimaatioihin ja tämän hetkiseen parhaaseen tietämykseen rakennusfysiikasta. Lisäksi ohjelmissa käytettävät materiaalit oletetaan aina homogeenisiksi ja rakenteet virheettömiksi, joten vaikka simulointiohjelmat ovat rakennusfysiikallisia tarkasteluja tehtäessä välttämätön apuväline, esiintyy niissä silti epätarkkuuksia. [12, s. 15.]

4.1.2 Simulointi WUFI-ohjelmalla

WUFI (*Wärme und Feuchte Instationär - Transient Heat and Moisture*) on ohjelma, jolla voidaan simuloida rakenteiden kosteus- ja lämpötekniistä toimintaa. Ohjelmasta on saatavilla sekä 1- ja 2-dimensioisiin tarkasteluihin sopivat versiot. Ohjelmasta löytyy oma materiaalitietopankki, jota voi täydentää omilla tiedoilla. Lisäksi ohjelma sisältää 97 eri kaupungin säätiedot. [9.]

Tässä tutkimuksessa on hyödynnetty 1-dimensioiseen tarkasteluun käytettävää versiota WUFI Pro 4.2. WUFI 1D -ohjelmat ottavat simuloinneissa huomioon sisä- ja ulkoilman muuttuvat olosuhteet (lämpötila, suhteellinen kosteus, viistosade ja auringon säteily), materiaalien olosuhdemuutokset (tasapainokosteus) sekä tärkeimmät lämmön ja kosteuden siirtymismuodot (johtuminen, diffuusio ja nestemäisen veden kapillaarinen siirtyminen). Lisäksi, esimerkiksi tuuletusraon tapauksessa, lämmön ja kosteuden siirtyminen voidaan ottaa huomioon malliin erikseen lisättävän ilmanvaihtolähteen avulla. [20, s. 59.]

Mallintamisen aloitus

Mallintaminen aloitetaan luomalla ohjelmaan haluttua rakennetta geometrialtaan vastaava rakennemalli. Jokaisesta rakennekerroksesta luodaan suorakulmioita hyväksikäyttäen rakennekerroksen todellista paksuutta vastaavat osat, jotka yhdessä muodostavat koko rakenteen. Ohuita kappaleita mallinnettaessa on tärkeää ottaa huomioon, että pienin sallittu rakennepaksuus on ohjelmassa 1 mm. Tämä johtuu siitä, että WUFI-ohjelmat perustuvat elementtilaskentaan, jolloin mallinnettava rakenne jaetaan moneen pieneen osaan. Alle 1 mm paksuisia kappaleita, kuten esimerkiksi höyrynsulkuina käytettäviä materiaaleja, ei näin ollen voida jakaa tarpeeksi moneen elementtiin, jotta saatu tulos olisi luotettava. [15.]

Materiaaliarvot

Kun tutkittavan rakenteen rakennemalli on luotu, määritetään jokaiselle rakennekerrokselle materiaaliominaisuudet. Jotta laskenta voidaan suorittaa, jokaisella kerroksella tulee olla perustiedot. Perustietoja ovat: tiheys (kg/m^3), huokoisuus (kg/m^3), ominaislämpökapasiteetti ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$), lämmönjohtavuus ($\text{W/m}\cdot\text{K}$) ja diffuusionvastuskerroin (-).

Perustietojen lisäksi materiaalille on mahdollista määrittää muitakin ominaisuuksia, kuten sorptiokäyrä ja kosteusdiffusiteetit. [15.]

Vaikka WUFI-ohjelman materiaalitietokanta onkin kattava, ei se luonnollisestikaan sisällä kaikkia rakennusmateriaaleja ja niiden materiaaliominaisuuksia. Lisäksi eri valmistajien materiaalit eroavat ominaisuuksiltaan toisistaan. Tästä johtuen, on tässä tutkimuksessa täydennetty ja muokattu käytettävien materiaalien ominaisuuksia todellisuutta vastaaviksi. Seuraavassa luettelossa on esitetty eri materiaalien mallintamisen periaatteet ja liitteessä 1 on esitetty tarkemmin käytettyjen materiaalien ominaisuudet.

- Polyuretaanieristeenä käytetty alumiinilaminaattipintainen SPU AL 150 -eriste luotiin malliin lisäämällä erikseen 1mm paksuiset alumiinilaminaattikerroksia vastaavat kerrokset polyuretaanin molemmiin puolin
- Seinien sisäpinnalla käytettyä maalipintaa ei mallinnettu rakenteeseen varsinaisesti fyysiseksi kerrokseksi, vaan seinien sisäpinnoille määritettiin erillinen maalikerrosta vastaava S_d -arvo, jonka suuruus oli 0,5 m.

Elementtiverkko

Kuten edellä todettiin, ohjelman laskenta perustuu elementtilaskentaan. Ohjelma luo jokaisesta rakennekerroksesta oman elementtiverkon, jonka tiheyttä on mahdollista muuttaa määrättyjen rajojen puitteissa. Periaatteena on, että mitä tiheämpi elementtiverkko on eli mitä enemmän se sisältää elementtejä, sitä tarkempi on laskennan lopputulos. Verkon turhaa tihentämistä tulisi kuitenkin välttää, sillä se kasvattaa ohjelman laskenta-aikaa. Tiheää verkkoa kannattaa käyttää materiaaleihin, joissa tapahtuu jyrkkiä kosteus- tai lämpövirran muutoksia. Tällaisia materiaaleja ovat esimerkiksi höyrynsulkumuovit sekä lämmöneristeet. Paksujen, homogeenisten ainekerrosten, kuten betonin, kohdalla verkkoa voi puolestaan harventaa. [15.]

Tässä tutkimuksessa on käytetty elementtiverkkona WUFI Pro 4.2 -ohjelman automaattisesti määrittämää tiheintä verkkoa. Käytettäessä automaattista verkkoa, määrittää ohjelma kullekin rakennekerrokselle lämpö- ja kosteusteknisen laskennan kannalta tarvittavan verkon tiheyden. Verkon tiheyteen vaikuttavat rakennekerrosten materiaaliarvot, tutkittavan rakenteen kokonaisuus sekä rakennekerroksien rajapintojen olosuhteet. [15.]

Lähteet

WUFI-ohjelmissa on mahdollista asettaa malliin lähteitä kosteudelle, lämmölle tai ilmal-
le. Erilaisten lähteiden avulla voidaan simuloida esimerkiksi vesiputken vuotoa tai läm-
pöpatterin vaikutusta. Tuulettuvan ilmaraon tutkimiseen on tässä työssä käytetty ilman-
vaihtolähdettä, josta on kerrottu tarkemmin luvussa 5.2. [15.]

Reunaehdot

Luodulle rakennemallille on määrättävä laskennan kannalta tarvittavat reunaehdot.
Reunaehdot ovat muun muassa sisä- ja ulkopintojen pintavastukset, viistosateen ab-
sorptiokerroin sekä erilaiset kertoimet auringonsäteilyn ja pinnan vesihöyrynvastuksen
arvoille. Näiden ehtojen lisäksi viistosateen ja auringonsäteilyn määrään vaikuttavat
rakennuksen korkeus, tarkasteltavan rakenteen kaltevuuskulma sekä ilmansuunta.
Myös näille ominaisuuksille annetaan laskennan kannalta halutut arvot. Tässä tutki-
muksessa käytetyt reunaehdot on esitetty luvussa 5.2. [15.]

Alkuolosuhteet

Alkuolosuhteilla tarkoitetaan kosteus- ja lämpöolosuhteita, joiden pohjalta ohjelma aloit-
taa laskennan. Nämä arvot voidaan syöttää ohjelmaan joko erikseen jokaiselle materi-
aalille tai ne voidaan lukea tiedostosta. Alkuolosuhteiden avulla saadaan määritettyä
esimerkiksi kuorimuurauksen korkea kosteuspitoisuus juuri muuraustyön valmistuttua.
[15.]

Tässä tutkimuksessa kaikkien rakenteiden alkulämpötilaksi on valittu 20 °C, jolloin oh-
jelma aloittaa laskennan tästä lämpötilasta. Alkukosteus määriteltiin puolestaan eri ra-
kennekerroksille tapauskohtaisesti. Alkukosteuksien tarkemmat arvot on esitetty luvus-
sa 5.2.

Laskentaparametrit

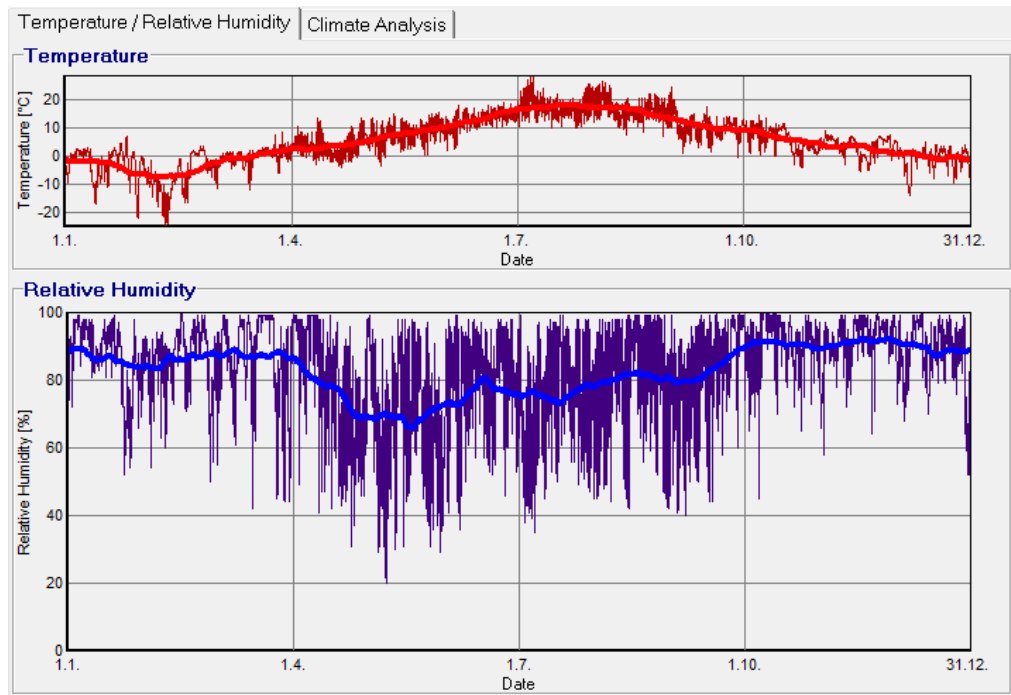
Tässä osiossa määritellään muun muassa tutkittavan ajanjakson pituus ja tarkkuus
sekä erilaisten laskentaan vaikuttavien ilmiöiden huomioiminen laskelmissa. Lasken-

nasta voidaan tässä vaiheessa jättää pois esimerkiksi kapillaarijohtuminen tai haihtumisesta johtuva viileneminen. Tässä tutkimuksessa laskenta-aikana käytettiin 10 vuoden pituista tarkastelujaksoa, jolloin rakenteiden toiminnan voidaan olettaa tasoittuvan vakiotilaan. Laskenta-aika oli tällöin 2011–2021. [15.]

Ilmasto

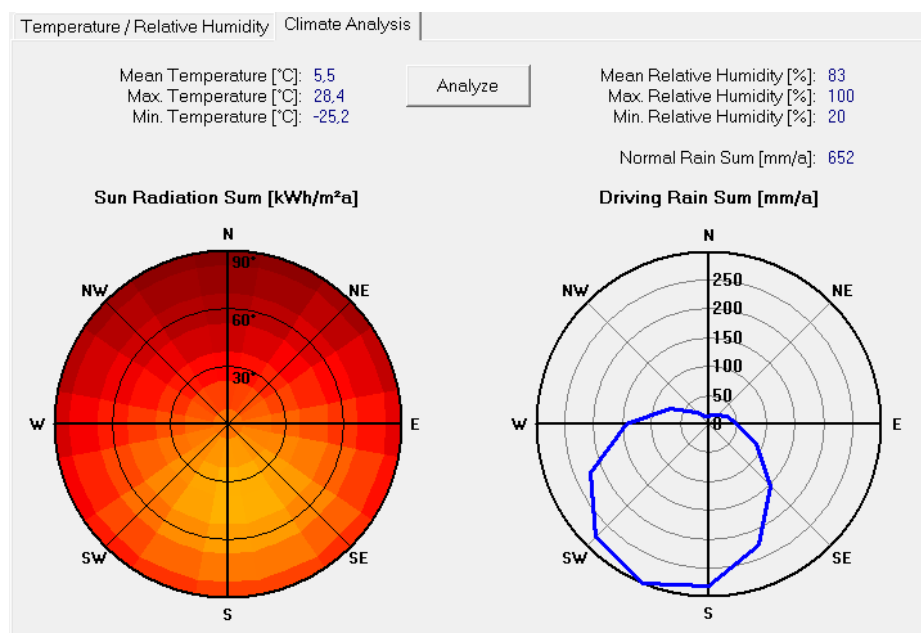
Ulko- ja sisäilmaston määrittämiseen on WUFI-ohjelmissa useita erilaisia menetelmiä. Ulkopuolinen ilmasto voidaan määrittää joko ohjelman tietopankista löytyvien kaupunkikohtaisten ilmastotietojen avulla tai malliin voidaan luoda erikseen kuvaajat lämpötilan ja suhteellisen kosteuden määrittämiseksi. Sisäilmaston arvot puolestaan määritetään ohjelmassa ulkoilmaston suhteen. Sisäilmaston määrittäminen voidaan tehdä muun muassa rakennuksen kokonaistilavuuden, ilmastointijärjestelmän sekä sisäpuolisen kosteuslisän ja lämpötilan mukaan. [15.]

WUFI Pro 4.2 -ohjelmassa ei ole saatavilla ilmastotietoja Lahdesta, joten tässä tutkimuksessa ulkopuolen ilmastoksi on valittu ohjelmasta löytyvät Espoon ilmastotiedot. Espoon ilmastotietojen käyttöä perustellaan sillä, että seinärakennetta tarkasteltaessa tutkimustuloksiin vaikuttaa suuresti WUFI-ohjelmassa määritelty viistosateen sekä auringonvalon lämpösäteilyn vaikutus. Mikäli WUFI-ohjelmaan olisi luotu Lahden ilmasto kuvaavat lämpötilan ja suhteellisen kosteuden kuvaajat, olisi viistosateen ja lämpösäteilyn vaikutus jäänyt tällöin huomioimatta. Kuvassa 10 on esitetty WUFI-ohjelman määrittämä Espoon ilmaston suhteellinen kosteus ja lämpötila yhden vuoden mittaisella ajanjaksolla. [15.]



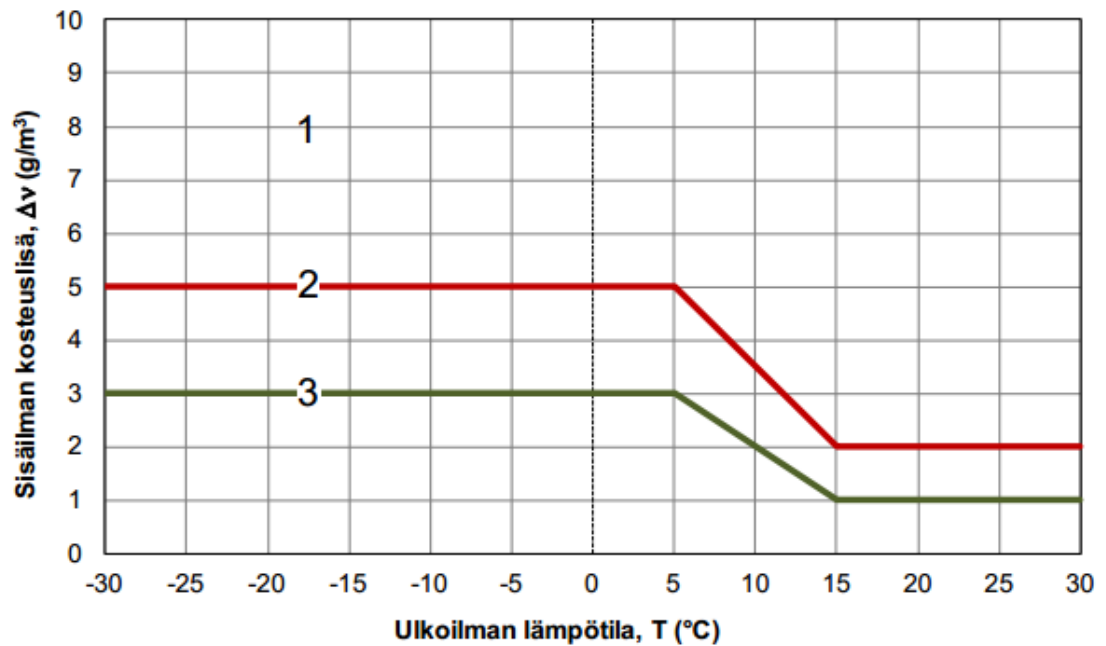
Kuva 10. Espoon keskilämpötila ja suhteellinen kosteus yhden vuoden aikana [10].

Vaikka käytetty ilmastodata ei vastaakaan täysin Lahden ilmastollisia olosuhteita, on sen vaikutuksen oletettu olevan tutkimuksen lopputuloksen kannalta varmallalla puolella. Kuvassa 11 on puolestaan kuvattu WUFI-ohjelman määrittämä viistosateen sekä auringonvalon suunta ja suuruus Espoossa. [15.]



Kuva 11. Viistosateen suunta ja suuruus sekä auringonvalon jakautuminen Espoossa [10].

Sisäilmastolle käytettiin myös ohjelman valmiita Espoon ilmastotietoja, jotka muokattiin sisäilmastoa vastaaviksi. Sisälämpötilan arvoksi asetettiin 22 °C, joka on tutkimuskoh- teesta aiempien tutkimusten perusteella mitattu keskimääräinen arvo. Sisäilman kos- teudeksi asetettiin RIL 107–2012 -ohjeiden mukainen sisäilman kosteuslisä. Simuloin- neissa käytettiin kosteusluokkaa 2, joka on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Sisäilman kosteuslisän mitoitusarvot ulkolämpötilan funktiona [14, s. 24].

5 Kosteus- ja lämpötekniset laskelmat

5.1 Yleistä

Tässä osiossa on esitetty tutkittavien seinien reunaehdot, alkuolosuhteet, tarkastelupisteet sekä simulointien tulokset. Koska molemmat talot ovat rakenteiltaan identtiset, on tutkimustuloksissa esitetty ainoastaan A-talon rakenteita koskevia tuloksia. Tutkittavia seiniä on tarkasteltu eri ilmansuuntien mukaan, jolloin saatuja tutkimustuloksia on rakennuksen etelä-, pohjois- ja itäsivuilta.

Kosteusteknistä toimintaa tarkasteltaessa on kriittisen kosteuspitoisuuden ja homeiden kasvun havainnollistamiseksi määritetty luvun 2.5 perusteella seuraavat raja-arvot: lämpötila yli 5 °C ja suhteellisen kosteus yli 80 % RH. Kun edellä mainitut olosuhteet jatkuvat pitkään, alkaa homeiden kasvua esiintyä rakenteissa. Lämpötilan ja kosteuden lisäksi homeiden kasvuun vaikuttaa materiaalin homehtumisherkyys. Kuten luvussa 2.5 todettiin, homekasvu voi kuitenkin alkaa minkä tahansa materiaalin pinnalla esiintyvissä epäpuhtauksissa, kun kriittisten olosuhdetekijöiden vaikutus jatkuu riittävän pitkään. Tässä tutkimuksessa materiaalien homehtumisherkyys on näin ollen jätetty huomioimatta laskelmissa.

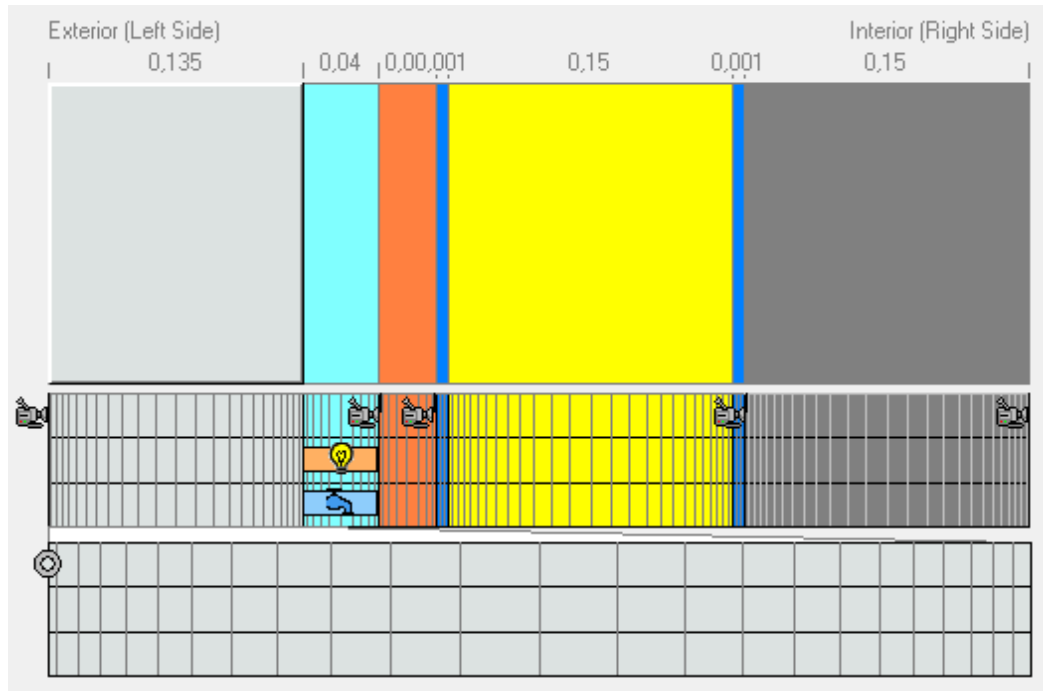
5.2 Tuuletusraon ilmanvaihtuvuus ja kosteustekninen toiminta

Ilmaraon mallinnus

Tutkittavien seinien kosteusteknistä toimintaa tutkittiin kuorimuurauksen takana olevan tuuletusraon toiminnan näkökulmasta. Tuuletusraon toimintaa tutkittaessa lähtökohtana oli havainnollistaa raossa esiintyvän tuuletuksen ja seinän kosteusteknisen toiminnan riippuvuutta toisistaan. WUFI-ohjelmissa tuuletusraon toiminnan havainnollistamiseen käytetään mallin tuuletusrakoon erikseen lisättävää ilmanvaihtolähdettä, jonka yksikkönä toimii ilmanvaihtokerroin (1/h).

Luvussa 2.4 on määritelty erilaisia tuuletusraon ilmanvaihtuvuuden arvoja. Tampereen Teknillisellä yliopistolla tehdyssä tutkimuksessa todettiin ilmanvaihtuvuuden vaihtelevan lämpötilasta ja ulkoisesta tuulennopeudesta riippuen välillä 8-30 vaihtoa tunnissa. Toisaalta Ruotsissa, Lundin yliopistolla tehdyissä laajoissa kenttämittauksissa

ilmanvaihtuvuuden havaittiin olevan tiilijulkisivuilla normaalien sääolosuhteiden aikana vain 0,3-8 vaihtoa tunnissa. Perustuen näihin lähteisiin, on tässä tutkimuksessa tarkasteltu tuuletusraon ilmanvaihtuvuutta välillä 0-30 (1/h). Kuvassa 13 on esitetty tutkittavan seinärakenteen malli WUFI-ohjelmassa. Tuuletusrako on kuvattuna turkoosilla värillä.



Kuva 13. Tutkittava seinärakenne kuvattuna WUFI Pro 4.2 -ohjelmassa [10].

WUFI Pro 4.2 -ohjelman materiaalitietokannasta ei suoraan löydy eri paksuisten ilmakerrosten materiaaliarvoja, joten arvot joudutaan manuaalisesti muokkaamaan niin, että ne vastaavat mahdollisimman tarkasti todellisuutta. Tässä tutkimuksessa tarkastellun rakenteen tuuletusrako on paksuudeltaan 40 mm, joten lämmönjohtavuus tällaiselle tuuletusraolle saadaan seuraavan kaavan 18 mukaan. [28.]

$$\lambda = \frac{d}{0,2 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}} = \frac{0,04m}{0,2 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}} = 0,2 \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \quad (18)$$

missä, d on ainekerroksen paksuus

Myöskään vesihöyryn diffuusionvastuskertoimen laskentakaavaa tällaiselle ilmakerrokselle ei ohjelmasta löydy, joten määritetään se kaavalla 19 [28].

$$\mu = \frac{0,02\text{m}}{d} = \frac{0,02\text{m}}{0,04\text{m}} = 0,5 \quad (19)$$

missä, d on ainekerroksen paksuus

Muut tuuletusraon materiaaliarvot otettiin WUFI-ohjelman omasta materiaalitietopankista. Materiaaliarvot on esitetty liitteessä 1.

Reunaehdot

Tutkittavien seinien ylin kohta on maanpinnasta mitattuna noin 20 metrin korkeudessa, joten WUFI-laskelmissa viistosateen kerroin vaihtelee korkean rakennuksen alaosalta määritellystä kertoimesta 0,05 korkean rakennuksen keskiosalle määriteltyyn kertoimeen 0,1. Kuorimuurauksessa käytetyn julkisivutiilen auringonsäteilyn absorptiokertoimeksi on määritetty tiilen värin perusteella 0,36 ja auringonsäteilyn emissiivisyys on tällöin 0,9. Pintavastusten arvot sisä- ja ulkopinnalle on saatu RakMk C4 (2012) määräyksistä. Taulukossa 3 on esitetty WUFI-laskelmissa määritetyt seinien reunaehdot.

Taulukko 3. Reunaehdot WUFI-laskelmissa [10].

	Ulkopinta	Sisäpinta
Lämmönvastus [m ² K/W]	0,04	0,13
S _d -arvo [m]	-	0,5
Lyhytaaltoisen säteilyn absorptio [-]	0,36	-
Pitkäaaltoisen säteilyn emissiivisyys [-]	0,9	-
Sateen imeytymiskerroin [-]	0,7	-
Ilmansuunta	Pohjoinen, etelä, itä	
Kaltevuuskulma [°]	90	
Viistosateen kerroin 1 [-]	-	
Viistosateen kerroin 2 [s/m]	korkean rakennuksen alaosa, h < 10 m	0,05
	korkean rakennuksen keskiosa, h = 10–20 m	0,1
Rakennuksen korkeus	Korkea rakennus	

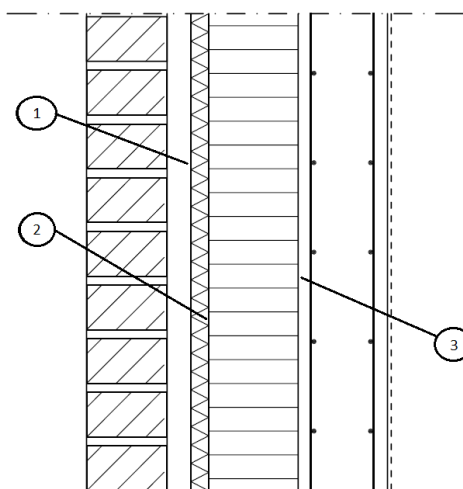
Alkuolosuhteet

Alkukosteudeksi määritettiin kaikille muille, paitsi betoniselle sisäkuorielementille, WU-FI-ohjelmassa valmiiksi annetut arvot. Tällöin oletuksena on, että eristemateriaalit eivät ole kastuneet rakennusvaiheessa. Betonisen sisäkuorielementin alkukosteuden arvoksi määriteltiin tutkimuksessa 80 % RH vastaava C35/45 betonin kosteusmäärä. Betonin alkukosteuden arvo päädyttiin valitsemaan sisäpuolisen maalipinnan vaatiman pinnoituskosteuden mukaan. Betonin tasapainokosteuskäyrä on esitetty liitteessä 1. Taulukossa 4 on esitetty laskelmissa käytetyt materiaalien alkukosteudet.

Taulukko 4. US1 materiaalikerrosten alkukosteus [10].

Materiaalikerros	Alkukosteus [kg/m ³]
Tiilimuuraus	100,0
Ilma	0,0
Mineraalivilla	0,0
Alumiinilaminaatti	0,0
Polyuretaani	0,0
Alumiinilaminaatti	0,0
Betoni C35/45	75,0

Tarkastelupisteet

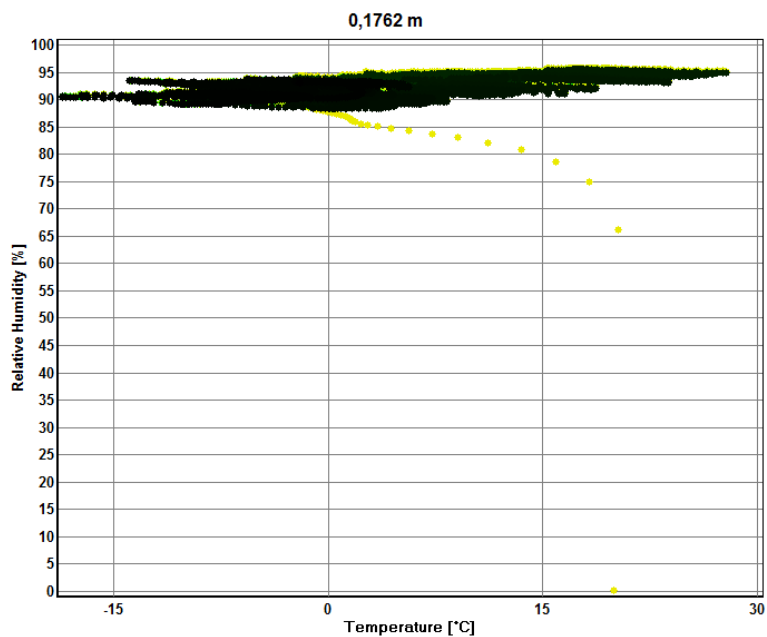


Kuva 14. Tarkastelupisteiden sijainti.

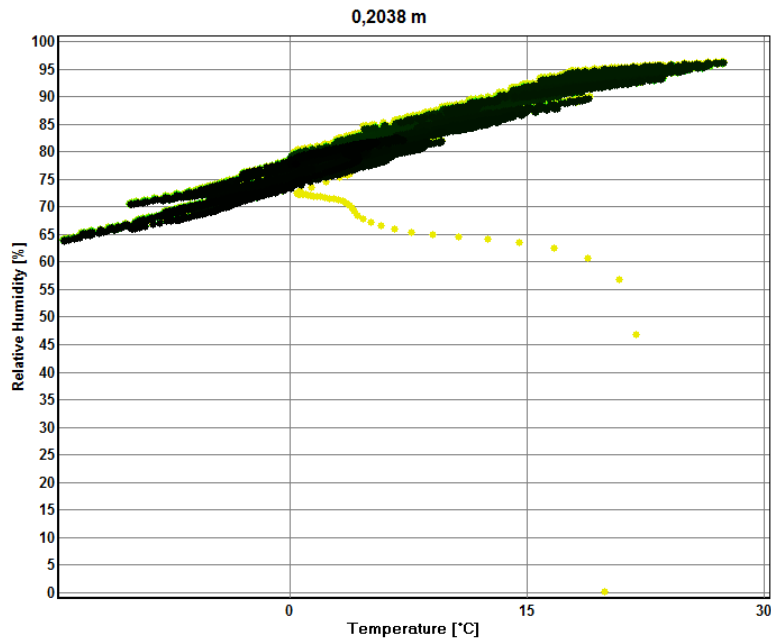
Tarkastelupisteitä oli kolme: mineraalivillan ulkopinta (1), mineraalivillan ja polyuretaanieristeen rajapinta (2) sekä polyuretaanieristeen ja betonisen sisäkuorielementin rajapinta (3). Kuvassa 14 on esitetty tarkastelupisteiden sijainnit.

Tulokset

Kun tuuletusraon ilmanvaihtuvuus oli tasolla 0 vaihtoa tunnissa, havaittiin, että etelänpuoleisella seinällä suhteellinen kosteus pysyi tarkastelupisteessä 1 ympäri vuoden 90–95 % RH tasolla. Lisäksi eteläseinällä tarkastelupisteessä 2 lämpötilan ollessa yli 5 °C, oli suhteellisen kosteuden vaihtelu välillä 80–95 % RH. Tarkastelupisteen korkeudella ei ollut merkittävää vaikutusta suhteellisen kosteuden arvoihin. Kuvaajasta voidaan havaita suhteellisen kosteuden pysyvän laskennan alusta asti samalla tasolla. Kuvissa 15 ja 16 on esitetty eteläseinän kosteusjakauman riippuvuus lämpötilasta tarkastelupisteissä 1 ja 2, kun ilmanvaihtuvuus on tasolla 0.

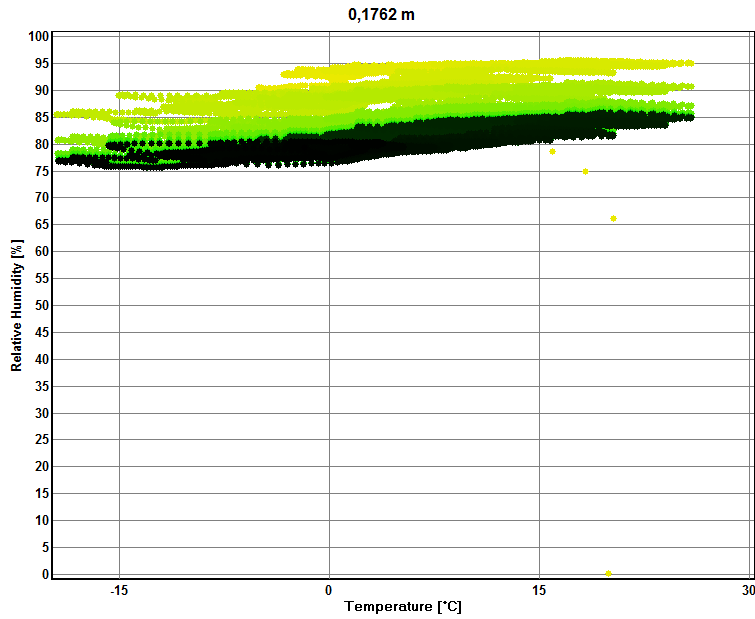


Kuva 15. Eteläseinä, tarkastelupiste 1, ilmanvaihtuvuus 0 (1/h), rakennuksen alaosa [10].

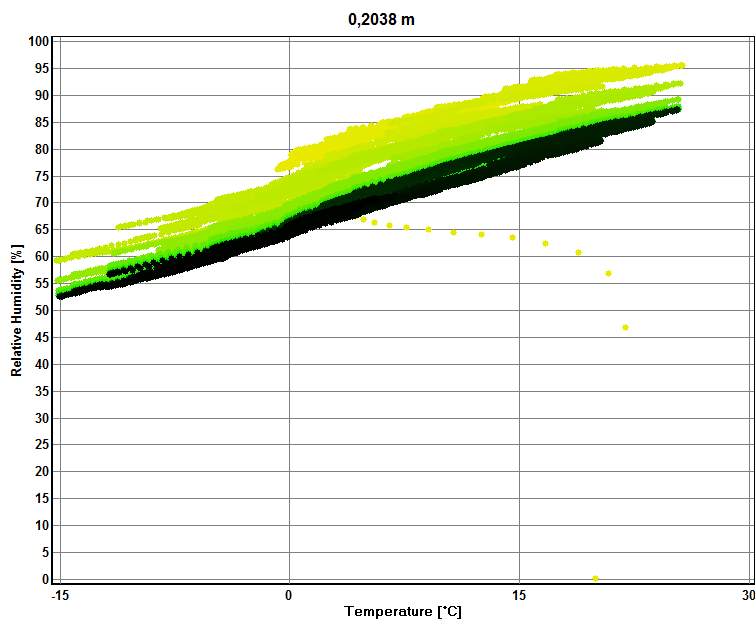


Kuva 16. Eteläseinä, tarkastelupiste 2, ilmanvaihtuvuus 0 (1/h), rakennuksen alaosa [10].

Pohjoisseinän ja itäseinän kesken tulokset olivat ilmanvaihtuvuudella 0 lähes identtiset. Suhteellinen kosteus pysyi näissä seinissä tarkastelupisteessä 1 koko vuoden ajan 75–85 % RH tasolla. Tarkastelupisteessä 2 suhteellinen kosteus puolestaan vaihteli välillä 70–90 % RH, kun lämpötila oli yli 5 °C. Myöskään näissä seinissä ei tarkastelupisteen korkeudella ollut merkittävää vaikutusta suhteellisen kosteuden arvoihin. Kuvissa 17 ja 18 on esitetty pohjoisseinän kosteusjakauma tarkastelupisteissä 1 ja 2 ilmanvaihtuvuuden ollessa tasolla 0.



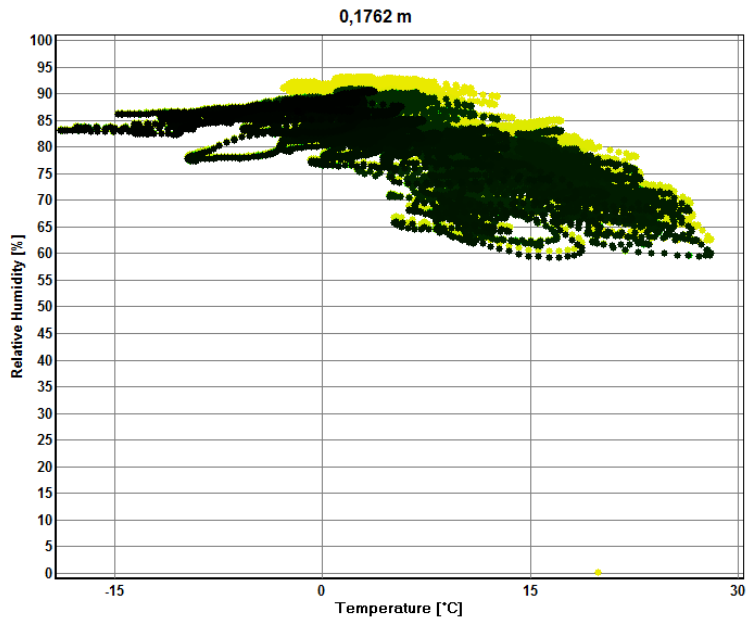
Kuva 17. Pohjoisseinä, tarkastelupiste 1, ilmanvaihtuvuus 0 (1/h), rakennuksen alaosa [10].



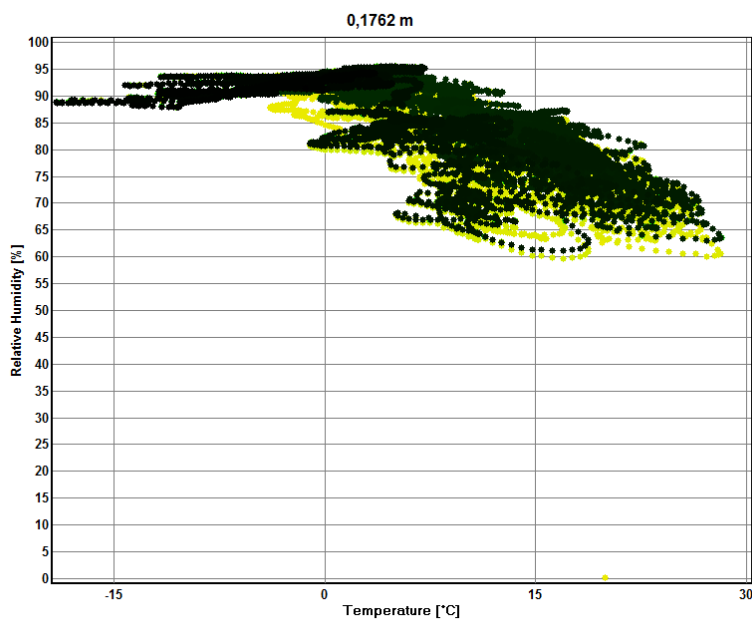
Kuva 18. Pohjoisseinä, tarkastelupiste 2, ilmanvaihtuvuus 0 (1/h), rakennuksen alaosa [10].

Ilmanvaihtuvuutta lisättäessä havaittiin, että asetettujen raja-arvojen alle päästiin eteläseinän tarkastelupisteessä 1 seinän alaosissa ilmanvaihtuvuudella 20 (1/h) ja seinän yläosissa ilmanvaihtuvuudella 25 (1/h). Tällöin suhteellinen kosteus tarkastelupisteissä vaihteli yli 5 °C lämpötilassa seinän alaosissa välillä 60–90 % RH ja seinän yläosissa

välillä 60–95 % RH. Vaikka suhteellisen kosteuden maksimiarvo näillä ilmanvaihtuvuuksilla pysyy vieläkin korkeana, voidaan kuvista 19 ja 20 kuitenkin havaita, että suurin jakauma osuu molemmissa tapauksissa 80 % RH alapuolelle ja näin ollen kriittinen kosteuspitoisuus ei ole seinässä tällä ilmanvaihtuvuudella arvolla jatkuvaa.

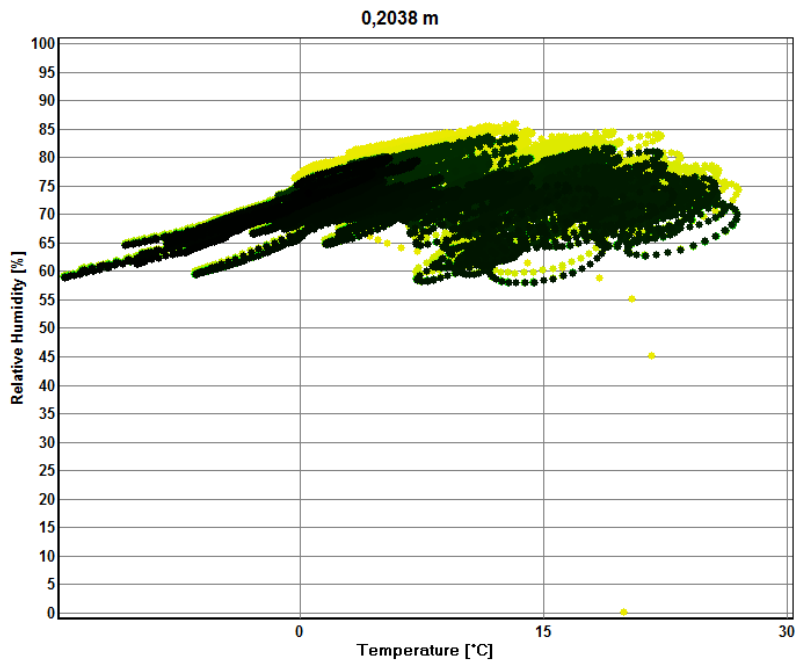


Kuva 19. Eteläseinä, tarkastelupiste 1, ilmanvaihtuvuus 20 (1/h), seinän alaosa [10].

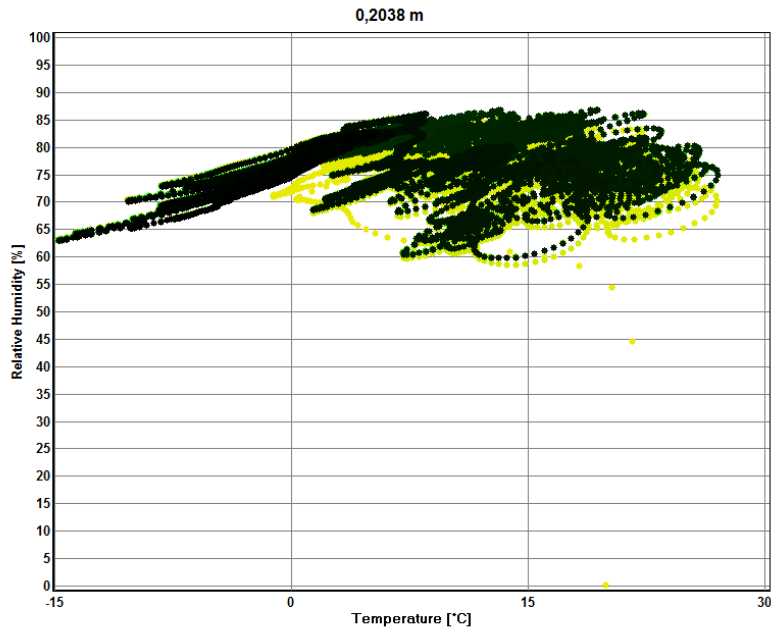


Kuva 20. Eteläseinä, tarkastelupiste 1, ilmanvaihtuvuus 25 (1/h), seinän yläosa [10].

Eteläseinän tarkastelupisteessä 2, asetettujen raja-arvojen alle päästiin seinän alaosis-
sa ilmanvaihtuvuudella 15 (1/h) ja yläosissa ilmanvaihtuvuudella 20 (1/h). Tällöin suh-
teellinen kosteus vaihteli raja-arvoksi asetetun lämpötilan yläpuolella korkeusasemasta
riippumatta noin 60–85 % RH välillä. Kuten tarkastelupisteen 1 kohdalla todettiin, voi-
daan kuvista havaita suurimman jakauman osuvan kuitenkin molemmissa tapauksissa
alle 80 % RH, jolloin homehtumisriskiä ei rakenteessa näillä ilmanvaihtuvuuden arvoilla
ole.

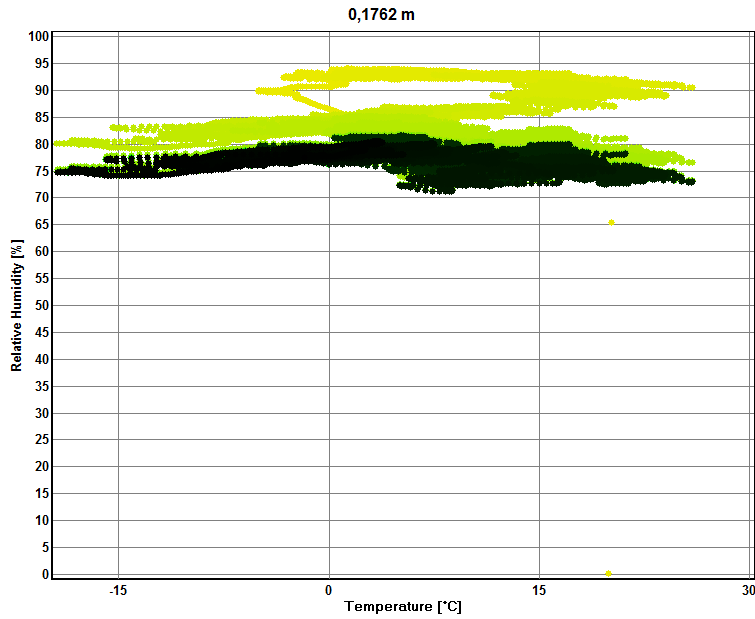


Kuva 21. Eteläseinä, tarkastelupiste 2, ilmanvaihtuvuus 15 (1/h), seinän alaosa [10].

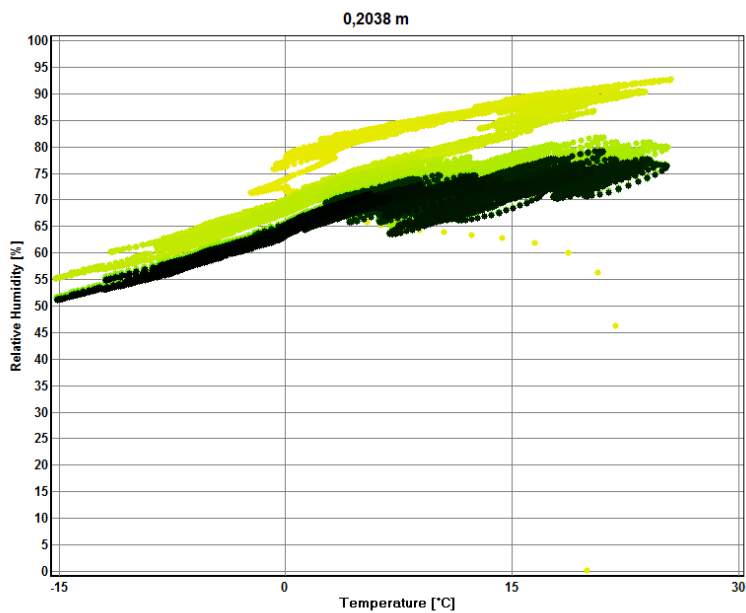


Kuva 22. Eteläseinä, tarkastelupiste 2, ilmanvaihtuvuus 20 (1/h), seinän yläosa [10].

Pohjois- ja itäseinillä sekä tarkastelupisteessä 1 että tarkastelupisteessä 2, asetettujen raja-arvojen alle päästiin huomattavasti pienemmällä ilmanvaihtuvuuden arvolla. Näissä seinissä asetetut raja-arvot saavutettiin jo ilmanvaihtuvuudella 5 (1/h). Myös tällä ilmanvaihtuvuuden arvolla molempien seinien kosteusjakaumat olivat todella lähellä toisiaan. Molemmissa seinissä kosteuspitoisuus vaihteli tarkastelupisteessä 1 koko vuoden ajan 70–80 % RH välillä, tarkastelupisteen korkeusasemasta riippumatta. Tarkastelupisteessä 2 kosteuspitoisuuden vaihtelu oli vuoden aikana puolestaan välillä 50–80 % RH. Myöskään tässä pisteessä korkeusasemalla ei ollut merkitystä kosteuspiitoisuuteen. Saatujen tuloksien perusteella havaitaan, että pohjois- ja itäseinillä suhteellinen kosteus pysyy ilmanvaihtuvuuden arvolla 5 alle homehtumisrajan koko vuoden ajan, lämpötilasta riippumatta. Kuvissa 23 ja 24 on esitetty pohjoisseinän kosteusjakauma tarkastelupisteissä 1 ja 2.

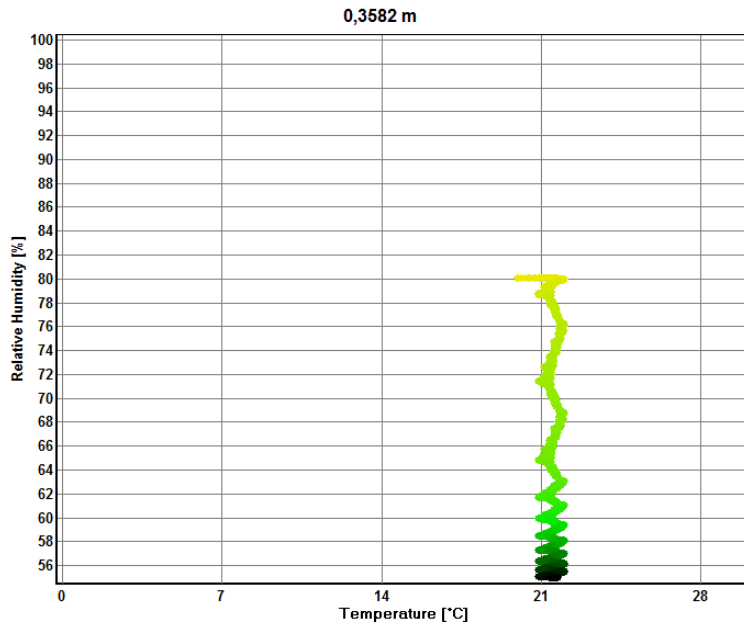


Kuva 23. Pohjoisseinä, tarkastelupiste 1, ilmanvaihtuvuus 5 (1/h) [10].



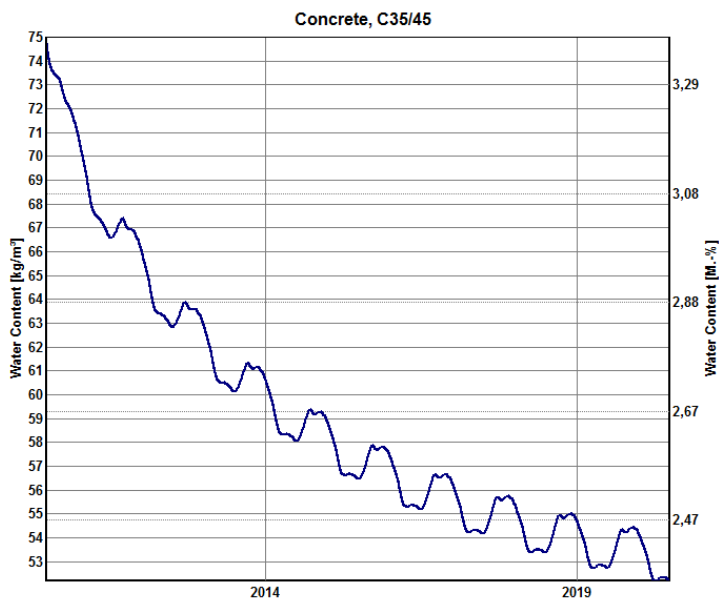
Kuva 24. Pohjoisseinä, tarkastelupiste 2, ilmanvaihtuvuus 5 (1/h) [10].

Tarkastelupisteen 3 kohdalla havaittiin suhteellisen kosteuden arvon olevan riippumaton tuuletusraon ilmanvaihtuvuudesta, rakenteen ilmansuunnasta sekä tarkastelupisteen korkeusasemasta. Suhteellinen kosteus tarkastelupisteessä 3 on esitetty kuvassa 25.



Kuva 25. Suhteellinen kosteus tarkastelupisteessä 3 [10].

Syynä tarkastelupisteessä 3 saatuihin tuloksiin on seinän todella suuri diffuusiovastus. Tällöin betonisen sisäkuorielementin kuivuminen tapahtuu ainoastaan elementin sisäpinnasta ja on näin ollen todella hidasta. Kuvassa 26 on esitetty betonisen sisäkuorielementin kosteuden määrä ajan funktiona.



Kuva 26. Betonisen sisäkuorielementin kosteus (kg/m^3) ajan funktiona [10].

Tulosten tarkastelu

Kun tuuletusraon ilmanvaihtuvuus on tasolla 0, havaitaan tuloksista selkeästi, että eteläseinällä esiintyy suuri homehtumisriski seinärakenteen uloimmissa osissa. Pohjois- ja itäseinän kohdalla voidaan todeta homehtumisriskin myös olevan olemassa, mutta se ei ole yhtä merkittävä kuin eteläseinän kohdalla. Ilmanvaihtuvuutta lisättäessä havaitaan, että kriittiset olosuhteet alitetaan eteläseinällä ilmanvaihtuvuuden arvolla 25 (1/h) ja pohjois- ja itäseinällä arvolla 5 (1/h). Eteläseinän alaosissa (korkeus alle 10 m) tosin päästään kriittiseksi asetettujen olosuhteiden paremmalle puolelle jo ilmanvaihtuvuudella 20 (1/h), mutta seinän yläosissa tämä arvo ei ole vielä riittävä.

Eteläseinän tarkastelupisteissä esiintyvä huomattavasti korkeampi suhteellinen kosteus johtuu viistosateesta sekä auringonsäteilyn vaikutuksesta. Luvussa 4.1.2 esitetyistä ilmastotiedoista voidaan havaita, että viistosade sekä auringonsäteily osuvat molemmat vuoden aikana lähes samalle alueelle, eli etelänpuoleiseen seinään. Kun aurinko lämmittää viistosateen kastelemaa kuorimuurausta, haihtuu kuorimuurauksen kosteus tuuletusrakoon ja siirtyy tuuletusraosta seinärakenteisiin. Toisaalta luvussa 2.4 on todettu, että auringonsäteilyn lämpövaikutuksella on tuuletusraon ilmanvaihtuvuutta lisäävä vaikutus. Näin ollen voidaankin todeta, että vaikka eteläseinillä kosteuspitoisuus tuuletusraossa ja seinärakenteissa on muita seiniä korkeampi, on auringonsäteilyn vaikutuksesta myös tuuletusraon ilmanvaihtuvuus eteläseinillä muita seiniä suurempi.

Tarkastelupisteen 3 kohdalla saadut tulokset selittyvät lämmöneristeenä käytetyn polyuretaanin tiiveydellä. Alumiinilaminaatilla pinnoitettu polyuretaanieriste estää kosteuden siirtymistä diffuusion ja konvektion vaikutuksesta ulkoa sisälle ja päinvastoin. Toisin sanoen, tuloksista voidaan havaita, että rakennusvaiheessa vielä suuren kosteuspitoisuuden omaavan sisäkuorielementin kuivuminen tapahtuukin ainoastaan elementin sisäpinnasta ja pelkästään rakennuksen sisäpuolelle päin, ollen näin hyvin hidasta. Lisäksi sisäpinnan maalipinta hidastaa kuivumista entisestään. Kuten kuvasta 26 voidaan havaita, betonisen sisäkuoren kosteuskäyrän tasoittuminen vie useita vuosia aikaa, jolloin kosteus polyuretaanieristeen ja sisäkuorielementin rajapinnassa pysyy korkeana todella pitkään. Kosteuden korkea arvo ei kuitenkaan ole homehtumisen kannalta kriittinen, sillä suhteellinen kosteus pysyy tarkastelupisteessä 3 alle 80 % RH, vaikka lämpötila kyseisessä pisteessä onkin homeiden kasvulle suotuinen.

5.3 U-arvo muuratussa julkisivussa

Yhtenä tämän tutkimuksen tavoitteena oli tarkastella U-arvon laskentakaavan soveltamista tuuletusraolla varustettujen muurattujen julkisivujen kohdalla. U-arvon laskentaa tutkittiin RakMk C4 (2012) mukaisten laskukaavojen avulla. Nykyisissä määräyksissä U-arvon laskentakaava tuuletusraolisessa seinärakenteessa perustuu ilmakerroksen tuulettavuuteen. Ilmakerrokset määritellään määräyksissä kolmella eri tavalla: tuulettumaton, lievästi tuulettuva tai hyvin tuulettuva. [7, s. 22–23.]

Tuulettuvaksi ilmaväliksi luokitellaan sellainen rakennusosassa oleva ilmaväli, jonka kautta kulkee tuulettava ilmavirtaus rakennusosan reunalta toisella. Tällainen ilmaväli luokitellaan seinärakenteissa hyvin tuulettuvaksi, kun siihen johtavien aukkojen yhteenlaskettu pinta-ala on suurempi kuin 1500 mm^2 jokaista ilmavälin korkeusmetriä kohden. Mikäli kyseinen ehto täyttyy, ei ilmakerroksen eikä sen ulkopuolella olevien ainekerroksien lämmönvastoja saa ottaa huomioon U-arvoa laskettaessa. Pintavastuksena saadaan kuitenkin käyttää ilmavälin sisäpinnalla sisäpuolisen pintavastuksen arvoa. [7, s. 24.]

Tässä tutkimuksessa tarkasteltujen kuorimuurattujen seinien maksimikorkeus on noin 20 m. Edellisen määritelmän mukaan, tuuletusrako siis luokitellaan hyvin tuulettuvaksi, mikäli siihen johtavien aukkojen yhteispinta-ala ylittää arvon:

$$A = 1500 \text{ mm}^2 \times 20 = 30\,000 \text{ mm}^2 \quad (20)$$

Tämän tutkimuksen seinärakenteessa tuuletus on toteutettu kuorimuurauksen alaosaan niin, että joka toinen alimman tiilirivin pystysauma on jätetty auki. Yläosaan tuuletusväli on puolestaan koko matkaltaan avoin rakenne. Oletetaan laskennallista tarkastelua varten yhden seinän pituudeksi 10 m ja tiilimuurauksen pystysaumojen paksuudeksi 15 mm. Tässä tutkimuksessa käytetyn tiilen pituus on 285 mm ja korkeus 85 mm. Tällöin yhden metrin matkalla pystysaumojen lukumäärä on noin 3 kpl. Saumoja koko seinän matkalla on tällöin 30 kpl, joista auki on jätetty 15 kpl. Lasketaan kuorimuurauksen ala- ja yläosan tuuletusaukkojen yhteispinta-ala A_V :

Alaosan aukkojen pinta-ala A_{V1} :

$$A_{V1} = 85 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}^2 \times 15 = 19\,125 \text{ mm}^2 \quad (21)$$

Yläosan aukkojen pinta-ala A_{v2} , kun tuuletusvälin leveys 40 mm:

$$A_{v2} = 40 \text{ mm} \times 10\,000 \text{ m} = 400\,000 \text{ mm}^2 \quad (22)$$

Aukkojen yhteenlaskettu pinta-ala A_v :

$$A_v = 400\,000 \text{ mm}^2 + 19\,125 \text{ mm}^2 = 419\,125 \text{ mm}^2 \quad (23)$$

Koska tuuletusrako on yläosastaan koko matkalta auki, ylittyy vaadittu aukkojen yhteispinta-ala selkeästi ja tuuletusväli luokitellaan näin ollen hyvin tuulettuvaksi ilmväliksi.

5.3.1 Hyvin tuulettuvan seinärakenteen U-arvon laskenta

Nykyisissä määräyksissä U-arvon laskenta on esitetty seuraavasti kaavan 24 avulla [7, s. 6.]:

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (24)$$

missä, R_T on rakennusosan kokonaislämmönvastus ympäristöstä ympäristöön

Tutkittavissa rakennusosissa ainekerrokset ovat tasapaksuja sekä tasa-aineisia ja lämpö siirtyy niissä ainekerroksiin nähden kohtisuoraan. Tällöin rakennusosan kokonaislämmönvastus R_T on:

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_m + R_g + R_b + R_{q1} + R_{q2} + \dots + R_{qn} + R_{se} \quad (25)$$

missä,	R_{si}	on sisäpuolinen pintavastus
	$R_{1\dots m}$	on ainekerroksen lämmönvastus
	R_g	on rakennusosassa olevan ilmakerroksen lämmönvastus
	R_b	on maan lämmönvastus
	$R_{q1\dots qn}$	on ohuen ainekerroksen lämmönvastus
	R_{se}	on ulkopuolinen pintavastus

Ainekerrosten lämmönvastukset saadaan kaavalla 26:

$$R_1 = \frac{d_1}{\lambda_1}, R_2 = \frac{d_2}{\lambda_2}, \dots, R_m = \frac{d_m}{\lambda_m} \quad (26)$$

missä, $d_{1...m}$ on ainekerroksen paksuus (m)
 $\lambda_{1...m}$ on ainekerroksen lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo

Lasketaan edellä mainittujen kaavojen avulla hyvin tuulettuvalle ilmapälille U-arvo. Laskennassa ei oteta huomioon muuraussiteiden aiheuttamien kylmäsiltojen vaikutusta. Pintavastuksina R_{si} ja R_{se} voidaan käyttää tällöin arvoa $0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$. [7, s. 22.]

Betonin lämmönvastus:

$$R_1 = \frac{0,15 \text{ m}}{1,6 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} = 0,094 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \quad (27)$$

Polyuretaanin lämmönvastus:

$$R_2 = \frac{0,15 \text{ m}}{0,023 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} = 6,52 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \quad (28)$$

Mineraalivillan lämmönvastus:

$$R_3 = \frac{0,03 \text{ m}}{0,037 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} = 0,81 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \quad (29)$$

Kokonaislämmönvastus:

$$R_T = (0,13 + 0,094 + 6,52 + 0,81 + 0,13) \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} = 7,684 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \quad (30)$$

Hyvin tuulettuvan rakenteen U-arvo:

$$U = \frac{1}{7,684 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}} = 0,13 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (31)$$

5.3.2 Vaihtoehtoinen U-arvon laskenta

Tämän tutkimuksen luvussa 2.4 todettiin, että aiemmissa tutkimuksissa tarkasteltujen kuorimuurattujen seinien kohdalla ilmavirtaukset vaihtelivat tuuletusraossa suuresti. Tutkimuksissa saatujen tulosten perusteella ilmavirtaus oli alhaisilla lämpötiloilla tuuletusraossa todella pieni ja tuuletusrako näyttikin toimivan lähes suljetun ilmavälin tavoin. Näihin tutkimustuloksiin viitaten, tarkastellaan seuraavaksi onko ilmavälin määrittämisellä täysin tuulettumattomaksi merkittävää vaikutusta U-arvoon. Täysin tuulettumattoman ilmavälin lämmönvastuksen arvo R_{gu} saadaan taulukosta 5. [7, s. 23.]

Taulukko 5. Tuulettumattoman ilmakerroksen lämmönvastuksia (R_{gu}) [7, s. 23].

Rajoittavien pintojen yhdistetty emissiviteetti -	Ilmaraon paksuus (d_g) mm	Tuulettumattoman ilmakerroksen lämmönvastus (R_{gu}) $m^2 K/W$		
		Lämpövirran suunta		
		Ylöspäin	Vaakasuoraan	Alaspäin
yleinen tapaus ei heijastavia pintoja $\varepsilon > 0,8$	5	0,11	0,11	0,11
	10	0,15	0,15	0,15
	15	0,16	0,17	0,17
	20	0,16	0,18	0,18
	50	0,16	0,18	0,21
	100	0,16	0,18	0,22
	300	0,16	0,18	0,23
toinen pinta heijastava $\varepsilon < 0,2$	5	0,17	0,17	0,17
	10	0,29	0,29	0,29
	15	0,34	0,38	0,38
	20	0,34	0,44	0,44
	50	0,34	0,44	0,67
	100	0,34	0,44	0,75
	300	0,34	0,44	0,83

Ilmavälin paksuus 40 mm, joten lämmönvastus $R_{gu} = 0,18 m^2K/W$.

Tiilimuurauksen lämmönvastus:

$$R_4 = \frac{0,135 \frac{m}{W}}{0,6 \frac{W}{mK}} = 0,225 \frac{m^2K}{W} \quad (32)$$

Kokonaislämmönvastus:

$$R_T = (0,13 + 0,094 + 6,52 + 0,81 + 0,18 + 0,225 + 0,04) \frac{m^2K}{W} = 7,999 \frac{m^2K}{W} \quad (33)$$

Tuulettumattoman rakenteen U-arvo:

$$U = \frac{1}{7,999 \frac{m^2K}{W}} = 0,125 \frac{W}{m^2K} \quad (34)$$

Tuloksesta havaitaan, että tuulettumattomalla ilmavälillä varustetun rakenteen U-arvo paranee noin 4 %, verrattaessa hyvin tuulettuvan rakenteen U-arvoon. Lämmönläpäisykertoimen, eli U-arvon, ollessa suoraan verrannollinen rakenteen lämpöhäviöihin, voidaan todeta, että rakennuksen ulkoseinän kautta tapahtuvat lämpöhäviöt pienenevät tällöin myös 4 %. Nopeasti tehdyn johtopäätöksen perusteella, tällä laskentatavalla saatu hyöty näyttäisi jäävän melko pieneksi. On kuitenkin hyvä muistaa, että rakennuskorkeuden kasvaessa ulkoseinien lämpöhäviöiden osuus rakennuksen kokonaislämpöhäviöistä kasvaa huomattavasti. Näin ollen pienetkin parannukset rakenteiden lämpöhäviöissä on syytä ottaa huomioon.

Luvussa 2.4 todettiin, että kuorimuurattujen seinien tuuletusraossa tapahtuva ilmavirtaus siis vaihtelee suuresti eri muuttujien vaikutuksesta. Lisäksi todettiin, että alhaisilla lämpötiloilla tuuletusraon ilmavirtaukset olivat hyvin pieniä, lähes olemattomia. Kuorimuurattujen ulkoseinien tapauksessa, voidaankin tulevaisuudessa miettiä lämmönläpäisykertoimen laskennan muokkaamista tuulettumattoman ja tuulettuvan seinärakenteen U-arvojen osuuksien suhteeksi. Tällöin rakenteen U-arvo voitaisiin määrittää esimerkiksi niin, että talvikaudella ilmaväli otettaisiin laskennassa huomioon tuulettumattomana ja kesäkaudella puolestaan tuulettavana. Näin laskettu U-arvo vastaisi luvussa 2.4 tutkittujen kuorimuurattujen seinien todellista tilannetta tarkemmin.

Edellä mainittu U-arvon laskennan muokkaaminen tekisi toisaalta laskennasta huomattavasti monimutkaisempaa ja vaatisi aina erillistä selvitystä tuuletuksen todellisesta tilasta. Lisäksi tuuletusraolisessa seinärakenteessa tuuletusraon pääsiallisena tehtävänä on toimia rakenteisiin kertyneen kosteuden poistajana ja näin ollen sen merkitys lämpöteknisen toiminnan kannalta ei ole niin keskeistä.

6 Mittauksien ja laskennan vertailu

Tietokonesimuloinnin ja käsin laskennan lisäksi tässä tutkimuksessa suoritettiin mittauksia rakenteista paikanpäällä. Vaadittavien resurssien vuoksi, mittaukset kohdistettiin ainoastaan tuuletusraon toiminnan tarkasteluun rakennuksen pohjoisseinällä. Mittaus-tuloksissa käytetyt ulkolämpötilojen arvot on saatu tutkimuskohteeseen asennetusta ulkolämpötila-anturista, joka tallentaa ulkoilman lämpötiloja ympäri vuoden 1 minuutin välein. Lämpötila-anturin hallinnasta vastaa Shneider Eletric Oy.

Mittaukset toteutettiin yhden viikon mittaisella aikajaksolla 18.3–25.3.2014, jolloin tuuletusraon suhteellista kosteutta ja lämpötilaa mitattiin 0,5h välein. Suhteellisen kosteuden ja lämpötilan lisäksi mitattiin tuuletusraon hetkellistä ilman virtausnopeutta. Virtausnopeutta mitattiin sekä lämpötila- ja kosteusantureiden asentamisen yhteydessä, että niiden pois ottamisen hetkellä. Tehdyt mittaukset toteutettiin A-talon 5-kerroksen länsisivulla olevan parvekkeen kautta.

6.1 Mittalaitteet

Tuuletusraon suhteellista kosteutta ja lämpötilaa mitattiin Rotronic Hydrolog -mittalaitteella. Laitevalmistaja ilmoittaa mittalaitteen tarkkuudeksi $\pm 1.5\%$ RH ja 0.2 K. Tuuletusraon ilmavirtauksen mittaamiseen käytettiin puolestaan Testo 490 -mittalaitetta. Laitevalmistaja ilmoittaa tälle laitteelle tarkkuudeksi $\pm 0,05$ m/s ilmavirtauksen ollessa välillä 0...2 m/s. [22; 23.]



Kuva 27. Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittaukseen käytetty Rotronic Hydrolog -mittalaite kuvassa vasemmalla. Oikealla ilman virtausnopeuden mittaamiseen käytetty Testo 490 -mittalaite.

6.2 Mittaustulokset

Ilmavirtaus tuuletusraossa

Tuuletusraossa vaikuttavaa hetkellistä ilmavirtausta mitattiin kahdella eri mittauksella: ensimmäisen kerran 18.3.2014 klo 10.00 ja toisen kerran 25.3.2014 klo 15.15. Molemmilla mittauskerroilla virtausnopeutta mitattiin 10 minuutin ajan. Taulukossa 6 on esitetty molempien mittauskertojen keskimääräinen virtausnopeus ja ulkolämpötila mittaushetkellä.

Taulukko 6. Virtausnopeus ja mittaushetken ulkolämpötila.

Aika	Keskimääräinen virtausnopeus (m/s)	Ulkolämpötila (°C)
18.3.2014 klo 10.00	0,03	– 4,5
25.3.2014 klo 15.15	0,03	5,3

Kuten taulukosta havaitaan, keskimääräinen ilman virtausnopeus tuuletusraossa oli molempien 10 minuutin mittaisen aikajakson aikana 0,03 m/s. Virtausnopeus vaihteli mittauksien aikana vain $\pm 0,01$ m/s. Ulkolämpötilalla ei ollut vaikutusta virtausnopeuteen. Ilmavirtauksien mittaamiseen käytetyn Testo 490 -mittalaitteen valmistajan mukaan, laitteen mittatarkkuus on kuitenkin välillä 0...2 m/s olevilla ilmavirroilla $\pm 0,05$ m/s, joka tarkoittaa käytännössä sitä, että tuuletusraossa ei mittaushetkellä välttämättä ollut ilmavirtausta lainkaan.

Jos kuitenkin oletetaan, että tuuletusraon ilmavirtaus mittaushetkellä oli todellisuudessa 0,03 m/s, voidaan tälle virtausnopeudelle laskea ilmanvaihtuvuuden arvo seuraavasti kaavan 35 avulla. Tällöin aika, joka kuluu siihen, että tuuletusraon ilmatilavuus vaihtuu yhden kerran, saadaan jakamalla seinän korkeus 20 m keskimääräisellä virtausnopeudella 0,03 m/s. Yhden ilmatilavuuden vaihtumiseen kuluva aika on näin laskettuna 666,7 s.

$$n = \frac{3600 \text{ s}}{666,7 \text{ s}} = 5,4 \text{ (1/h)} \quad (35)$$

Tuuletusraon suhteellinen kosteus ja lämpötila

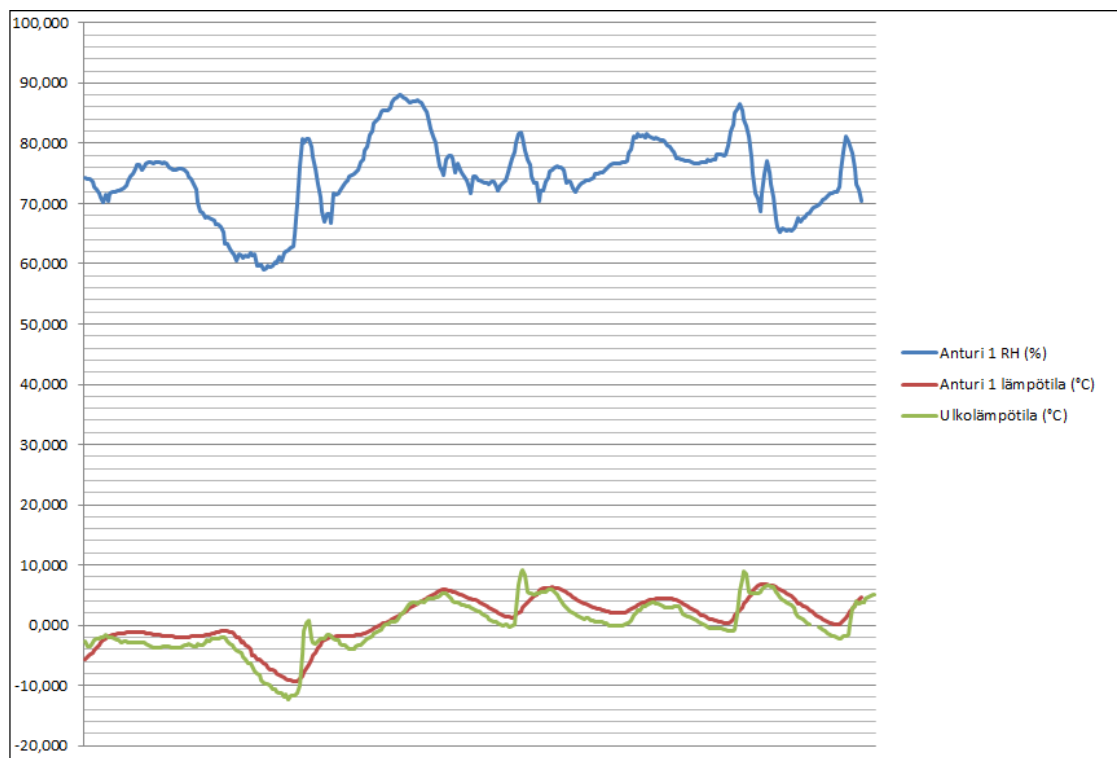
Tuuletusraon suhteellista kosteutta ja lämpötilaa mitattiin kahdella anturilla. Mittaus toteutettiin aikavälillä 18.3.2014–25.3.2014. Molemmat anturit sijaitsivat noin 1,5 m päässä kuorimuurauksen päädyistä ja niiden välinen etäisyys oli noin 2 m. Suhteellista kosteutta ja lämpötilaa mittaavien antureiden asennus eteni seuraavasti:

1. Ensin porattiin 2 reikää parvekkeella olevaan peltiin, jonka takana tuuletusrako sijaitsee. Reikien etäisyys toisistaan oli noin 0,5 m.
2. Seuraavaksi molemmista rei'istä työnnettiin suhteellista kosteutta ja lämpötilaa mittaavat anturit tuuletusrakoon. Anturit asennettiin noin 1,5 m etäisyydelle kuorimuurauksen reunasta. Kuvassa 28 näkyvä alempi anturi 1 työnnettiin poratusta reiästä alaviistoon ja ylempi anturi 2 puolestaan yläviistoon. Antureiden asennuksessa käytettiin apuna jäykkää rautalankaa, jonka avulla anturit saatiin haluttuihin paikkoihin.
3. Lopuksi tiivistettiin antureiden ja peltiin poratun reiän välinen alue tiivistysmassalla.

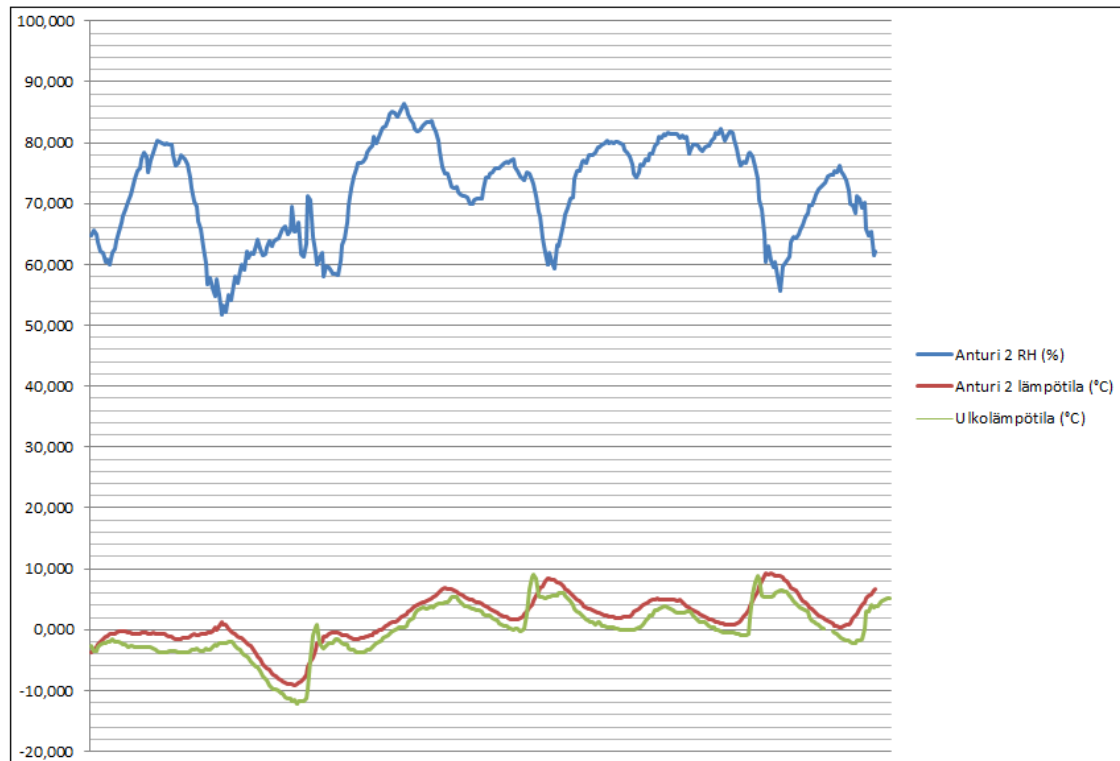


Kuva 28. Suhteellista kosteutta ja lämpötilaa mittaava anturi asennettuna.

Suhteellista kosteutta ja lämpötilaa mittaavien antureiden mittaustuloksista havaittiin, että suhteellinen kosteus vaihtelee anturissa 1 välillä 58–88 % RH. Anturin 2 kohdalla puolestaan suhteellisen kosteuden vaihtelu on 52–88 % RH välillä. Lämpötilan havaitaan olevan tuuletusraossa puolestaan välillä -10...+10 °C. Lisäksi, luvussa 2.4 todettiin tuuletusraon lämpötilan olevan tyypillisesti pohjoisseinillä noin 2 °C ulkoilmaa korkeampi, mikä voidaan havaita myös tässä työssä tehtyjen mittaustuloksien perusteella. Kuvissa 29 ja 30 on esitetty antureiden 1 ja 2 tulokset sekä ulkolämpötilan arvot mitta-
usaikaväliltä.



Kuva 29. Anturin 1 suhteellinen kosteus ja lämpötila.



Kuva 30. Anturin 2 suhteellinen kosteus ja lämpötilä.

6.3 Mittaustulosten tarkastelu

Mittauksista havaitaan, että kuorimuuratun julkisivun tuuletusraon virtausnopeus pohjoisseinällä ei muuttunut lainkaan, vaikka ulkoilman lämpötilan muutos on noin 10 °C. Lisäksi mittauksiin käytetyn Testo 490 -mittalaitteen tarkkuudesta johtuen, ei voida varmaksi sanoa, onko tuuletusraossa virtausta lainkaan. Mikäli virtaus kuitenkin on saatujen tuloksien suuruinen, saadaan ilmavirtojen mukaan lasketuksi ilmanvaihtuvuuden arvoksi 5,4 (1/h). Tämä vastaa suuruusluokaltaan hyvin lähellä kappaleessa 2.4 esitettyjä aikaisempien tutkimusten tuloksia. Kosteusteknisillä laskelmilla saaduissa tuloksissa puolestaan todettiin, että pohjois- ja itäseinillä ilmanvaihtuvuuden arvolla 5 (1/h) saavutetaan jo rakenteiden kosteustekninen toimivuus. Toisin sanoen, mikäli rakennuksen pohjoisseinän tuuletusraon ilmavirtaus pysyy vähintäänkin mitatussa arvossa ympäri vuoden, toimii rakenne kosteusteknisesti oikein.

Mikäli pohjoisseinän tuuletusraon ilmavirtaus on mittauksilla saadun arvon suuruinen, ei tämän tutkimuksen kappaleessa 5.3.2 laskettu vaihtoehdoisen U-arvon laskenta olisi välttämättä sellaisenaan mahdollinen. Toisaalta, ilmavirtaus tuuletusraossa on kuitenkin

kin hyvin pieni ja näin ollen vaadittaisiinkin tarkempaa tutkimusta, mikä sen todellinen vaikutus seinärakenteen U-arvoon on.

Suhteellisen kosteuden ja lämpötilan mittaustuloksista käy ilmi, että homehtumisriskiä ei seinärakenteessa havaita, sillä suhteellinen kosteus pysyttelee suurimman osan mittausajasta alle 80 % RH. Toisaalta mittausaikavälillä tuuletusraon lämpötilat olivat myös niin alhaisia, ettei homehtumista pääse tapahtumaan vaikka suhteellinen kosteus olisikin homehtumisen kannalta suotuisalla tasolla.

Mittauksista käy myös ilmi, että tuuletusraon lämpötila on noin 2 °C lämpimämpi, kuin ulkoilma. Koska kyseessä on matalaenergiakerrostalo, ulkoseinien kautta syntyvät lämpöhäviöt ovat todella pieniä. Tuuletusraon korkeamman lämpötila voidaankin olettaa näin ollen johtuvan pelkästään kuorimuuraukseen varastoituneen lämpöenergian säteilystä tuuletusrakoon sekä tuuletusraossa vallitsevasta, ulkoilmaa pienemmästä, ilman virtausnopeudesta.

Kun ulkoilmaa virtaa tuuletusrakoon, se siis toisin sanoen lämpenee ja ilmaan pystyy sitoutumaan enemmän kosteutta. Verrattaessa ulkoilmaan, tuuletusrakoon virranneen ilman suhteellinen kosteus siis laskee. Kyseinen ilmiö on rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta hyvä asia, sillä näin tuuletusraossa virtaava ilma pystyy kuljettamaan enemmän kosteutta pois seinärakenteista.

7 Yhteenveto

7.1 Johtopäätökset

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia Lahdessa sijaitsevan, Lahden Talot Oy:n omistaman, matalaenergiakerrostalon ulkoseinien lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa. Tutkimuksen tarkastelunäkökulma rajattiin koskemaan rakennuksen kuorimuuratuissa ulkoseinissä olevan tuuletusraon vaikutusta seinien kosteus- ja lämpötekniiseen toimintaan. Tutkimus suoritettiin WUFI Pro 4.2 -simulointiohjelman, käsin laskennan sekä kohteessa paikanpäällä tehtyjen mittausten avulla.

Pääasiallinen tavoite tutkimuksessa oli tarkastella tuuletusraon ilmanvaihtuvuuden ja seinärakenteen kosteusteknisen toiminnan välistä riippuvuutta WUFI-

simulointiohjelmaa hyväksi käyttäen. Lisäksi tavoitteena oli tarkastella U-arvon laskennan soveltamista kuorimuurattujen seinien tapauksessa. U-arvojen laskennassa käytettiin RakMk C4 (2012) mukaisia laskukaavoja.

Tutkimuksessa tarkasteltu seinärakenne oli sisältä ulospäin lueteltuna seuraavanlainen: 150 mm teräsbetonielementti, 150 mm polyuretaanieriste, 30 mm palosuojuvilla, 40 mm tuuletusrako ja 135 mm julkisivutiili. Tarkasteltuja seiniä olivat rakennuksen etelä-, pohjois- ja itäseinät.

Laskennallisesti saaduista tuloksista havaittiin, että kosteustekninen toiminta saavutetaan tutkimuskohteen eteläseinän kohdalla ilmanvaihtuvuudella 25 (1/h) ja pohjois- sekä itäseinän kohdalla ilmanvaihtuvuuden arvolla 5 (1/h). Tarkasteltaessa tuuletusraon ilmanvaihtuvuuden vaikutusta koko seinärakenteen U-arvoon, havaittiin puolestaan, että U-arvon parannus oli noin 4 %, mikäli tuuletusrako huomioidaan laskelmissa tuulettumattomana. Paikanpäällä suoritetuissa mittauksissa pohjoisseinän tuuletusraon ilmavirtaukseksi puolestaan saatiin 0,03 m/s ja tälle ilmavirtauksen arvolle laskettu ilmanvaihtuvuuden arvo on tällöin 5,4 (1/h).

Laskennallisesti saatuja ja mitattuja tuloksia vertaillen, voidaan todeta, että mikäli tuuletusraon ilmavirtaus on pohjoisseinässä mitatulla tasolla, toimii seinä kosteusteknisesti oikein. Tällöin virtausnopeus tuuletusraossa on kuitenkin hyvin pieni ja sen vaikutus U-arvoon on kyseenalainen. Näin ollen, tutkimuksessa päädyttiin siihen tulokseen, että kuorimuurattujen seinien U-arvoja laskettaessa, olisi syytä huomioida tuuletusraon vaikutus koko rakenneosan U-arvoon muidenkin tekijöiden, kuin vain nykymääräysten mukaisten tuuletusraon sisään- ja ulosvirtausaukkojen yhteispinta-alan perusteella.

7.2 Pohdinta ja jatkotutkimusmahdollisuudet

Tämän tutkimuksen tuloksiin jäi tulevaisuutta silmällä pitäen vielä paljon tutkittavaa. Jotta rakenteiden toiminnasta saataisiin täydellinen kuva, tulisi suhteellista kosteutta ja lämpötilaa mitata rakenteista ympäri vuoden. Lisäksi tuuletusraossa vaikuttavaa ilmavirtausta olisi hyvä mitata pidempien aikajaksojen ajan ja eri ilmansuuntiin olevilta seiniltä, jotta saataisiin todellinen kuva tuulettuvuuden tilasta. Erityisesti eteläseinän kohdalla lisämittausten tuoma etu olisi seinärakenteiden toiminnan varmistamiseksi erit-

täin oleellista. Tässä tutkimuksessa käytettyjen resurssien puitteissa, laajempien mittauksien tekeminen ei kuitenkaan ollut mahdollista.

Tässä tutkimuksessa ei otettu kantaa rakennusmateriaalien homeutumisherkkyyteen. On kuitenkin hyvä mainita, että tutkimuskohteen ulkoseinärakenteen materiaaleista johtuen, on kohteen ulkoseinien homeutumisherkkyyks melko pieni. Lisäksi mahdollisen homeen kasvun aiheuttamat vauriot esimerkiksi rakenteiden kantavuuksiin eivät ole niin merkittävässä roolissa, kuin vaikkapa puurunkoisissa ulkoseinissä.

Lähteet

- 1 RYM Oy verkkosivut. 2014. Verkkodokumentti. <<http://rym.fi/fi/etusivu/>> Luettu 8.1.2014
- 2 SHOK Oy verkkosivut. 2014. Verkkodokumentti. <<http://www.shok.fi/>> Luettu 28.1.2014
- 3 Koskimaa, Tuomo. 2013. Matalaenergiarakennuksen ilmanvaihdon ja lämmönjaon toiminnan seuranta. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 4 Huhtala, Paulus. 2013. Matalaenergiarakennuksen lämmöntuotantojärjestelmien toiminnan seuranta. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 5 Motiva Oy verkkosivut. 2014. Verkkodokumentti. <http://www.motiva.fi/rakentaminen/millainen_on_energiatehokas_pientalo/matalaenergiatalon_maaritelmia> Luettu 10.1.2014
- 6 RakMk C3 (2010). 2014. Verkkodokumentti. <http://www.finlex.fi/data/normit/34163-C3-2010_suomi_221208.pdf> Luettu 1.3.2014
- 7 RakMk C4 (Luonnos 2012). 2014. Hakkarainen, Hannu. Luentoaineisto. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 8 Lahden Talot Oy. 2013. Lanssikatu 3-5 rakennekuvat.
- 9 VTT Expert Services Oy verkkosivut. 2013. Verkkodokumentti. <http://www.vttexpertservices.fi/service/buildingsurveys/wufi_software.jsp> Luettu 21.1.2014
- 10 WUFI Pro 4.2 -simulointiohjelma. 2014. Fraunhofer IBP.
- 11 RIL 250-2011. Kosteudenhallinta ja homevaurioiden estäminen. 2011. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- 12 Roikonen, Sami. 2014. Betonirakenteiden pinnoitettavuuskriteerit ja homeriskin laskennallinen tarkastelu. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 13 Mäkitalo, Mikael. 2012. Puurunkoisten ulkoseinien kosteustekninen toimivuus nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto.

- 14 RIL 107–2012. Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet. 2012. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- 15 WUFI Pro 4.2 -simulointiohjelman Help-toiminto. 2014. Fraunhofer IBP.
- 16 SPU verkkosivut. 2014. Verkkodokumentti. <<http://www.spu.fi/tuotteet/>> Luettu 12.3.2014.
- 17 Wienerberger Oy verkkosivut. 2014. Verkkodokumentti. <<http://www.wienerberger.fi/tuohi-karhea-.html>> Luettu 12.3.2014
- 18 Paroc Group verkkosivut. 2014. Verkkodokumentti. <http://www.paroc.com/spps/Finland/BI_attachments/Maaraysten_mukaiset_rakenteet_6_sivuinen_SIVUTTAINEN.pdf> Luettu 1.4.2014
- 19 ERA 17. Energiaviisas rakentamisen aika 2017. 2014. Verkkodokumentti. <http://era17.fi/wp-content/uploads/2010/10/ERA17_loppuraportti.pdf> Luettu 1.4.2014
- 20 Aaltonen, Anu. Vinha, Juha. 2013. Rakennusfysiikka 2013. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto.
- 21 Sisäilmayhdistys verkkosivut. 2014. Verkkodokumentti. <<http://www.sisailmayhdistys.fi/terveelliset-tilat-tietojarjestelma/kosteusvauriot/kosteustekninen-toiminta/kosteuslahteet/>> Luettu 1.4.2014.
- 22 Rotronic Instrument Co verkkosivut. 2014. Verkkodokumentti. <http://www.rotronic-usa.com/prod_log/hylog_nt_main.html> Luettu 2.4.2014
- 23 Testo Oy verkkosivut. 2014. Verkkodokumentti. <http://www.testo.fr/resources/media/global_media/produkte/other_instruments/Instant_Action_Anemometer_IM_0973_1370_1191.pdf> Luettu 2.4.2014
- 24 Björkholz, Dick. 1997. Lämpö ja kosteus rakennusfysiikka. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- 25 Siikanen, Unto. Rakennusfysiikka, perusteet ja sovellukset. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- 26 RT 05-10710. 1999. Kosteus rakennuksissa. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- 27 RIL 249–2009. Matalaenergiarakentaminen, asuinrakennukset. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- 28 Suvanto, Kari. 2014. Oppimateriaali. Metropolia Ammattikorkeakoulu.

WUFI-ohjelman materiaaliarvot

Taulukko 1. WUFI-ohjelmassa käytetyt materiaaliarvot.

Materiaali	Tiheys [kg/m ³]	Huokoisuus [m ³ /m ³]	Ominaislämpökapasiteetti [J/(kg*K)]	Lämmönjohtavuus [W/(mK)]	Vesihöyryn diffuusionvastuskerroin [-]
Betoni C35/45	2220	0,18	850	1,6	248
Alumiinilaminaatti	-	-	-	-	1000000
Polyuretaani	40	0,95	1500	0,023	50
Mineraalivilla	140	0,95	1030	0,037	1,3
Tiilimuuraus *	1900	0,24	850	0,6	10
Ilmakerros (tuuletusrako)	1,3	0,999	1000	0,2	0,5

Lähteet



WUFI Pro 4.2 -ohjelman materiaalitietokanta [10].

Materiaalivalmistajien verkkosivut [16; 17; 18].

Kirjallisuuslähde [14, s. 34].

* sisältää muuraussaumat

Taulukko 2. Betonin tasapainokosteuskäyrä [10].

Betoni C35/45	RH [%]	0	33	43	63	80	83	93	100
	w [kg/m ³]	0	37	38	65	75	76	104	147