

Emilia Kokko

**LAMELLIHIRSITALON SEINÄRAKENTEIDEN LÄMPÖ- JA  
KOSTEUSOLOSUHTEIDEN SIMULOINTI**

# LAMELLIHIRSITALON SEINÄRAKENTEIDEN LÄMPÖ- JA KOSTEUSOLOSUHTEIDEN SIMULOINTI

Emilia Kokko  
Opinnäytetyö  
Syksy 2020  
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma, rakennesuunnittelu

---

Tekijä: Emilia Kokko

Opinnäytetyön nimi: Lamellihirsitalon seinärakenteiden lämpö- ja kosteusolosuhteiden simulointi

Opinnäytetyön englannin kielinen nimi: Physical Function of Lamellar Log Wall

Työn ohjaaja: lehtori Sanna Alitalo

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Syksy 2020

Sivumäärä: 47

---

Rakennusfysikaalinen suunnittelutyö vaatii laskentaohjelmien ja materiaaliominaisuuksien hallintaa. Opinnäytetyön tavoitteena oli perehtyä Oulun Ritaharjussa sijaitsevan, lamellihirsirakenteisen pientalon seinärakenteisiin ja mittaustuloksiin lämmön ja suhteellisen kosteuden osalta. Tarkoituksena oli verrata antureilla mitattuja tuloksia laskennallisiin tuloksiin ja saada tietoa valittujen rakennusteknisten ratkaisujen toimivuudesta. Tavoitteena oli antaa suosituksia rakenteen parantamiseen ja laskentamenettelyihin WUFI 1D -ohjelmalla.

Työssä käsiteltiin seinärakenteista saatua mittaustietoa lämpötilasta sekä suhteellisesta kosteudesta. Ennen WUFI-ohjelman käyttöä perehdyttiin rakenteiden materiaalien ominaisuuksiin ja rakennettiin mittaustietojen avulla ulko- ja sisäilmatiedostot. Tietolähteenä käytettiin alan kirjallisuutta ja internetin kautta löytyvää materiaalia. Vertailulaskelmat ja simulointi suoritettiin WUFI-ohjelmaa käyttäen. Tiedostot ja tulokset käsiteltiin Excel-ohjelmalla.

Työssä saatuja tuloksia voidaan käyttää rakenteiden simuloinnin tarkentamiseen sekä rakenteiden riskitekijöiden arviointiin. Työssä saatiin laadittua kaavioita, joiden avulla pystyttiin vertailemaan laskennallisia tuloksia antureilla mitattuihin tuloksiin. Kaavioiden avulla oli mahdollista arvioida myös rakenteessa olevia riskitekijöitä. Suhteellisen kosteuden simulointi ei onnistunut mutta lämpötilan simuloinnissa onnistuttiin hyvin. Tutkitavien rakenteiden havaittiin toimivan tämän hetkisissä olosuhteissa mutta samalla todettiin, että olosuhteiden heikentyessä riski rakenteen vaurioitumiselle kasvaa. Lopuksi työssä annettiin suosituksia rakenteen parantamiseen ja simulointiin.

---

Asiasanat: hirsitalo, homehtuminen, seinärakenne, suunnittelu, suhteellinen kosteus, kondensoituminen, WUFI.

## ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Degree Programme in Civil Engineering, House Building Engineering

---

Author: Emilia Kokko

Title of thesis: Physical Function of Lamellar Log Wall

Supervisor: lecturer Sanna Alitalo

Term and year when the thesis was submitted: Autumn 2020

Pages: 47

---

Designing building physics requires knowledge both from computational programs, as well as material properties. The aim of this work was to study the temperature and relative humidity measurements data in wall structures of a lamellar log house located in Ritaharju, Oulu. The study aimed to compare the sensor-based measurements with the computationally calculated values, and to analyse the effects of the physical properties of the selected wall structures. The goal of the work was to give recommendations for better wall structure and for the calculation in the WUFI 1D program.

The study was performed using the temperature and relative humidity measurement data obtained from the wall structures. Before using the WUFI program, information was gathered on the properties of the material structures, and outdoor and indoor air values were built, based on measurement data. The data sources in the study were both a literature review in the field, and additional material found via the Internet. WUFI program was used for the comparison calculations and performing simulations. The files and the results were processed using the Microsoft Excel.

As a result of the work, diagrams were prepared to be used for comparing the calculated results with the sensor-based measurements. The diagrams made it possible to assess the risk factors in the structures. Relative humidity simulation did not succeed well but the temperature simulation was pretty accurate. The structures under the study had no risk of molding in these conditions. Recommendations were made to improve the structure and for the simulation.

---

Keywords: condensation, design, log house, molding, relative humidity, wall structure, WUFI.

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS	5
SANASTO	7
1 JOHDANTO	4
2 LÄMMÖN SIIRTYMISMUODOT	5
2.1 Johtuminen	5
2.2 Säteily	5
2.3 Konvektio	6
3 KOSTEUDEN SIIRTYMISMUODOT	8
3.1 Kapillaarinen siirtymä	8
3.2 Painovoimainen siirtymä	10
3.3 Tuulenpaineen aiheuttama siirtymä	10
3.4 Diffuusio	11
3.5 Konvektio	11
4 SUHTEELLINEN KOSTEUS	13
4.1 Sisäilman ja ulkoilman kosteus	13
4.2 Kriittiset kosteudet	14
5 SUOMALAINEN HOMEMALLI	15
6 RAKENNUSFYSIKAALINEN SUUNNITTELU	18
7 TUTKITTAVAT ULKOSEINÄRAKENTEET	20
7.1 Lamellihirsi	21
7.2 Kevytsoraharkko	22
8 MITTAUSPISTEET	23
8.1 Mittauspiste 1 (anturit 1-3 ja 17)	23
8.2 Mittauspiste 2 (anturit 4-7 ja 15)	24
9 SIMULOINTI	25
9.1 Lähtötietojen käsittely	25
9.2 Rakennemallin luonti (mittauspiste 1)	27
9.3 Alku- ja ympäristöolosuhteet	28
9.4 Pinnansiirtokertoimet	29

9.5 Laskennan ajanjakso ja laskenta	29
9.6 Rakennemallin luonti (mittauspiste 2)	30
10 SIMULOINNIN JA ANTUREIDEN TULOKSET	33
10.1 Tulokset (mittauspiste 1)	33
10.2 Tulokset (mittauspiste 2)	36
11 JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET	41
11.1 Tutkitun rakenteen toiminta	42
11.2 Suosituksia rakenteen parantamiseen	42
12 POHDINTA	44
LÄHTEET	46

## SANASTO

Diffuusio	Kaasun atomien / molekyylien liikettä suuremmasta osapaineesta pienempään osapaineeseen
Kokonaispaine	Osapaineiden summa
RH	Suhteellinen kosteus (relative humidity)
Simulointi	Todellisen rakenteen jäljittelyä laskemisen avulla
TE	Lämpötila (temperature)

# 1 JOHDANTO

Rakennusten kasvavat energiatehokkuusvaatimukset, ilmastonmuutos ja rakenteiden ongelmat, kuten kosteusvauriot ja homeongelmat, ovat nostaneet rakennusfysiikan osaamisen olennaiseksi osaksi rakentamista. Laskentaohjelmien avulla on mahdollista analysoida rakenteissa tapahtuvia fysikaalisia ilmiöitä ja niiden aiheuttamia riskejä rakenteelle ja rakenteiden pitkäaikaiskestävyydelle. Vertaamalla laskentaohjelmien tuloksia mitattuihin arvoihin voidaan varmistua laskennan oikeellisuudesta tai laskennan pohjaksi valituista alkuarvoista. Toisaalta laskennan tuloksen poiketessa huomattavasti mitatuista tuloksista ei välttämättä ole kyse laskennan virheestä. Mitatut tulokset saattavat poiketa laskennallisista arvoista esimerkiksi jonkin rakentamisen käytön aikana tapahtuneen rakenteellisen vaurion seurauksena.

Työn tavoitteena on vertailla laskennallisia ja mitattuja tuloksia tutkittavien seinärakenteiden rakennusfysikaaliseen toimintaan liittyen sekä saada lisää tietoa tutkittavana olevien rakenneratkaisujen pitkäaikaiskestävyydestä. Tavoitteena on antaa suosituksia laskentamenettelyihin WUFI Pro 5.3 1 D -ohjelmalla.

Työssä perehdytään tarkasteltaviin seinärakenteisiin ja saatavilla olevaan kohteen suunnitteluaineistoon. Lähtötietojen avulla rakennetta simuloidaan WUFI-ohjelmalla. Simuloinnilla saatuja tuloksia verrataan rakenteen sisällä olevien antureiden tuloksiin sekä annetaan mahdollisia suosituksia laskentamenettelyihin. Työssä tarkastellaan rakenteen lämmön ja kosteuden siirtymiä ja analysoidaan mahdollisia rakenteen riskitekijöitä simulointi-ohjelmaa hyödyntäen.

Opinnäytetyössä tarkastelun kohteena on Oulun Ritaharjuun rakennettu lamellihirsinen talo, josta haluttiin saada vertailutietoja valittujen rakennusteknisten ratkaisujen vaikutuksista rakenteen rakennusfysikaaliseen toimintaan. Kohteen rakenteisiin sijoitettiin mittantureita, joilla mitattiin suhteellista kosteutta ja lämpöä. Projekti aloitettiin 2012 ja kohteesta saatiin mitattua dataa vuoden 2013 helmikuusta vuoden 2018 toukokuuhun. Työssä tutkitaan kohteen kahta erilaista hirsiseinäseinärakennetta, joista toinen sijaitsee märkätilassa.



## 2 LÄMMÖN SIIRTYMISMUODOT

Lämpö on energiaa, joka ilmenee atomien ja molekyylien värähtelyliikkeenä. Lämmön siirtyminen tapahtuu rakenteessa tai tilassa kolmella eri tavalla: johtumalla, säteilemällä ja konvektion eli ilmavirtauksen avulla. (1, s. 40.)

### 2.1 Johtuminen

Johtumisessa (konduktio) molekyylien liike-energia siirtyy molekyylisestä toiseen, jolloin tapahtuu lämmön virtaamista. Lämmönjohtumista esiintyy kiinteissä aineissa ja nesteissä. Lämpö pyrkii tasoittumaan ja virtaamaan lämpimämmästä kylmempään aineeseen. (1, s. 40.) Tasoittumisnopeus eli lämpövirta voidaan laskea kaavoista 1 ja 2 (2, s. 12).

Lämpövirran tiheys yksikerrosrakenteessa lasketaan kaavalla 1.

$$q = \lambda \cdot T_1 - T_2 / d \quad \text{KAAVA 1}$$

$\lambda$  = lämmönjohtavuus [W/m · °C]

$d$  = ainepaksuus [m]

$T_1 - T_2$  = kappaleen / seinämän yli vallitseva lämpötilaero [°C].

Lämmönvastus  $m$  on ainepaksuuden  $d$  suhde lämmönjohtavuuteen  $\lambda$

$$m = d / \lambda \text{ [m}^2 \cdot \text{°C/W]}$$

Lämpövirran tiheys monikerrosrakenteessa lasketaan kaavalla 2.

$$q = T_1 - T_2 / \Sigma m \quad \text{KAAVA 2}$$

### 2.2 Säteily

Säteilyssä (emissio) energia siirtyy valon nopeudella sähkömagneettisen aaltoliikkeen välityksellä. Säteilystä lähettäviä eli emittoivia ovat kaikki kappaleet, joiden lämpötila on absoluuttisen nolapisteen yläpuolella. Rakennustekniikassa säteilylämpöä esiintyy lyhyt- ja pitkäaaltoisena. Lasin lämmönläpäisykykyä mitattaessa säteilyn aallonpituudella on

merkitystä. Auringon säteily on lyhytaaltoista säteilyä, jota ikkunat läpäisevät hyvin. Siis säältä ulos pyrkivää kappaleiden lähettämää pitkäaalloista lämpösäteilyä ikkunalasi läpäisee huonosti. Säteilyn osuessa johonkin pintaan se heijastuu tai absorboituu. (1, s. 40.) Emissiviteetti ( $\varepsilon$ ) on pinnan säteilytehon  $Q_s$  (kaava 4) suhde mustan pinnan säteilytehoon  $Q_m$  (kaava 3) eli  $\varepsilon = Q_s / Q_m$ . Säteilytehon yksikkö on  $W / m^2$ . (2, s. 12.)

Mustan kappaleen kokonaissäteily lasketaan kaavalla 3 (2, s. 12).

$$Q_m = \sigma \cdot T^4$$

KAAVA 3

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} [W/m^2 \cdot K^4] \quad \text{Stefan Boltzmannin säteilyvakio}$$

$$T = \text{kappaleen lämpötila [K tai } ^\circ\text{C]}$$

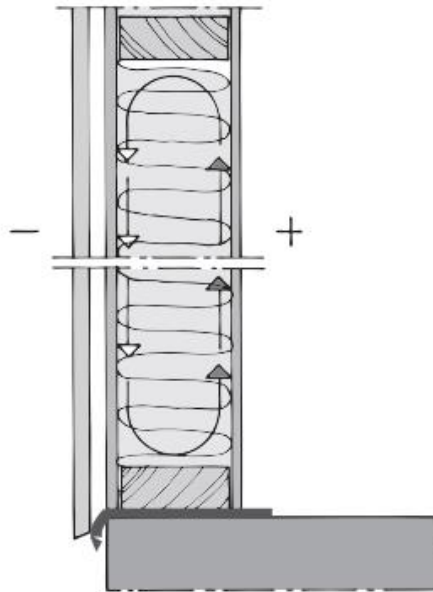
Todellisten pintojen säteilyteho  $Q_s$  on pienempi kuin mustan pinnan säteilyteho. Tämä lasketaan kaavasta 4. Rakennusmateriaalien emissiviteetti  $\varepsilon$  on noin 0,8 – 0,95. (2, s. 12 – 13.)

$$Q_s = \varepsilon \cdot Q_m = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

KAAVA 4

### 2.3 Konvektio

Konvektiossa (virtaus) lämmön siirtyminen tapahtuu kaasun tai nesteen virtauksen mukana. Konvektio voi olla pakotettua tai luonnollista. Pakotetussa konvektiossa lämmön liike johtuu jonkun ulkopuolisen voiman vaikutuksesta. Ulkopuolisena vaikutteena voivat olla esimerkiksi tuuli, koneellinen ilmanvaihto ja ihmisten liikkuminen. Lämpötilaerojen aiheuttama tiheysero johtaa lämmön liikkeeseen. Tätä liikettä kutsutaan luonnolliseksi konvektioksi. (Kuva 1.) (1, s. 41.)



*KUVA 1. Luonnollinen konvektio seinärakenteessa (3, s. 73)*

Aineen olomuodon muutoksessa lämmön siirtymää kutsutaan latentiksi eli piileväksi. Latenttia muotoa esiintyy sulamis- ja höyrystymislämpönä. Tässä muodossa muutos tapahtuu lämpötilan muuttumatta. (1, s. 41.)

### 3 KOSTEUDEN SIIRTYMISMUODOT

Veden olomuotoina tunnetaan kiinteä jää tai lumi, nestemäinen vesi ja kaasumainen vesihöyry. Rakennuksien ja rakenteiden kosteuslähteenä ovat ulkoilman vesihöyry, sisäpuoliset kosteuslähteet, kuten käyttövesi ja ihmiset, sekä sade, rakennekosteus, maaperän kosteus ja vesivuodot putkista ja laitteista. Rakennuksien ja rakenteiden kosteus ilmenee näkyvänä vetenä, näkymättömänä vesihöyrynä tai rakenteisiin sitoutuneena rakennekosteutena. Rakenteisiin kosteus voi siirtyä joko kapillaarisesti, diffuusiolla tai konvektiolla. Kosteus voi siirtyä myös nesteinä eli vetenä painovoimaisesti alaspäin ja tuulenpaineen vaikutuksesta eri suunnissa. (4, s. 12–17; 1, s. 66.)

#### 3.1 Kapillaarinen siirtymä

Kapillaarista veden siirtymää tapahtuu vapaan veden ollessa kosketuksissa huokoiseen materiaaliin. Kapillaarista siirtymää tapahtuu myös, jos materiaali on kosketuksissa materiaaliin, jonka huokosissa on vettä. Kapillaaristen voimien aiheuttama huokosalipaine siirtää kosteutta materiaalissa. Huokosalipaineen suuruus riippuu materiaalissa olevien huokosten koosta: mitä pienempi huokosten koko sen suurempi huokosalipaine. (4, s. 22.)

Vedentunkeutumissyvyys  $X$  on tieto, kuinka syvälle kosteus on siirtynyt veden kanssa tekemisissä olevasta materiaalin pinnasta eli mihin asti materiaalin huokokset ovat täyttyneet ajassa  $t$ . Tunkeutumissyvyys lasketaan kaavasta 5. (4, s. 25.)

$$X = B \sqrt{t} \text{ [m]} \quad \text{KAAVA 5}$$

$$B = \text{veden tunkeutumiskerroin [m/s}^{0.5}\text{]}$$

Vesi imeytyy materiaaliin kapillaarisesti veden kanssa kosketuksissa olevasta pinnasta nopeudella  $g$  kaavan 6 mukaisesti (4, s. 25).

$$g = A/(2 \cdot \sqrt{t}) \text{ [kg/m}^2\text{s]} \quad \text{KAAVA 6}$$

$$A = \text{kapillariteettikerroin eli veden imeytymiskerroin [kg /m}^2\text{s}^{0.5}\text{]}$$

Imeytyneen veden määrä  $G$  lasketaan kaavalla 7 (4, s. 25).

$$G = A \cdot \sqrt{t} \text{ [kg/m}^2\text{]}$$

KAAVA 7

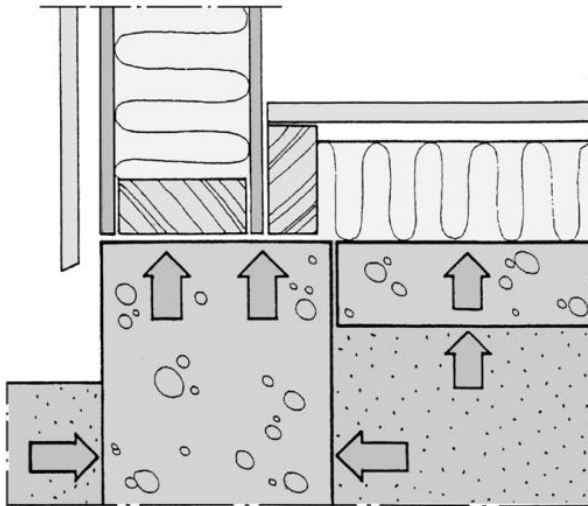
Veden kapillaarinen siirtymisnopeus on riippuvainen huokosalipaineen ja veden virtausta vastustavan kitkavoiman suuruudesta. Kitkavoimat kasvavat huokoskoon pienentyessä ja virtausmatkan kasvaessa. Taulukossa 1 on eri materiaalien kapillaarisuusominaisuuksia. (4, s. 25.)

TAULUKKO 1. Materiaalien kapillaarisuusominaisuuksia (4, s. 25)

Materiaali	Kapillariteettikerroin A (kg/m <sup>2</sup> s <sup>0,5</sup> )	Veden tunkeutumiskerroin B (m/s <sup>0,5</sup> )
Tiili (tiheys 1700 kg/m <sup>3</sup> )	0.4	1.4* 10 <sup>-3</sup>
Tiili (tiheys 1900 kg/m <sup>3</sup> )	0.1	0.7* 10 <sup>-3</sup>
Kevytbetoni	0.1	0.4* 10 <sup>-3</sup>
Betoni (vesisementtisuhde =0.3)	0.01	0.1* 10 <sup>-3</sup>
Betoni (vesisementtisuhde =0.5)	0.02	0.2* 10 <sup>-3</sup>
Betoni (vesisementtisuhde =0.7)	0.03	0.3* 10 <sup>-3</sup>
Sementtilaasti	0.03	0.5* 10 <sup>-3</sup>
Kalkkilaasti	0.3	1.0* 10 <sup>-3</sup>
Puu (syiden suunnassa)	0.02	-
Puu (syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa)	0.004	-

Tuulenpaineen ja painovoiman vaikutuksesta kapillaarista siirtymistä voi tapahtua myös vaakasuunnassa ja tai alaspäin (kuva 2). Sadeveden vaikutuksesta vesi voi imeytyä julkisivuun kapillaarivoimien vaikutuksesta mutta myös yhtä aikaa painovoiman ja tuulenpaineen vaikutuksesta. Tiivistynyt kosteus voi myös siirtyä kapillaarisesti materiaalien huokosiin. (1, s. 68.)

Kosteuden kapillaarista siirtymistä yleensä estetään rakenteellisessa suunnittelussa erilaisilla kapillaarikatkoilla. Kapillaarisuutta voidaan estää katkaisevalla kermillä, muovilla, bitumisivelyllä, riittävän tiiviillä pintakerroksella, puun päätysulkemisella tai muulla sellaisella. Puurakentamisessa kapillaarisesta vedenliikkeestä saattaa olla hyötyä joissain tilanteissa rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta, koska puu pystyy tasaamaan kosteutta laajemmalle alueelle. (1, s. 68.)



KUVA 2. Kapillaarinen veden liike perustuksissa (3, s. 81)

### 3.2 Painovoimainen siirtymä

Painovoiman vaikutuksesta vesi valuu alaspäin rakennuksen ja rakenteiden pystysuorilta ja kaltevilta pinnoilta sekä rakennuksen ympäriltä maan alle. Valuvan veden huomioiminen rakennesuunnittelussa on tärkeää, jotta vesi ei pääse tunkeutumaan haitallisesti rakenteisiin. Painovoimaisen veden siirtymisessä on kyseessä yleensä niin suuria määriä, että niiden aiheuttamat kosteusvauriot rakenteisiin syntyvät nopeasti. (4, s. 26.)

Painovoimaisen veden siirtyminen on hallitseva siirtymismuoto kapillaarisesti heikosti vettä imevissä materiaaleissa, kuten karkeassa sorassa. Painovoimaista veden siirtymismuotoa hyödynnetään hallitussa veden poisjohtamisessa rakenteiden ulko- ja sisäpinnoilta sekä rakennuksen viereltä. Tästä hyvänä esimerkkinä on salaojitus rakennuspohjan kuivatuksessa. (4, s. 26.)

### 3.3 Tuulenpaineen aiheuttama siirtymä

Vesi voi siirtyä tuulenpaineen ja viistosateen yhteisvaikutuksesta vaipan pinnoilta rakojen kautta sisälle seinärakenteisiin vaakasuunnassa ja joskus jopa ylöspäin. Tätä haitallista veden siirtymismuotoa voidaan estää rakenteilla, joista vesi voidaan johtaa poissa. (1, s. 67.)

Tuulenpaineen vaikutuksesta siirtyvää kosteutta estetään rakenteilla, kuten suojapellitykset, räystäsrakenteet, sopivat verhousrakenteet sekä tuuletusvälit. Lisäksi saumoissa voidaan käyttää tiivistysmassaa. (1, s. 67.)

### **3.4 Diffuusio**

Diffuusiossa epämääräisesti jakautuneessa kaasuseoksessa olevat kaasumolekyylit pyrkivät liikkumaan siten, että syntyy tasaisesti jakautunut kaasuseos. Vesihöyryn diffuusiossa vesimolekyylit liikkuvat suuremmasta pitoisuudesta pienempään osapaine-eron aiheuttamana. Rakennustekniikassa tällä tarkoitetaan yleensä kosteuden liikkumista vesihöyrynä rakenteen läpi. (1, s. 70-71.)

Lähes kaikilla materiaaleilla on tietty vesihöyrynläpäisevyys. Vesihöyryn liiallista tunkeutumista seinärakenteisiin voidaan estää suunnittelemalla rakenne niin, että lämmöneristeen ja lämpimän sisätilan väliin tulee riittävän vesihöyrytiiviskerros ja seinärakenteen vesihöyrynvastus pienenee kylmään tilaan päin mentäessä. (1, s. 71.)

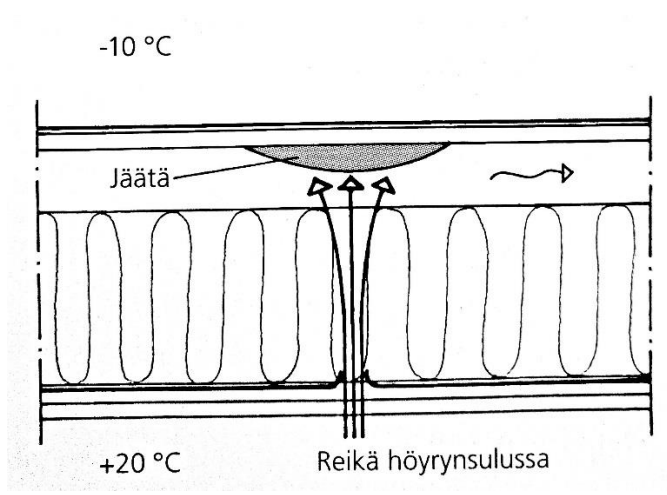
### **3.5 Konvektio**

Vesihöyryn siirtymistä ilmavirtauksen tai jonkun muun kaasuvirtauksen mukana nimitetään konvektioksi. Vesihöyry liikkuu kokonaispaine-eron vaikutuksesta rakennuksessa huokoisten ja hyvin ilmaa läpäisevien aineiden sekä rakennusosissa olevien epäjatkuvuuskohtien läpi. Vesihöyryn konvektiota arvioitaessa tärkeimpänä tekijöinä ovat ilmavirtauksen määrä ja siihen vaikuttavat tekijät. Puhuttaessa kosteuskonvektiosta tarkoitetaan vesihöyryn konvektiovirtausta. Kosteuskonvektio aiheuttaa riskejä virtausreitteinä toimivien, rakenteiden epäjatkuvuuskohtien rakennusosissa. (1, s. 71; 4, s. 31.)

Rakenteen epäjatkuvuuskohtia ovat saumat, raot, reiät ja läpiviennit. Suurimman riskin aiheuttaa sisätilan ylipaineisuus ulkoilmaan tai yläpohjaan ja ryömintätilaan nähden. Tämä korostuu kylmänä vuodenaikana, jolloin ilmavirtaukset sisältä ulospäin ovat voimakkaimmillaan ja rakenteisiin voi kulkeutua moninkertaisia kosteusmääriä verrattuna diffuusioon. (1, s. 72; 4, s. 34.)

Rakenteen riittävä ilmantiiveys varmistetaan erillisillä ilmansuluilla. Yläpohja saadaan harvoin niin tiiviiksi, että kosteuskonvektiota sisätilasta ei syntyisi ollenkaan. Tästä syystä siihen varaudutaan riittävän tehokkaalla yläpohjan tuuletuksella. Tutkimuksien mukaan

noin puolet "tasakattovuodoista" ovat tosiasiassa sisätiloista ilmavirtauksen mukana rakenteisiin kulkeutunutta ja siellä tiivistynyttä kosteutta. (Kuva 3.) Tuulettuvien alapohjien kosteustekninen toiminta perustuu ryömintätilan riittävään tuuletukseen. Tuuletuksen vaikutus on tehotonta sellaisina vuodenaikoina, jolloin ulkoilman vesihöyryn pitoisuus on korkea ja tuuletettavan rakenteen lämpötila on alhaisempi kuin ulkoilman. (1, s. 72; 4, s. 34.)



*KUVA 3. Konvektiovirtaus ja kosteuden kertymä tasakattorakenteessa (1, s. 71)*



## 4 SUHTEELLINEN KOSTEUS

Hygroσκοoppinen materiaali pyrkii tasapainokosteuteen ympäröivän ympäristönsä kanssa, jolloin niiden välille asettuu niin sanottu hygroσκοoppinen tasapainokosteus. Hygroσκοoppinen materiaali pystyy luovuttamaan kosteutta ilmaan ja sitomaan kosteutta itseensä ympäröivästä ilmasta. Hygroσκοoppisuutta ilmenee huokoisilla aineilla ja sen voimakkuus vaihtelee paljon eri materiaalien kesken. Mineraalivilloilla hygroσκοoppisuus on lähes olematon, kun taas puupohjaisilla materiaaleilla se on suurin. (1, s. 77.)

Tasapainokosteuden määrä on lisäksi riippuvainen lämpötilasta ja siitä, onko kyseessä kostuminen (absorptio) vai kuivuminen (desorptio). Materiaaleilla on myös oma absorptio- ja desorptionopeutensa eli tieto millä nopeudella materiaali joko luovuttaa tai vastaanottaa kosteutta ympäröivästä ilmasta. Sorptionopeuteen vaikuttavat lisäksi ympäristön ja materiaalin välisten vesihöyryn osapaineiden erotus, lämpötila, materiaalin pinta-ala ja kostean ilman liike. Materiaalin hygroσκοoppisuus kuvaa sekä hygroσκοoppista tasapainokosteutta että kosteuden imeytymisen ja luovuttamisen nopeutta. (1, s. 77.)

Suhteellinen kosteus (RH) on rakennustekniikassa yleisimmin käytetty suure ilman kosteudesta. Se ilmoittaa, minkä verran tietynlämpöinen ilma voi sisältää vesihöyryä prosentteina enimmäisvesihöyrymäärästä ( $\text{g}/\text{m}^3$ ). Suurimman mahdollisen ilman sisältämän vesihöyrymäärän ylittyessä vesihöyry tiivistyy vedeksi. Suurin mahdollinen suhteellinen kosteusprosentti on 100 %. (1, s. 69-70.)

### 4.1 Sisäilman ja ulkoilman kosteus

Suhteellinen kosteus lämmityskaudella kuivassa ja lämpimässä huoneilmassa on tavallisesti 20-40 %. Sisäilman  $+20\text{ °C}$ :n lämpötilassa ja suhteellisen kosteuden ollessa 40 % kosteuspitoisuus on  $6,9\text{ g}/\text{m}^3$ . Sisäilman kosteuteen vaikuttavia tekijöitä ovat ilmanvaihdon teho, huonelämpötila, sisätiloissa eri lähteistä haihtuva kosteus sekä ulkoilman absoluuttinen kosteus. (1, s. 69-70.)

Suhteellinen kosteus ulkona on kesällä yleensä 50-60 % ja talvella se on keskimäärin 85 %. Vaikka ulkoilman suhteellinen kosteus on talvella korkea, ilman kosteuspitoisuus on hyvin alhainen. Esimerkiksi  $-20\text{ °C}$ :n lämpötilassa kosteuspitoisuus on vain  $0,8\text{ g}/\text{m}^3$  suhteellisen kosteuden ollessa 90 %. (1, s. 69-70.)

## 4.2 Kriittiset kosteudet

Tietyille materiaaleille on määritelty niin sanottuja kriittisen kosteuspitoisuuden ( $RH_{kr}$ ) ylärajoja, joiden alapuolella materiaali toimii tyydyttävästi pidempiäkin aikoja vaurioitumatta. Jos materiaalin suhteellinen kosteus (RH) nousee yli kriittisen arvon ( $RH_{kr}$ ), materiaaliin alkaa muodostumaan vaurioita ja materiaalin tavoiteltu toiminta heikkenee. (2, s. 60.)

Teräksellä kriittinen kosteus on 60 %. Tämän ylittyessä voi alkaa muodostumaan ruostetta. Puun lahovaurion syntyyn tarvittava lämpötila on noin +3-45 °C ja RH:n on oltava suurempi kuin 80 %. Homeen muodostuminen vaatii lämpötilakseen saman kuin lahovaurio mutta kosteuden ei tarvitse olla yhtä korkea. Homeenmuodostumiselle kriittinen kosteus on 75 %. Muovimattojen kriittisenä kosteutena pidetään kosteutta, jossa mattoon ei aiheudu merkittäviä kupruiluja. Muovimattojen kriittisenä kosteutena pidetään 95:tä %. Lattialiimoille annettu kriittinen kosteus tartuntalujuuden suhteen on 90 %. (2, s. 60.)

Muovimattojen ja liimojen tiedetään aiheuttaneen ongelmia varsinkin maanvaraisissa lattioissa viime aikoina ja syynä niihin on arvioitu olevan liian korkea kosteus maton alla olevassa betonissa. Haitta-aineiden (VOC-yhdisteet) muodostuminen alkaa jo matalammissa kosteuksissa. Turvallisena kriittisenä rajana betonin päällystämiseksi tavanomaisilla mattopäällysteillä pidetään yleisesti 85 % suhteellista kosteutta. (5, s. 24-25.)

## 5 SUOMALAINEN HOMEMALLI

VTT:n ja TTY:n yhdessä kehittämä Suomalainen homemalli on maailman pisimmälle kehitetty homehtumisriskin arvioimistyökalu. Sen avulla voidaan tarkastella homeenkasvua laskennallisesti kaikille materiaaleille ja materiaaleja sisältäville rakenteille, joiden homehtumisherkkyyssuokat tunnetaan. Uusi kehittyneempi homemalli perustuu VTT:n aiemmin kehittämään puumateriaalien homemalliin. Malli antaa mahdollisuuden tarkastella ja arvioida homeen kasvua laskennallisesti erilaisien materiaalien pinnoilla muuttuvissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa ajan funktiona. (6.)

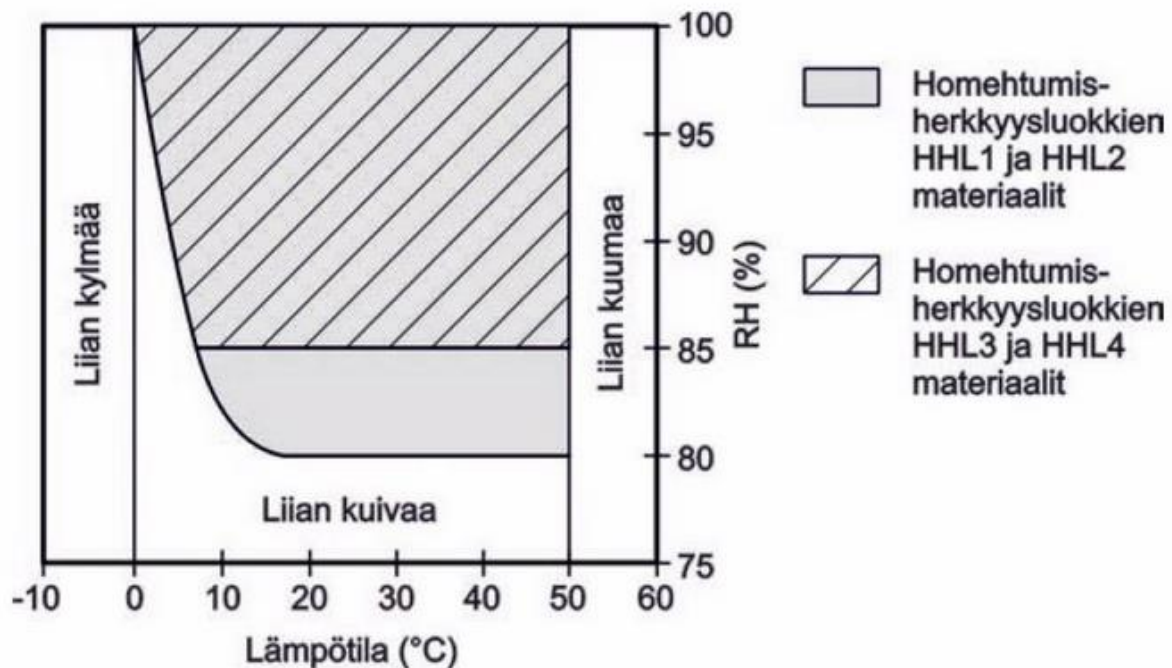
Suomalaisen homemallin laskenta tapahtuu Excel-pohjaisella laskentatiedostolla, joka on saatavilla kaikkien käyttöön osoitteessa <https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/suomalainen-homemalli/>. Laskentaan tarvitaan lämmön ja suhteellisen kosteuden tiedot mitattuna tai laskettuna tunnin välein vähintään vuoden ajalta. (6.)

Materiaalin homehtumista kuvaava homeindeksi M on vertailusuure, joka vaihtelee välillä 0-6 (taulukko 2). Indeksillä kuvaa homeen määrän lisääntymistä materiaalin pinnalla mutta se ei ota kantaa eri homelajien esiintymiseen tai siihen kuinka terveydelle vaarallisia homeita materiaalissa kasvaa. Homeindeksin kasvunopeuteen ja maksimiarvoon vaikuttavat suhteellinen kosteus sekä lämpötila. (6.)

TAULUKKO 2. Homeindeksi M (6)

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

Suomalaisessa homemallissa materiaalien homeutumisherkkyydet otetaan huomioon ja-  
kamalla materiaalit neljään eri homeutumisherkkyydsluokkaan (HHL) ja homeentaantu-  
misluokkaan (HTL). Homeutumisherkkyydsluokilla ovat omat suotuisat kosteus- ja lämpö-  
olosuhteensa homeen muodostumiselle (kuva 4). (6.)



KUVA 4. Homeen kasvulle suotuisat kosteus- ja lämpötilaolosuhteet homeutumisher-  
kkyydsluokissa (6)

Homeutumisherkkyyds- ja taantumaluokkaan vaikuttavat materiaalin työstö, pinnoitteet ja  
eri materiaalien välinen yhteys toiseen materiaaliin (taulukko 3). Mallin soveltuvuutta on  
todennettu laajoilla laboratorionkokeilla eri materiaaleille, rakenteille, materiaalienrajapin-  
noille sekä laajasti epäsuotuisien olosuhteiden, kuten kylmien ja kuivien olosuhteiden va-  
ralta. (6.)

TAULUKKO 3. Homehtumisherkkyyssluokat rakennusmateriaaleille (6)

Homehtumisherkkyyssluokka		Rakennusmateriaalit
HHL1	Hyvin herkkä	Karkeasahattu ja mitalistettu puutavara (mänty ja kuusi), höylätty mänty, käsittelemätön huokoinen puukuitulevy
HHL2	Herkkä	Höylätty kuusi, paperipohjaiset tuotteet ja kalvot, kipsilevy, vaneri, lastulevy, bitumoidut/käsitellyt huokoiset kuitulevyt
HHL3	Kohtalaisen herkkä	Mineraalivillat, muovipohjaiset materiaalit, kevytbetoni*, kevytsorabetoni, karbonatisoitunut vanha betoni, sementtipohjaiset tuotteet, tiili
HHL4	Kestävä	Alkalinen uusi betoni, lasi ja metallit, tehokkaita homesuoja-aineita sisältävät materiaalit

\* Kevytbetoni kuuluu homehtumisominaisuuksiltaan kahteen eri homehtumisherkkyyssluokkaan. Homeen kasvunopeus vastaa homehtumisherkkyyssluokkaa HHL2, mutta homeindeksin maksimiarvo jää homehtumisherkkyyssluokan HHL3 tasolle.

Homeen kasvun pysähtymiseen ja taantumaaan vaikuttaa materiaalin homehtumisherkkyyssluokka (taulukko 4). Lämpötilan laskiessa alle 0 °C:n ja suhteellisen kosteuden pudotessa 80/85 % RH:n alapuolelle homeenkasvu pysähtyy ja taantuminen voi alkaa. Yleistään voidaan sanoa, että mitä nopeammin homeen kasvu etenee materiaalin pinnalla, sen nopeammin homeindeksi nousee sekä myös sitä nopeammin kasvu taantuu, kun olosuhteet muuttuvat homeen kasvulle epäsuotuisiksi. (6.)

TAULUKKO 4. Homehtumisherkkyyssluokkien taantumaluokat (6)

Homehtumisherkkyyssluokka	Homeen taantumaluokka
HHL1	HTL2 Merkittävä taantuma
HHL2	HTL3 Kohtalainen taantuma
HHL3	HTL4 Vähäinen taantuma
HHL4	HTL4 Vähäinen taantuma

## 6 RAKENNUSFYSIKAALINEN SUUNNITTELU

Rakennusfysikaalisessa (hygrotermisessä) suunnittelussa on tarkoituksena tarkastella rakenteiden ja yksittäisten rakennusosien toimintaa ja sitä, miten vallitsevat kosteus- ja lämpöolosuhteet vaikuttavat rakennuksen pitkäaikaiskestävyyteen ja sisäilmaolosuhteisiin. Pitkään jatkuvat korkeat kosteuspitoisuudet voivat johtaa rakenteen vaurioitumiseen ja homeen kasvuun kosteudelle alttiina olevan rakenteen pinnoille. Rakenteen vaurioituminen voi aiheuttaa merkittäviä terveydelle haitallisia vaikutuksia ja heikentää rakenteen kestävyyttä. (7.)

On havaittu, että kosteus- ja lämpöolosuhteet ja näiden siirtyminen rakenteessa ovat yhteydessä toisiinsa. Tästä syystä näiden tarkastelu samanaikaisesti johtaa realistisempiin tuloksiin. Tutkimuksien mukaan on hyvin selvää, että korkeat kosteuspitoisuudet johtavat suurempiin lämpöhäviöihin ja yksittäisten rakenneosien lämpötilat vaikuttavat kosteuden siirtymiseen. (7.)

### WUFI

Rakennusfysiikan tutkimuslaitos Fraunhofer IBP on kehittänyt WUFI-laskentaohjelmistoperheen hygrotermisten analyysien helpottamiseksi. WUFI-lyhenne tulee saksankielisestä lauseesta Wärme Und Feuchte Instationär, joka tarkoittaa lämmön ja kosteuden siirtymistä. WUFI-ohjelmistolla voidaan simuloida lämmön ja kosteuden liikettä realistisesti eri rakennusmateriaaleissa, ja sitä miten niiden yhteisvaikutukset näkyvät rakenteissa ja rakenteiden pitkäaikaiskestävyydessä. (7.)

Ohjelmistolla päästään tarkastelemaan kosteuden kertymistä rakenteisiin ja kuivumisajankoja ajasta riippuvassa tilassa. WUFI-ohjelmisto käyttää hyödykseen todellisia ilmastotietoja paikalliselta alueelta sekä hyödyntää viimeisinpää tietoa eri materiaalien vesihöyryn diffuusiosta ja kapillaarisuudesta. WUFILLA pystytään simuloimaan monikerroksisia rakenteita, kuten seiniä. (7.)

Suunnittelussa ohjelmistoa voidaan hyödyntää simuloimalla rakenne ennakkoon ja näin havaitsemalla mahdolliset puutteet ja riskit rakenteessa ajoissa. Ohjelmisto ottaa huomioon rakenteen altistumisen luonnollisille olosuhteille kuten sateelle ja auringolle. Kosteuden siirtymismuodoista huomioon otettavia ovat vesihöyryn diffuusio, liuksen diffuusio,

pintadiffuusio sekä veden kapillaarinen siirtyminen. Lämmönsiirtomuodoista ohjelmisto huomioi lyhtyaaltoisen auringon säteilyn, lämmön johtumisen sekä veden faasimuutoksista johtuvan lämmönsiirtymisen. Ohjelmisto ei ota huomioon laskennassa painovoimaista ja osmoottista kosteudensiirtymistä eikä vesihöyryn konvektiota. (7.)

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan valittujen seinärakenteiden kosteus- ja lämpöteknistä toimivuutta WUFI pro 5.3 -ohjelman avulla. Valittu ohjelma on yksiulotteinen, eli 1D. Ohjelma on riittävä tarkasteltaessa pelkän seinärakenteen toimivuutta ilman liittymien tarkasteluja. Simuloinnin tuloksena ohjelmasta saadaan kuvaajia suhteellisen kosteuden ja lämpötilojen muutoksista tunneittain muuttuvien ulko- ja sisäolosuhteiden mukaan.

## 7 TUTKITTAVAT ULKOSEINÄRAKENTEET

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin talon kahta erilaista ulkoseinärakennetta. Tutkittavan kohteen kantavana rakenteena oli lamellihirsi kooltaan 275 mm x 275 mm. Ensimmäisenä tarkasteltavana ollut seinärakenne oli molemmilta puolilta pinnoittamaton lamellihirsi, joka jaettiin simuloinnissa kolmeen yhtä suureen osaan. Näitä osia yhdistää liimapinta. Koska pintakäsittelystä ei ollut tietoa, käytettiin simuloinnissa yksinkertaistuksen vuoksi pinnoittamattoman puun arvoja. Toisena seinärakenteena tarkastelussa oli pesuhuoneessa sijaitseva ulkoseinä. Seinän rakenne oli ulkoapäin lueteltuna

- lamellihirsi 275 mm
- tuuletusväli 25 mm
- kevytsoraharkko 60 mm
- vesieriste
- kiinnityslaasti
- keraaminen laatta.

Tarkastelusta jätettiin yksinkertaistuksen vuoksi pois kiinnityslaastin ja laatoituksen vaikutus rakenteen fysikaaliseen toimintaan. Tärkeämpää simuloinnin kannalta oli vedeneristeen osuus diffuusiovastuksia määrittäessä.

Yleisesti ottaen hirren ajatellaan olevan turvallinen rakenne yksikerroksisen rakenteen ansiosta, joten hirsirakenteisen seinän ei uskota aiheuttavan kosteusteknisesti ongelmaa. Kuitenkin lamellihirsien välinen liima rakenteessa on herättänyt kysymyksiä ja onkin kiinnostavaa tarkastella, millä tavalla liiman vaikutus ilmenee kosteusteknisessä tarkastelussa ja miten se saadaan mallinnettua. Tämän opinnäytetyön simulointia varten pyrittiin löytämään liiman vesihöyrynläpäisevyydelle todellisuutta vastaava arvo. Myös haitta-ainneiden osalta liiman vaikutus sisäilmanlaatuun on oleellinen kysymys.

Useamman hirsivalmistajan käytössä olevasta Purbond HB liimasta löytyi sertifikaatti (Z-9.1.711, Z-9.1.765), josta saatiin simulointia varten liiman tiheyden arvo. Muita laskentaa varten tarvittavia ominaisuuksia ei kyseistä liimasta löytynyt. Sisäilman päästöjen osalta liimasta löytyi positiivisia tietoja tutkimuksen aikana. Niitä ei kuitenkaan käsitellä tässä



tarkemmin. On myös kiinnostavaa tarkastella kosteantilan seinärakennetta ja miettiä, miten kosteiden tilojen toteuttaminen olisi järkevää hirsirakenteisissa kohteissa niin, että kosteuden aiheuttamilta riskeiltä välttyttäisiin.

Harkot itsessään eivät todennäköisesti ole riski rakenteen toiminnalle, mutta tarkasteltavassa rakenteessa harkkojen pinta on käsitelty kosteuseristeellä. Tiivis pinta ja harkon ja hirren välinen tuuletusväli saattavat aiheuttaa kondensaatiovaaran ja näin olla rakenteen kokonaisuudelle riskitekijä.

## 7.1 Lamellihirsi

Lamellihirsi (liimahirsi) on kehitetty parantamaan hirren luonnollisista ominaisuuksista johtuvaa epäsuotuisia käyttäytymistä. Tavanomaisesti massiivihirren pinta on altis halkeilulle ja hirsirakenne painuu ajan myötä. Hirsirakenteen voimakas painuminen on vaikeuttanut rakenteen liittämistä muihin materiaaleihin ja rakenteisiin. Lamellihirsissä hirsi on liimattu useasta, vähintään kahdesta puusoirosta siten, että uloimpana on sydänpuu (kuva 5). Tällä keinolla hirren luonnollista käyttäytymistä on saatu hillittyä. Kehityksen tuloksena on myös saatu niin sanottuja painumattomia hirsiiä, joiden keskellä oleva lamelli on pystysuunnassa. (8, s. 76.)



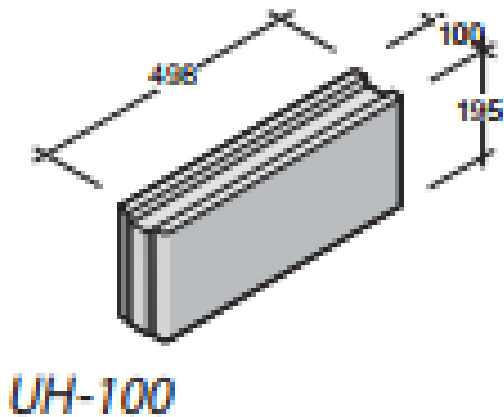
*KUVA 5. Lamellihirsi ja painumaton hirsi (10, s. 28, 113)*

Hirren hygroskooppisuudella tarkoitetaan puun kykyä luovuttaa ja vastaanottaa kosteutta tasapainottaen samalla rakenteen ja ilman suhteellisen kosteuden välisiä eroja. Lamellien yhdistämisessä käytetty liima voidaan levittää niin sanotuksi harsoksi pinnalle, jolloin liima-ainekseen jää ilmankulkuaukkoja. Lisäksi liiman materiaalit pyritään valitsemaan siten, että puun hygroskooppisuus estyy mahdollisimman vähän. Olennaisena osana hirren hygroskooppisuuden kannalta ovat diffuusion mahdollistavat pintakäsittelyaineet. (9.)

## 7.2 Kevytsoraharkko

Kevytsoraharkkojen (kuva 6) soran valmistus tapahtuu paisuttamalla savea korkeassa lämpötilassa. Tällä menetelmällä syntyy pinnalta kovia mutta sisältä huokoisia rakeita. Kevytsoraharkkojen valmistuksessa käytetään kevytsoran lisäksi sementtiä ja vettä. (11, s. 1.)

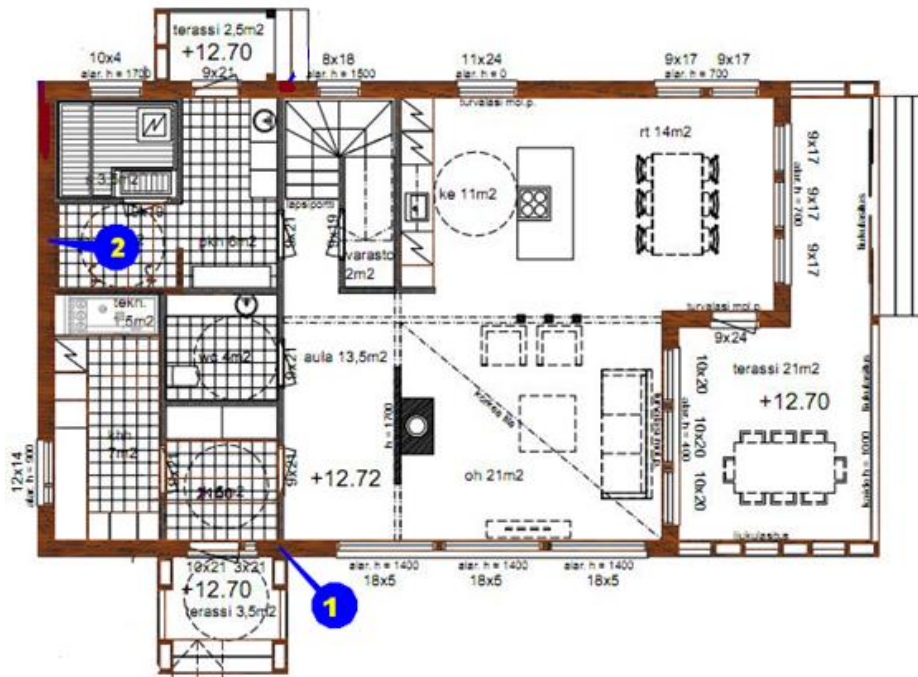
Harkot imevät vain vähän vettä ja ovat nopeasti kuivuvia sorarakeiden suljetun huokosrakenteen ansiosta. Näiden ominaisuuksiensa ansiosta ja epäorgaanisena materiaalina harkot eivät ole homehtumisherkkiä. (11, s. 1.)



KUVA 6. Kevytsoraharkko (11, s. 3)

## 8 MITTAUSPISTEET

Lähtötiedoiksi opinnäytetyötä varten saatiin kohteen pääkuvat, pohjapiirustus mittauspistemerkinnöillä (kuva 7) sekä leikkauskuvat (kuva 8 ja 9), joissa näkyvät rakenteessa sijaitsevien antureiden paikat. Tutkittavana olivat mittauspisteiden 1 ja 2 seinärakenteet.

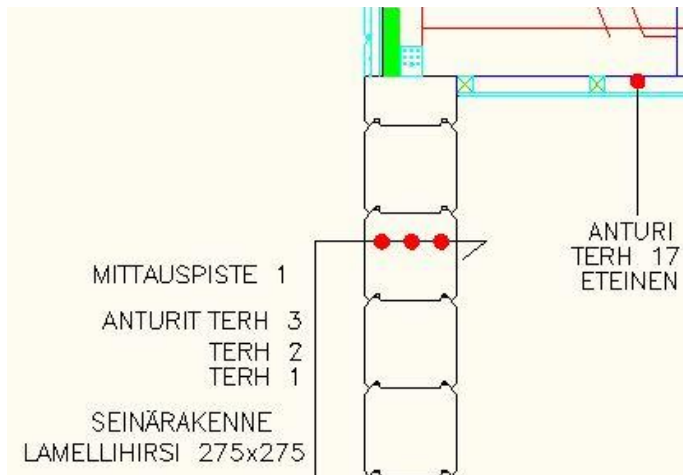


KUVA 7. Mittauspisteet pohjakuvassa

### 8.1 Mittauspiste 1 (anturit 1-3 ja 17)

Ensimmäinen tutkittava seinärakenne sijaitsee pääovesta sisään mentäessä katsottuna oikealla puolella, rakennuksen länsipuolella. Sama seinä jatkuu aulatilan puolella. Mittauspisteiden 1 läheisyydessä ei ole mitään kosteuden tuottoa lisäävää.

Antureita oli sijoitettu seinärakenteeseen kolme kappaletta (TERH 1-3), joista TERH 1 sijaitsi lähinnä sisäpintaa. Anturi (TERH 17) oli sijoitettu eteisen kattorakenteen alaslaskun yläpuolelle. TERH 17 -anturin tietoja käytettiin simuloinnissa sisäilman olosuhteiden tietoina. (Kuva 8.)

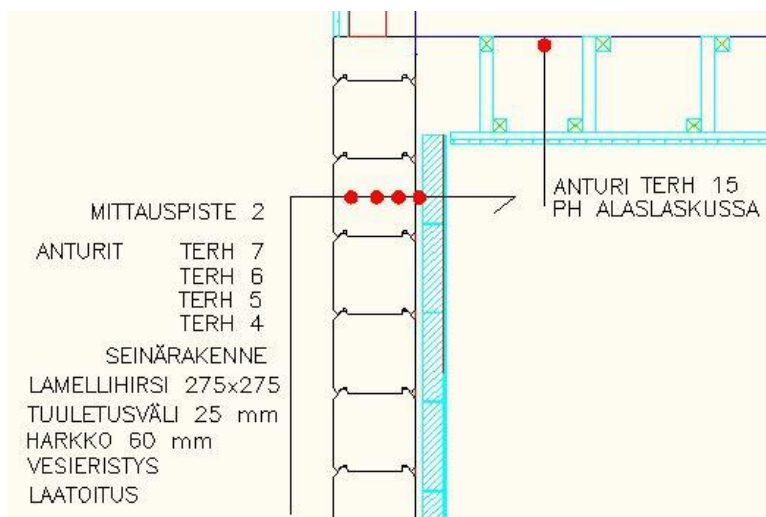


KUVA 8. Anturit rakenteessa MP1

## 8.2 Mittauspiste 2 (anturit 4-7 ja 15)

Toinen tutkittava seinärakenne sijaitsee pesuhuoneessa päätyseinällä suihkujen ja saunan välisellä alueella eli suihkualueella, jossa kosteusrasitus on suurempaa. Seinä sijaitsee pohjoispäässä rakennusta.

Seinärakenteeseen oli sijoitettu neljä anturia (TERH 4-7), joista yksi (TERH 4) sijaitsi tuuletusvälissä harkon ja hirsirakenteen välissä. Pesuhuoneen alaslaskuun oli sijoitettu anturi TERH 15. Tämän anturin tietoja ei käytetty tässä työssä. (Kuva 9.)



KUVA 9. Anturit rakenteessa MP2

## 9 SIMULOINTI

WUFI-laskentaohjelmalla tutkittavat rakenteet ja ympäristö simuloitiin mahdollisimman todennäköisiksi. Simuloinnin tuloksien avulla rakenteiden fysikaalisia toimintoja pystyttiin vertaamaan laskennallisiin tuloksiin.

### 9.1 Lähtötietojen käsittely

Lähtötiedoiksi rakenteen sisäisistä antureista ja naapuritalon tuuletusraosta tehtiin Excel-  
taulukot, joihin kirjattiin antureilla mitatut lämmön ja suhteellisen kosteuden arvot tunnin  
välein mitattuna. Rakenteen sisäisten antureiden mittaustuloksia oli toukokuusta 2013  
toukokuuhun 2018 asti. Tuuletusraon eli ulkoilman arvoja oli ajalta 21.7.2016 - 20.7.2017.  
Exceliin taulukoiduista tiedoista tehtiin yksi taulukko (taulukko 5), jossa ensimmäisenä on  
juokseva numero, päivämäärä ja aika yhden tunnin välein sekä lämpötila ja suhteellinen  
kosteus jokaiselle anturille erikseen.

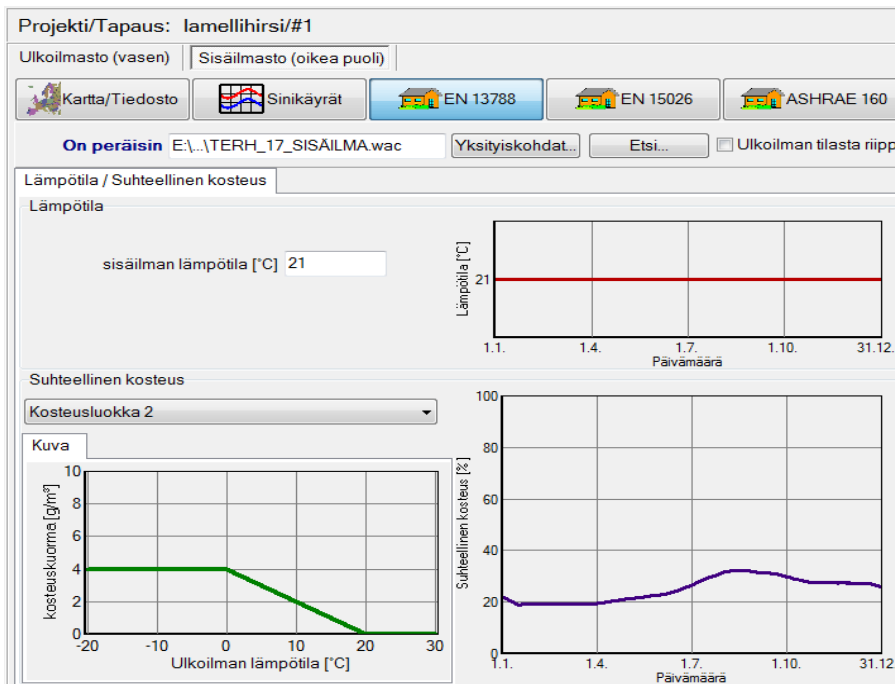
TAULUKKO 5. Antureiden mittaustiedostot Excel-taulukossa

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	
1	id	dateutc	TE_01	HU_01	TE_02	HU_02	TE_03	HU_03	TE_04	HU_04	TE_05	HU_05	TE_06	HU_06	TE_07	HU_07	TE_08	HU_08	TE_09	HU_09	TE_10	HU_10	TE_11	HU_11	TE_12	HU_12	TE_13	HU_13
2	1	11.2015 0:00	13	40.5	6.9	52.5	1.8	78.7	17.9	21.9	12.8	44.2	6.8	63.2	2.6	79.5	17.9	22	17.8	22	0.1	100	0.6	100			0.65	100
3	2	11.2015 1:00	13	40.5	6.9	52.5	1.8	78.5	17.9	21.9	12.8	44.2	6.8	63.7	2.1	79.3	17.9	22	17.9	22	0	100	-0.1	100			-0.1	100
4	3	11.2015 2:00	13	40.5	6.9	52.5	2.6	77.6	17.9	21.9	12.8	44.4	6.8	63.2	2.8	79.2	17.8	22	17.9	22	-0.8	100	-0.9	100			-0.9	100
5	4	11.2015 3:00	13	40.5	7	52.3	2.7	77.5	17.9	21.9	12.8	44.4	6.8	63.5	3	78.8	17.8	22	17.8	22	-2.2	100	-2.1	100			-2.2	100
6	5	11.2015 4:00	13	40.5	7.5	52	2.8	77	17.8	21.8	12.8	44.4	6.9	63	3.6	77.6	17.7	22.1	17.8	22	-3.4	100	-3.3	100			-3.4	100
7	6	11.2015 5:00	13	40.5	7.5	52	2.9	76.9	17.8	21.8	12.8	44.2	6.9	63.3	3.6	77.8	17.7	22.1	17.7	22.1	-4.1	100	-3.7	100			-3.9	100
8	7	11.2015 6:00	12.9	40.6	7.6	51.9	2.9	77.2	17.8	21.8	12.8	44.2	7	63.2	3.6	77.8	17.6	22.2	17.7	22.1	-4.9	100	-4.6	100			-4.8	100
9	8	11.2015 7:00	12.9	40.4	7.6	51.9	2.9	76.9	17.8	21.8	12.8	44.2	7.5	62.4	3.7	77.6	17.6	22.2	17.6	22.2	-6.4	100	-5.8	100			-6.1	100
10	9	11.2015 8:00	12.9	40.6	7.7	51.8	3.5	75.9	17.8	22	12.8	44.4	7.6	62.3	3.8	77.8	17.6	22.2	17.6	22.2	-7.7	100	-7.1	100			-7.4	100
11	10	11.2015 9:00	12.9	40.6	7.7	51.8	3.6	76	17.8	22	12.8	44.4	7.6	62.3	3.8	77.8	17.6	22.2	17.6	22.2	-8.9	100	-8.2	100			-8.6	100
12	11	11.2015 10:00	12.9	40.4	7.7	51.8	3.6	75.7	17.8	22	12.8	44.4	7.6	62.6	3.9	77.3	17.7	22.1	17.6	22.2	-9.5	100	-9.1	100			-9.3	100
13	12	11.2015 11:00	13	40.3	7.8	51.8	3.7	75.8	17.8	22	12.8	44.4	7.7	62.3	3.9	77.6	17.7	22.1	17.7	22.1	-10.2	100	-9.4	100			-9.8	100
14	13	11.2015 12:00	13	40.7	7.8	51.6	3.7	75.5	17.8	22	12.8	44.2	7.7	62.1	3.9	77.6	17.7	22	17.7	22.1	-10.3	100	-9.8	100			-10	100
15	14	11.2015 13:00	13.5	39.7	7.8	51.9	3.6	75.7	17.8	22	12.9	44.9	7.7	62.1	3.9	77.6	17.7	22.1	17.7	22	-10.2	100	-9.5	100			-9.9	100
16	15	11.2015 14:00	13.5	40	7.8	51.9	3.6	76	17.8	22	12.9	44.1	7.8	62	3.9	77.6	17.8	22	17.7	22.1	-10.1	100	-9.3	100			-9.7	100
17	16	11.2015 15:00	13.5	39.7	7.9	51.5	3.6	75.7	17.9	21.9	12.9	44.5	7.8	62.3	3.9	77.6	17.8	22	17.8	22	-10.1	100	-9.4	100			-9.8	100
18	17	11.2015 16:00	13.6	40	7.9	51.8	3.5	75.5	17.9	21.9	12.9	44.1	7.8	62	3.8	77.8	17.8	22	17.8	22	-10	100	-9.4	100			-9.7	100
19	18	11.2015 17:00	13.6	39.9	7.9	51.5	2.9	76.5	17.9	21.9	12.9	44.1	7.8	62.4	3.8	77.8	17.8	22	17.8	22	-9.1	100	-8.6	100			-9	100
20	19	11.2015 18:00	13.6	39.9	7.9	51.8	2.8	76.7	17.9	21.9	13	44	7.8	62	3.7	77.9	17.8	22	17.8	22	-8.3	100	-8.2	100			-8.3	100
21	20	11.2015 19:00	13.6	39.9	7.9	51.5	2.8	76.4	17.9	22.2	13.5	43.6	7.8	62	3.6	77.8	17.8	22.2	17.8	22	-7.7	100	-7.5	100			-7.6	100
22	21	11.2015 20:00	13.6	39.9	7.9	51.8	2.7	76.9	17.9	21.9	13.5	43.3	7.8	62	3.6	77.8	17.8	22	17.8	22.2	-7.4	100	-7.3	100			-7.4	100
23	22	11.2015 21:00	13.6	39.9	7.9	51.5	2.7	76.9	18	22.1	13.5	43.3	7.8	62	3.6	77.8	17.8	22	17.8	22	-7.7	100	-7.4	100			-7.6	100
24	23	11.2015 22:00	13.7	39.7	7.9	51.8	2.8	77	18	22.1	13.5	43.6	7.8	62.1	3.6	77.8	17.8	22	17.8	22	-8.3	100	-7.9	100			-8.1	100
25	24	11.2015 23:00	13.7	39.5	7.9	51.5	2.8	77	18	21.9	13.5	43.6	7.8	62	3.6	78.1	17.8	22	17.8	22	-8.9	100	-8.4	100			-8.7	100
26	25	2.1.2015 0:00	13.7	39.7	7.9	51.5	3	76.4	18	22.1	13.5	43.6	7.8	62	3.6	77.8	17.8	22	17.8	22	-9.3	100	-9	100			-9.2	100

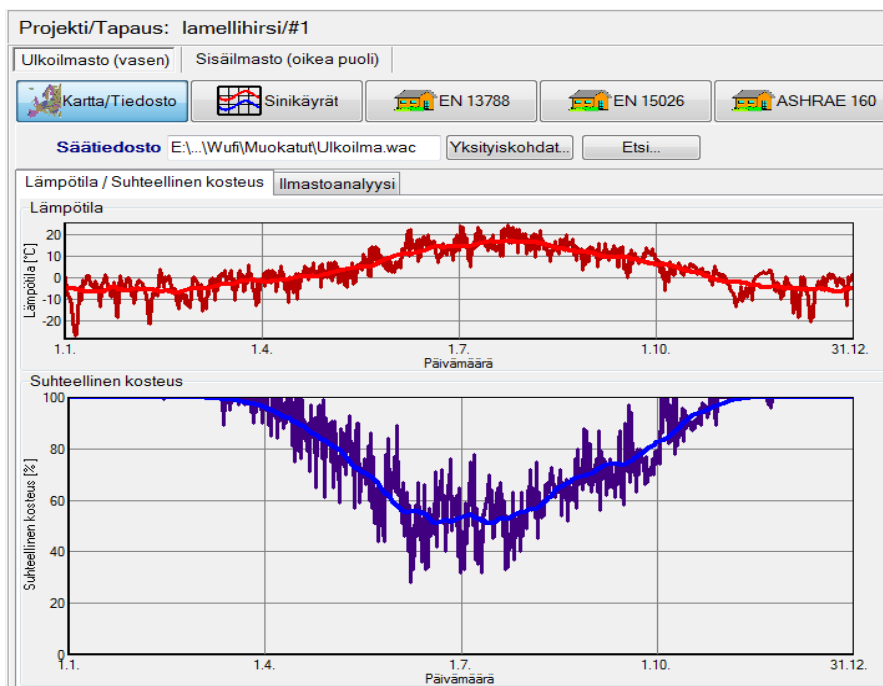
Rakenteen sisäisistä mittaustuloksista taulukkoon jätettiin vain Mp1- ja Mp2-antureiden tiedot, ajalta 1.1.2015 - 31.12.2017. Aikajakso valikoitiin mahdollisimman lähelle ulkoilman tiedoston alkuperäistä mittaussajankohtaa. Ulkoilmasta saatuja mittaustuloksia oli kahdesta eri puolilla naapuritaloa sijainneesta anturista (TERH\_U1 ja TERH\_U2). Ulkoilman arvoja kopioitiin vastaamaan kolmen vuoden pituista ajanjaksoa ja vuosiluvut muutettiin vastaamaan rakenteesta saatujen mittaustulosten päivämääriä. Antureiden arvot yhdistettiin laskemalla niiden keskiarvot ja ne taulukoitiin nimellä TERH\_U.

TERH\_17-anturin arvojen avulla laskettiin keskiarvo sisälämpötilalle, joka oli tulosten perusteella 22,5 °C. Konvektion vaikutuksesta lämpötila katonrajassa on korkeampi, joten voidaan olettaa, että lämpötila on oleskeluvyöhykkeellä mitattua arvoa matalampi. Laskentaohjeiden mukaan asuinhuoneistossa, joissa pyritään pitämään huoneilma normaalissa 21 °C, laskentaohjelmaa käytettäessä suositeltavaa olisi käyttää sisäilman lämpötilana 21 °C:n arvoa ympäri vuoden. Tällä huomioidaan kesäajan jäähdytyksen vaikutus sisäilman lämpötilaan. (5, s. 82.)

Valmista säädataa, tekstitiedostoa (WAC), muokattiin Excelin avulla antureilla mitatuilla arvoilla toimivaksi ulkoilma- ja sisäilmatiedostoiksi. Sisäilmatiedosto tehtiin TERH\_17-anturin tiedoista (kuva 10) ja ulkoilmatiedosto TERH\_U -tiedoista (kuva 11). Paikkakunta-kohtaisia säädatatiedostoja on saatavilla Ilmatieteenlaitoksen sivuilla, mutta tässä haluttiin käyttää mahdollisimman todellisia arvoja sijaintiin nähden. Suositeltavaa on, että ajanjakso alkaa vuoden alusta ja etenee vuoden loppua kohti (5, s. 84).



KUVA 10. Sisäilman lämpö ja suhteellinen kosteus



KUVA 11. Ulkoilman lämpö ja suhteellinen kosteus

Alkuperäisissä taulukoissa oli mittauksien virhemerkintöjä sekä puuttuvia tunteja ja päiviä. Puuttuvat tiedot korjattiin kopiaimalla arvoja läheisistä ajankohdista. Korjaukset tehtiin, jotta mahdollisilta ongelmilta vältyttäisiin suorittaessa laskentaa WUFI-ohjelmalla ja jotta laskennallisia ja mitattuja arvoja voitaisiin vertailla helpommin. Korjattavia rivejä oli suhteessa alkuperäiseen määrään nähden vain vähän, joten korjaamisen vaikutus ei ole merkittävä tuloksien luotettavuuden kannalta. Satunnaiset päivän mittaiset aukot tuloksissa eivät vaikuta merkittävästi laskennassa saatujen tuloksien luotettavuuteen tarkasteltaessa pitkää ajanjaksoa.

## 9.2 Rakennemallin luonti (mittauspiste 1)

Seinärakenne 1 on mäntylamelleista liimaamalla valmistettu hirsi. Puun ominaisuudet vaihtelevat paljon johtuen puun tiheydestä ja laadusta, joten suoraan valmiita arvoja ei näin ollen voi määrittellä taulukkoarvojen mukaan. Puun materiaaliarvot määritettiin pääosin WUFIN materiaaliuuttelossa olevan kuusipuun tiedoista. Puun diffusiovastuskerroksena käytetään tässä arvoa 70. Paljon käytetyille rakennusmateriaaleille on valmiita taulukoituja arvoja teoksessa RILL 255-1-2014.

Liimalle määriteltiin samalla tavalla oma materiaali omilla fysikaalisilla arvoilla. Purbond HB -liimasta löytyneen tiedon mukaan liimalla on ennemminkin huokoinen koostumus

kuin täysin tiivis, joten materiaaliksi valittiin sellainen, jonka diffuusiovastuskerroin ei ole korkea. Purbond HB -liiman sertifikaatin mukaan tiheyden arvoksi muutettiin  $1,16 \text{ kg/m}^2$ . Ominaislämpökapasiteetti muutettiin vastaamaan PUR-liiman taulukoitua arvoa. Liiman 1 mm:n paksuus saattaa vääristää todellisia tuloksia, mutta sitä ohuempaa kerrosta ei ohjelmalla voi laskea. Monitorointipisteet määritettiin niiden lamellien keskelle, joissa an-tureiden voidaan olettaa sijaitsevan, keskelle. Ohjelma määrittää automaattisesti monito-rointipisteet myös jokaisen materiaalipinnan liitoskohtaan (kuva 12).

Projekti/Tapaus: lamellihirsi/#1

Rakenne/Monitorointipisteet Ilmansuunta/Kallistuskulma/Korkeus Pinnan siirtokertoimet Alkuolosuhteet

**Rakenne**

No.	Kerros/Materiaali (ulkoa sisälle päin)	Paksuus [m]
1	Mänty_01	0,091
2	Liima_01	0,001
3	Mänty_02	0,091
4	Liima_02	0,001
5	Mänty_03	0,091

Materiaalitiedot

Lähteet, nielut

Uusi kerros

Monista

Poista

Muokkaa rakennetta

Kuva

Taulukko

Taulukko: jaottelu

Hila


Monitorointipaikat

**Monitorointiasemat: Mänty\_03**

No.	Syvyydellä [m]	Todellinen syvyys [m]	Elementti
5.1	0,0455	0,05004	20

Uusi

Poista



Määritä materiaalitietokannasta

Materiaalitietokanta

Esimerkkitapaukset

Hila

Automaattisesti (II)

100

Tiheä

oi automaattinen hilamäärittely editointia v.

Kokonaispaksuus Paksuus: 0,28 m

Lämpötekninen kokonaistoimivuus R-arvo: 1,97 m<sup>2</sup>K/W

U-arvo: 0,467 W/m<sup>2</sup>K

KUVA 12. Monitorointipisteet

### 9.3 Alku- ja ympäristöolosuhteet

Alkuolosuhteissa määritettiin materiaalien alkulämpötila ja kosteusjakaumat, joista las-kenta lähti liikkeelle. Alkutilanteen suhteellisena kosteutena voidaan yksinkertaistuksen vuoksi käyttää arvoa 0,8, joka tarkoittaa RH 80 %:n olosuhdetta. Yksinkertaistettu mene-telmä lämpötilan osalta on usein riittävä rakennusfysikaalisiin tarkasteluihin, koska läm-pötilaprofiili mukautuu muutamassa tunnissa vallitseviin olosuhteisiin. (12, s. 63.)



Kun rakennemalli oli luotu, määriteltiin rakennetta ympäröivien olosuhteiden parametrit. Ensimmäisen tutkittavan rakenteen seinä oli länsiseinustalla, joten malliin asetettiin ilmansuunnaksi länsi. Malliin oltaisiin voitu valita myös haasteellisemmat olosuhteet, mutta tässä tarkasteltiin rakenteen todellisia olosuhteita. Rakenteen kallistuskulmaksi valittiin 90°, koska kyseessä oli pystysuora seinärakenne. Laskennassa ei huomioitu sateen vaikutusta. Laskentaan valittiin matalan rakennuksen asetukset.

#### **9.4 Pinnansiirtokertoimet**

Seuraavaksi määritettiin rakenteen pintojen lämmönsiirtokertoimet standardin SFS-EN ISO 6946 mukaan. Standardin mukaan ulkopinnassa käytetään lämmönvastuksena arvoa 0,04 m<sup>2</sup>K/W ja sisäpinnan lämmönvastuksen arvo on 0,13 m<sup>2</sup>K/W.

SD-arvo, diffuusiovastus, määräytyy diffuusiovastusluvun ( $\mu$ ) ja materiaalin paksuuden tulona. Tässä käytettiin käyttäjän määrittelemiä arvoja laskemalla SD-arvot. SD-arvojen laskussa käytettiin pintalamellin vahvuutta, eli tässä 91:tä mm. Laskettua SD-arvoa haluttiin käyttää, koska pinnan haluttiin toimivan mahdollisimman luonnollisella tavalla kuivuuksaan ulospäin. SD-arvon käyttöä ei suositella, jos laskelmassa on käytössä sateen vaikutus. Absorptiokerroin määräytyi käsittelemättömän puun arvoilla, koska säteilyn vaikutus haluttiin pitää vähäisenä, sillä todellista säteilyn vaikutusta ei pystytä laskemaan saaduilla lähtötiedoilla. (12, s. 62.)

#### **9.5 Laskennan ajanjakso ja laskenta**

Laskennan ajanjakso määritettiin kolmen vuoden jaksolle ja laskenta määritettiin tapahtuvan yhden tunnin välein. Suosituksena on laskea vähintään kolmen vuoden ajanjaksolta, jotta kosteus ehtii tasaantua rakenteessa ja mahdollinen rakennekosteus kerkeää osittain kuivumaan. Tulosten tarkasteluissa tarkastellaan viimeisen vuoden tuloksia. Laskentajaksot voidaan määritellä myös esimerkiksi riskiajankohdalle, jolloin niin sanotut varmasti turvallisten ajanjaksojen tarkastelu jätetään vähemmälle ja näin työmäärää saadaan vähennettyä. (5, s. 84.)

Kun laskentamalli on saatu valmiiksi, aloitetaan laskeminen. Laskennan vaihtoehdosta valittiin videollinen laskenta, sillä se on hyvin havainnollistava. Lisäksi videota pystyy tutkimaan myöhemmin. Videosta nähdään lämpötilan suhteellisen kosteuden ja kosteuspi-

toisuuden liikkeet samassa kuvaajassa. Videon kuvaajaan saa näkymään myös kaste-  
pistelämpötilan halutessaan. Laskennan jälkeen avautuvasta Laskennan tilanne -taulu-  
kosta tarkastetaan, onko laskennassa tullut konvergointivirheitä ja ovatko tase 1 ja 2 yhtä  
suuret. Näiden perusteella voidaan arvioida laskennan luotettavuutta.

## **9.6 Rakennemallin luonti (mittauspiste 2)**

Seinärakenteen 2 laskentamalli tehdään pitkälti samalla tavalla kuin seinärakenteen 1.  
Valmiina olevaan malliin lisätään sisäpuolelle ilmakerros 25 mm ja harkko 60 mm. Vede-  
neristystä ei mallinneta tässä rakenteeksi, vaan käytetään menetelmää, jossa ohuet pin-  
nat, kuten kosteus- ja höyrynsulut, huomioidaan diffuusiovastuskertoimen avulla lasket-  
tavaa suhteellista diffuusiovastusarvoa (SD-arvo) käyttäen. Tämä tieto on saatavissa  
myös taulukoiduista arvoista. Rakenteen rajoituksessa huonetilaan voidaan pinnalle aset-  
taa vaihtoehtoisesti SD-arvo, materiaalin suhteellinen diffuusiovastus. (12, s. 62.)

Ilmarako voidaan mallintaa ilmakerroksena, joka käsitellään suljettuna ilmatilana, jossa  
ilmavirtausta ei oleteta suureksi. Mikäli ilmaraon tuuletus voidaan olettaa riittävän suu-  
reksi, suositellaan ilmarako käsittelemään omana ilmasto-olosuhteenaan. Ilmaraossa ei  
esiinny lyhytaaltoista auringonsäteilyä, jolloin ilmaraon sisäpinnan olosuhteeksi voidaan  
määrittää sisäilmaolosuhteet. Lisävarmuudeksi kasvattamiseksi lämpötila voidaan olet-  
taa pienemmäksi ja kosteus suuremmaksi. (12, s. 22.)

Koska ilmaraon oletetaan tässä rakenteessa olevan huonosti tuulettuva, käytetään mal-  
linnuksessa suljettua ilmatilaa. Näille löytyy WUFIN rakennekirjastosta valmiita rakenne-  
kerroksia. Materiaalin ominaisuudet säilytettiin oletusarvoisina. Ilmakerros, without addi-  
tional moisture capacity, käyttää realistisempia fysikaalisten ominaisuuksien arvoja.  
WUFIN antaman ohjeen mukaan pelkkää ilmakerrosvaihtoehtoa ei tulisi käyttää mallin-  
nuksessa, jos simulointi tehdään rakenteiden toiminnan arviointia varten. Ilmakerros mal-  
linnetaan todellisen paksuisena ja se huomioi materiaalin konvektion ja säteilyn ominai-  
suudet. (12, s. 22.)

Kevytsoraharkolle tehtiin myös oma materiaali valmiin materiaalin pohjalle taulukkoarvo-  
jen mukaan. Rakenteeseen lisättiin monitorointipisteet molemmin puolin ilmakerrosta.  
Ohjelma lisää monitorointipisteen myös harkon sisäpintaan, mikä tässä tapauksessa tar-  
koittaa pintaa vesieristeen takana. (Kuva 13.)

Projekti/Tapaus: lamelli-hirsi/#1

Rakenne/Monitorointipisteet | Ilmansuunta/Kallistuskulma/Korkeus | Pinnan siirtokertoimet | Alkuolosuhteet

**Rakenne**

No.	Kerros/Materiaali (ulkoa sisälle päin)	Paksuus [m]
3	Mänty_02	0.091
4	Liima_02	0.001
5	Mänty (oma)	0.091
6	Ilmakerros	0.025
7	Kevytsojarahkko oma	0.06

**Monitorointiasemat: Ilmakerros**

No.	Syvyydellä [m]	Todellinen syvyys [m]	Elementti
6.1	0	0.00129	1
6.2	0.025	0.02371	7

Kokonaispaksuus: 0.36 m  
Lämpötekninen kokonaistoimivuus: R-arvo: 2.35 m<sup>2</sup>K/W  
U-arvo: 0.397 W/m<sup>2</sup>K

KUVA 13. Monitorointipisteet

Seinärakenne 2 on pesuhuoneen ulkoseinä. Märkätiloissa tulee ottaa huomioon pesuveisien muodostama kosteusrasitus rakenteiden toiminnan suunnittelussa. Taulukon 6 mukaan asuinrakennukset ovat luokassa 2. Kosteuslisän arvo on talvella 5 g/m<sup>3</sup>, kun lämpötila on pienempi kuin 5 °C. Rakennusfysikaalisessa suunnittelussa ei ole käytössä korjauskertoimia mutta varmuuksia tulee käyttää riskiarvion mukaan. (5, s. 70.) Tarkasteltava seinä sijaitsee pohjoispuolella, joten ilmansuunnaksi laskentaan vaihdettiin pohjoinen.

TAULUKKO 6. Kosteusluokat (5, s. 71)

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

<sup>1</sup> Kosteusluokan 1 rakennuskohteissa sisäilman kosteuslisä ja lämpötila on aina arvioitava kohdekohtaisesti erikseen mitoituksen yhteydessä. Kosteuslisä voi vaihdella rakennuksen käyttötarkoituksesta riippuen välillä 6–20 g/m<sup>3</sup>.

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

<sup>3</sup> Eri rakennustyyppeihin kuuluvia rakennuksia on lueteltu tarkemmin RakMK D3:ssa (2012) /20/.

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

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

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

## 10 SIMULOINNIN JA ANTUREIDEN TULOKSET

Simuloinnin tutkimustuloksia tulee arvioida kriittisesti, sillä laskennassa voi tulla virheitä liittyen materiaaliominaisuuksien valintoihin, laskentaohjelman olettamuksiin, laskentamallin luomiseen, laskentaohjelman alkuarvoihin. Lisäksi tulee ottaa huomioon mittaus-tulosten virhemarginaalit, niin mittalaitteista kuin tulosten käsittelystä johtuvista syistä.

Tässä työssä käytettiin laskennasta saatuja datatietoja lämmöstä ja suhteellisesta kosteudesta mitta-antureita vastaavien monitorointipisteiden kohdilta. Antureiden ja laskennan viimeisen vuoden tiedot laitettiin Excelissä päällekkäin samaan kaavioon. Kaavioiden avulla pystytään näkemään simuloinnilla saatujen tuloksien ero todellisiin mittausarvoihin.

### 10.1 Tulokset (mittauspiste 1)

Simuloinnissa seinärakenteeseen 1 sijoitettiin 7 monitorointipistettä. Monitorointipisteitä vastaavat antureiden paikat on merkitty taulukkoon 7.

TAULUKKO 7. Monitorit ja anturit mittauspisteessä 1

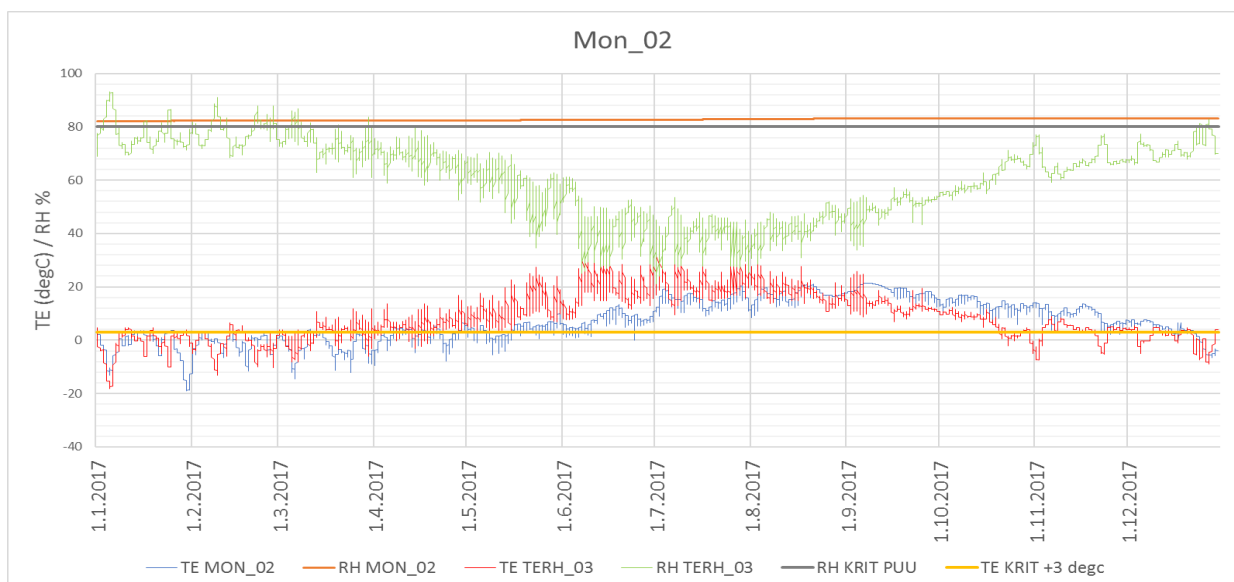
Rakenne		Etäisyys (m)	Monitori	Anturi
Ulkolamelli	Lamellin ulkopinta	0,0000	Mon_01	
	Lamellin keskellä	0,0410	Mon_02	TERH_03
Liima_01	Liimasauma	0,0909	Mon_03	
Keskilamelli	Lamellin keskellä	0,1429	Mon_04	TERH_02
Liima_02	Liimasauma	0,1829	Mon_05	
Sisälamelli	Lamellin keskellä	0,2340	Mon_06	TERH_01
	Lamellin sisäpinta	0,2750	Mon_07	

Mitattu RH on korkeimmillaan ulkolamellissa ja suurimmat RH:n pitoisuudet ovat talvella ja keväällä, marraskuusta toukokuulle. Näinä aikoina suhteellinen kosteus nousee yli 75 %:n. Korkeimmillaan RH on 90 % tammikuun alussa. Laskennallinen RH on lineaarinen

ja yli 80%:n ulkoapäin katsottuna sisälamelliin asti koko tarkastelujakson ajan eikä noudata anturista saatua mittaustulosta.

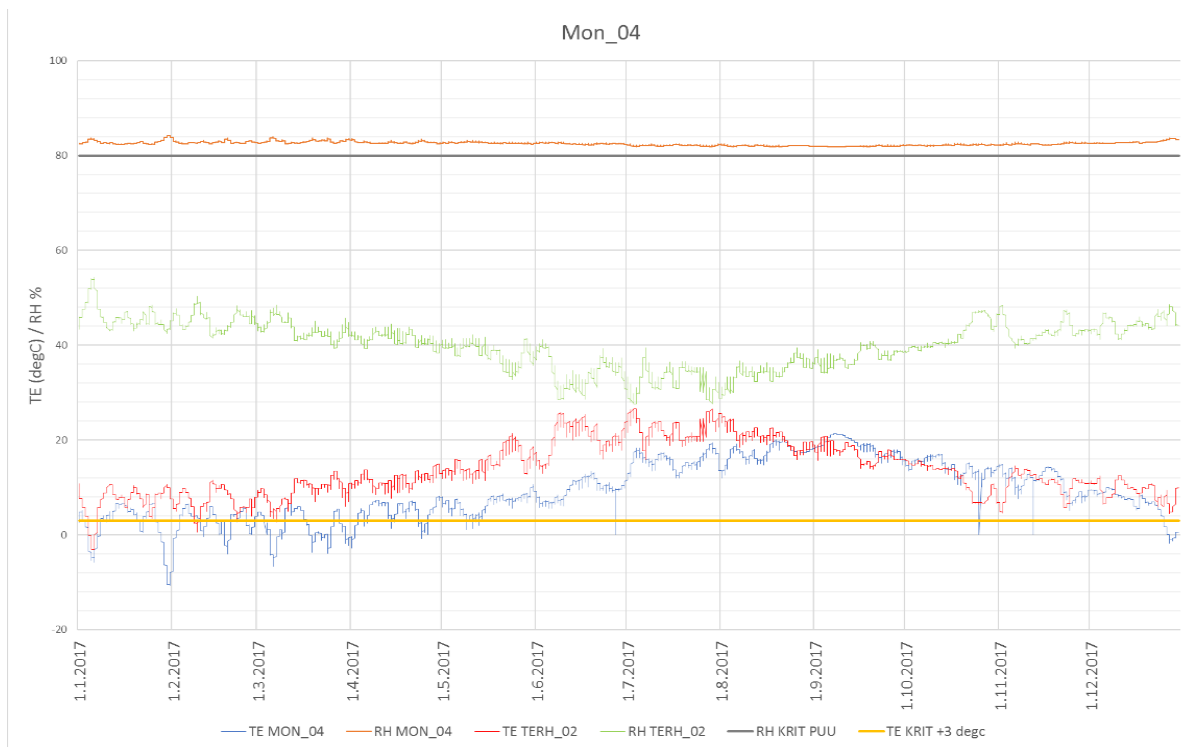
Laskennallinen lämpötila noudattelee antureilla saatavia vertailutuloksia välillä hyvinkin tarkkaan. Sisä- ja ulkolamellissa suurimmat lämpötilakäyrien poikkeamat ovat toukuusta elokuulle. Tuona ajan jaksona anturilla mitatut lämpötilat ovat korkeammat. Syksyllä ulkolamellin mitattu lämpötila lähtee laskemaan alemmaksi kuin laskennallisesti saatu lämpötila. (Kuva 14.)

Suhteellisen kosteuden ollessa yli 75 %:n lämpötila on kuitenkin pääasiassa alle +3 °C. Mitattu lämpötila ulkolamellissa on yli +3 °C:n maaliskuun puolesta välistä lokakuun loppupuolelle. Mahdollisuus alle 0 °C:n lämpötiloille on noin 4 kuukauden ajan koko vuodenaikana.



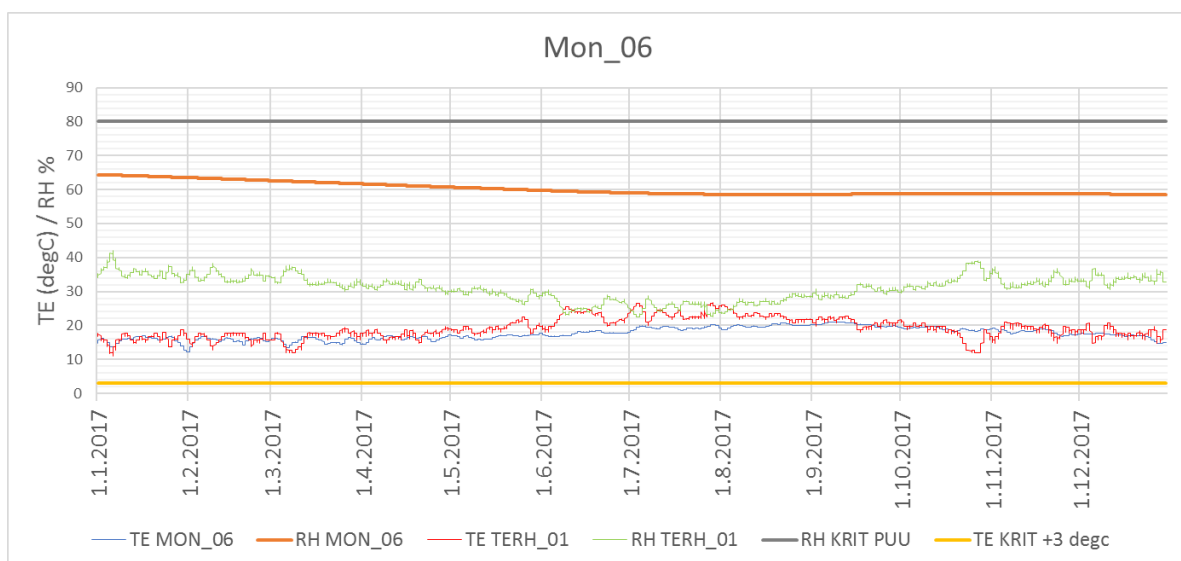
**KUVA 14. Lämpötila ja suhteellinen kosteus ulkolamellissa**

Keskilamellin lämpötiläkäyrät poikkeavat selkeästi eniten (kuva 15) toisistaan. Mitattu lämpötila on huomattavasti korkeampi kuin laskennallinen tammikuusta elokuun puoleen väliin saakka. Sen jälkeen loppuvuoden ajan käyrä noudattaa tarkemmin laskennallista tulosta. Keskilamellissa mitattu suhteellinen kosteus pysyy alle 50 %:n.



KUVA 15. Lämpötila ja suhteellinen kosteus keskilamellissa

Sisälamellissa mitattu suhteellinen kosteus on alle 40 %:n koko vuoden ajan. Alimmillaan sisälamellin RH on 25 % kesä-heinäkuussa. Sisälamellissa laskennallinen RH on huomattavasti matalammalla, jopa 20 prosenttiyksikköä verrattuna mitattujen arvojen käyrään. Keskilamellissa käyrä alkaa noudattamaan muodoltaan mitatun RH:n käyrää. (Kuva 16.)



KUVA 16. Lämpötila ja suhteellinen kosteus sisälamellissa

## 10.2 Tulokset (mittauspiste 2)

Mittauspisteen 2 simuloinnissa rakenteeseen sijoitettiin 2 monitorointipaikkaa lisää, jolloin niitä on tässä rakenteessa 9. Monitorointipaikkoja vastaavat antureiden paikat on merkitty taulukkoon 8.

TAULUKKO 8. Monitorit ja anturit MP 2

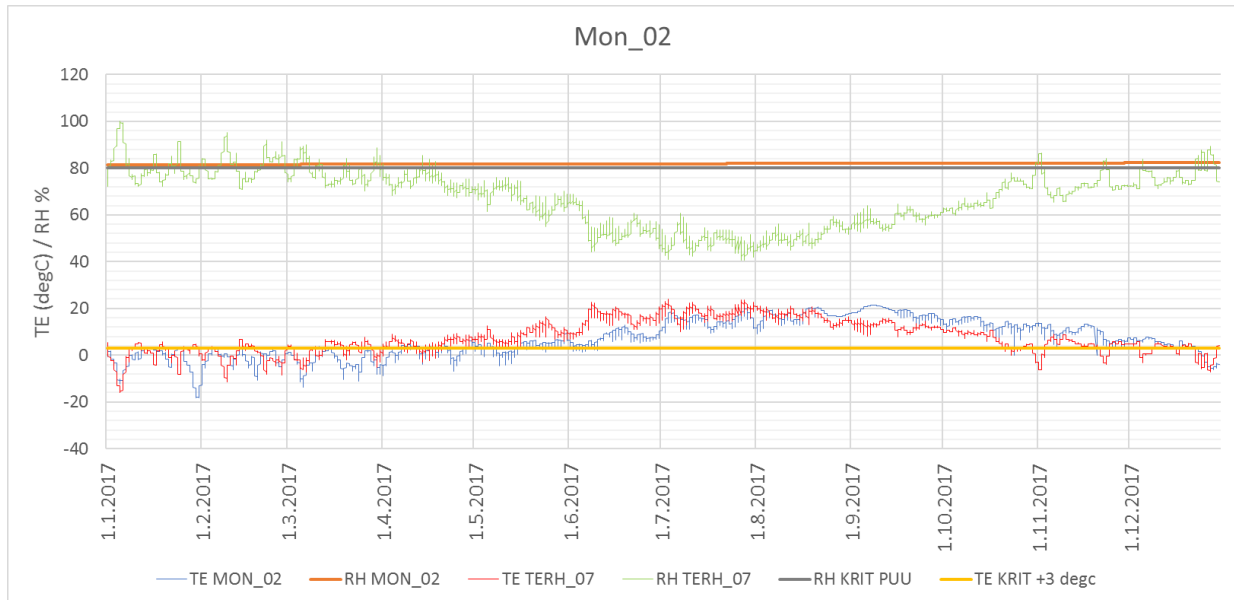
Rakenne		Etäisyys (m)	Monitori	Anturi
Ulkolamelli	Lamellin ulkopinta	0,0000	Mon_01	
	Lamellin keskellä	0,0505	Mon_02	TERH_07
Liima_01	Liimasauma	0,0909	Mon_03	
Keskilamelli	Lamellin keskellä	0,1438	Mon_04	TERH_06
Liima_02	Liimasauma	0,1829	Mon_05	
Sisälamelli	Lamellin keskellä	0,2301	Mon_06	TERH_05
	Lamellin sisäpinta	0,2763	Mon_07	
Ilmakerros	Harkon ulkopinta	0,2987	Mon_08	TERH_04
Kevytsoraharkko	Harkon sisäpinta	0,3600	Mon_09	

Mitattu RH on korkeimmillaan ulkolamellissa ja suurimmat RH:n pitoisuudet ovat talvella ja keväällä, lokakuun lopulta toukokuun puoleen väliin. Näinä aikoina suhteellinen kosteus nousee yli 75 %:n. Korkeimmillaan RH on 100 % tammikuun alussa.

Laskennallinen RH on lineaarinen ja yli 80 %:n ulkoapäin katsottuna sisälamelliin asti koko tarkastelujakson ajan ja se ei noudata anturista saatua mittaustulosta. Laskennallinen lämpötila noudattelee antureilla saatavia vertailutuloksia monin paikoin tarkasti. Ulkolamellissa toukokuusta heinäkuulle mitatut arvot ovat korkeammat kuin laskennalliset ja syyskuusta marraskuun lopulle matalammat. (Kuva 17.)



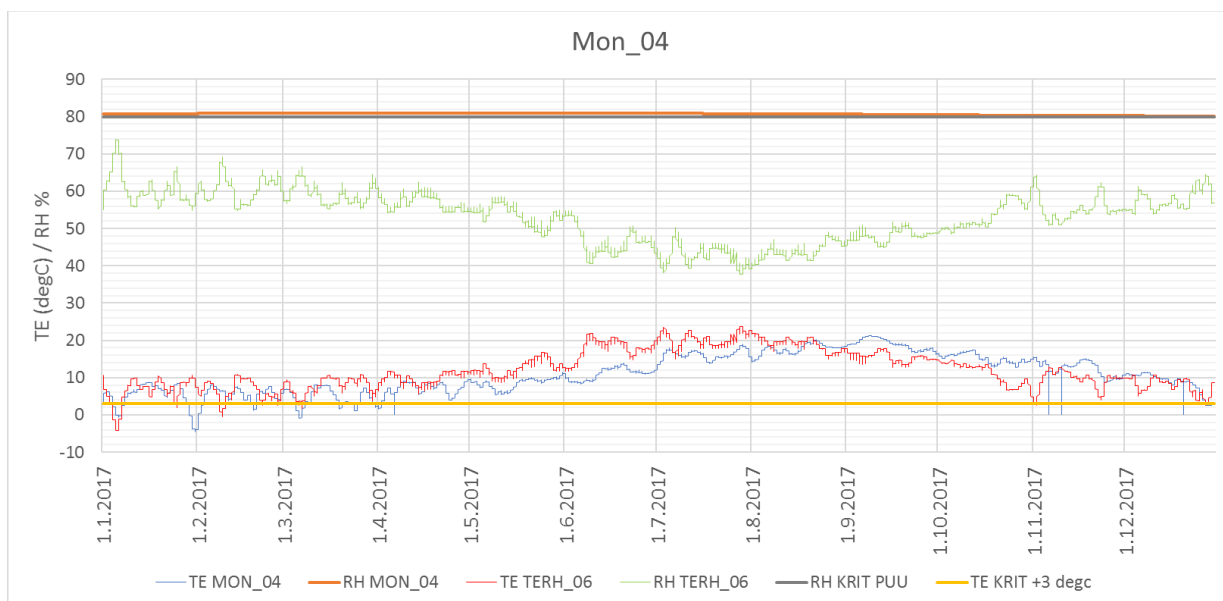
Suhteellisen kosteuden ollessa yli 75 %:n lämpötila on kuitenkin pääasiallisesti alle +3 °C. Lämpötila ulkolamellissa on yli +3 °C huhtikuun puolesta välistä marraskuun alkuun. Mahdollista homeen taantumisen aikaa on marraskuun ja huhtikuun välisenä aikana.



*KUVA 17. Lämpötila ja suhteellinen kosteus ulkolamellissa*

Keskilamellissa mitattu suhteellinen kosteus on pääasiallisesti alle 65 %:n. Tammikuun alussa RH nousee lähes 75 %:iin (kuva 18).

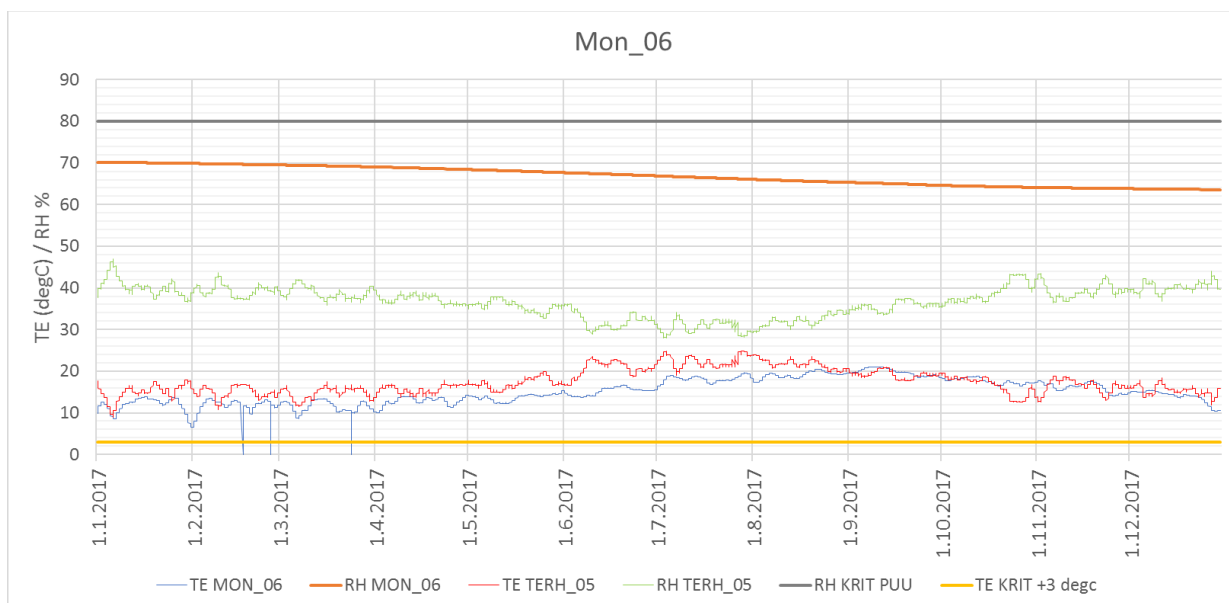
Keskilamellin mitattu lämpötila on korkeammalla verrattuna laskennallisiin arvoihin toukokuusta elokuun puoleen väliin saakka, kunnes kääntyy taas laskusuuntaan ja on matalammalla syyskuusta joulukuulle.



**KUVA 18. Lämpötila ja suhteellinen kosteus keskilamellissa**

Sisälamellissa mitattu RH on alle 45 %:n koko vuoden ajan. Alimmillaan sisälamellin RH on noin 28 %, heinä-elokuussa. Sisälamellin laskennallinen RH on uloimpia osia 10-20 prosenttiyksikköä matalammalla ja se on laskusuuntainen vuoden loppua kohden. Korkeimmillaan sisälamellin RH on tammikuussa, 70 %. (Kuva 19.)

Sisälamellissa mitattu lämpötila on hieman korkeammalla jo tammikuusta alkaen ja selkeämmin käyrät eroavat huhtikuun lopulta elokuun lopulle. Elokuun lopun jälkeen lämpötilat noudattavat hyvin toistensa käyriä.

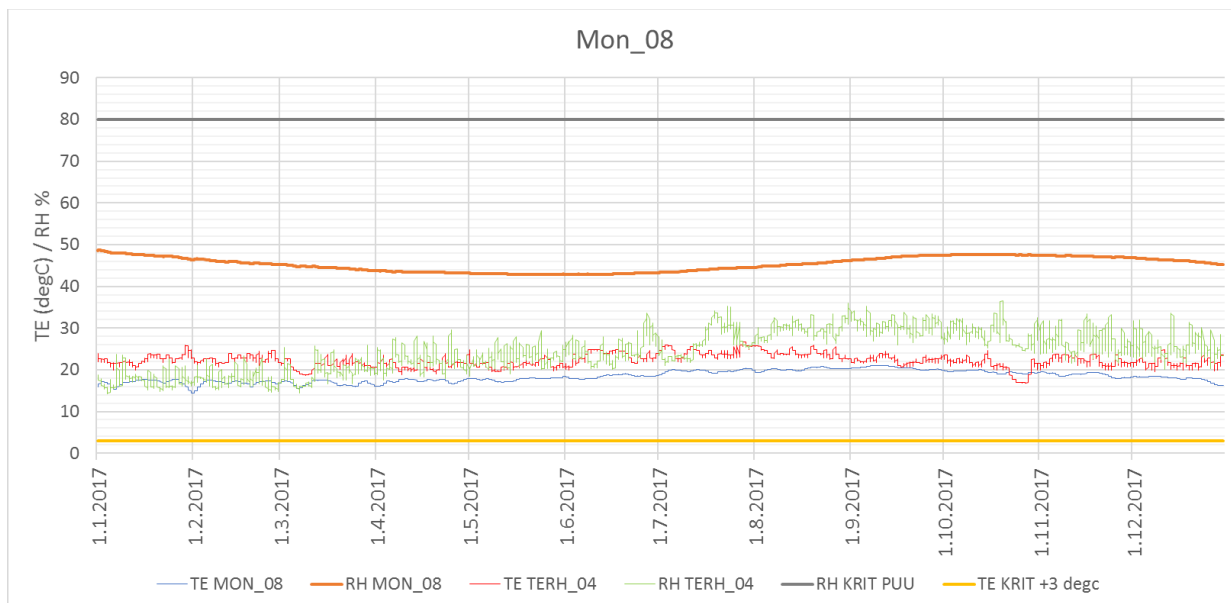


*KUVA 19. Lämpötila ja suhteellinen kosteus sisälamellissa*

Harkon ulkopinnasta mitattu RH on matala, matalimmat arvot ovat tammikuusta huhtikuulle, jolloin arvot ovat keskimäärin alle 25 %. Koko laskenta-ajan aikana korkeimmat arvot ovat 35 %:n luokkaa. (Kuva 20.)

Harkon ulkopinnassa laskennallinen käyrä on muodoltaan samankaltainen kuin mitattujen RH-arvojen käyrä, mutta jopa 30 prosenttiyksikköä korkeammalla kuin mitattujen arvojen käyrä. Laskennallinen käyrä pysyttelee alle 50 %:n.

Harkon ulkopinnan mitattujen arvojen lämpötila on selkeästi korkeammalla tammikuusta syyskuun alkuun, syys- ja lokakuun ajan lämpötilat ovat lähellä toisiaan, kunnes marraskuun jälkeen mitatut lämpötilan arvot poikkeavat laskennallisista selvästi. Harkon ulkopinnan laskennallisen käyrän kuvio on muihin rakenneosiin verrattuna tasaisempi, suuria lämpötilan vaihteluja ei ole havaittavissa.



KUVA 20. Lämpötila ja suhteellinen kosteus harkon ulkopinnassa

## 11 JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET

Laskenta-ajanjaksosta tarkemmin analysoidaan vain viimeistä, kolmatta vuotta, koska ensimmäisten laskentavuosien aikana alkuarvoina käytettyjen arvojen mahdolliset epätarkkuudet tasoittuvat laskennan edetessä. Laskennasta saadun Laskennan tilanne -raportin mukaan kummassakaan tapauksessa laskentoja ei ollut konvergointivirheitä ja Tase 1 ja Tase 2 vastasivat toisiaan siten kuin niiden tuleekin vastata.

Lämpötila-arvojen erot laskennallisten ja mitattujen arvojen välillä saattaisivat olla pienemmät, jos sisäilman arvoina käytettäisiin todellisia, antureiden 17 ja 15, lämpötiloja ja suhteellisen kosteuden arvoja. Lämpötila-arvojen erot laskennallisten ja mitattujen välillä voivat selittyä osittain suhteellisen kosteuden siirtymien erojen kautta, sillä korkeat kosteuspitoisuudet johtavat suurempiin lämpöhäviöihin. Tämä taas tarkoittaisi sitä, että suuremman kosteuden vallitessa rakenne on kylmempi kuin verrokkirakenne. Syynä voi olla myös materiaalien lämmönvastusominaisuuksien arvojen määrittäminen.

Laskennallisen suhteellisen kosteuden arvot lähtivät laskemaan vasta sisälamellin kohdalla, mutta pysyivät huomattavasti todellisia arvoja korkeammalla. Harkkorakenteen kohdalla laskennallinen RH:n muoto oli jo huomattavasti samannäköisempi kuin mitattujen arvojen käyrä. Mitattujen suhteellisten kosteuden arvojen vaihtelut näyttivät realistisilta. Laskentatuloksissa kosteuden tasaantuminen näkyisi niin, että kokonaiskosteuden käyrässä näkyisi tasaantumista. Näiden rakenteiden laskennan tuloksien mukaan se ei kuitenkaan kerennyt vielä tasaantumaan.

Suhteellisen kosteuden laskennan osalta laskennan lähtöarvot tulisi tarkastaa. Todennäköisesti sisä- ja ulkopintojen SD-arvot tulisi muuttaa lähemmäksi maalaamattoman puun SD-arvoa ohjelman oletusarvon mukaisiksi. Vika voi olla myös materiaalien ominaisuuksien määrittämisessä ja suurimpana epäilyksenä onkin liiman ominaisuuksien määrittäminen oikeellisuus. Myös esimerkiksi liiman mallinnustavassa voi olla virhe, joka hidastaa kosteuden tasaantumisen rakenteessa.

Mittauspiste 2 osalta myös suljetun ilmatilan oikeellisuutta mallissa tulisi tutkia kriittisesti. Ilmatilan tuulettavuuden tasoa voisi ensiksi tarkastella vertaamalla harkosta saatuja mittaustuloksia anturin 17 tuloksiin. Tämän vertailun perusteella ilmaraon olosuhteita pystyisi todennäköisesti arvioimaan uudelleen tarkemmin.

## 11.1 Tutkitun rakenteen toiminta

Mittaustulosten mukaan lamellihirren rakenne toimii pääasiallisesti hyvin. Suhteellisen kosteuden nousua on havaittavissa ulkopinnan lamellissa keväisin. Mittaustuloksien mukaan todellista riskiä homeenkasvulle ei ole, sillä otolliset olosuhteet ovat lyhytaikaisia.

Mittauspisteen 1 seinärakenne on yksinkertainen ja virheen mahdollisuus näin ollen pieni. Rakennusaikana oikein suojattuna ja myöhemmin oikein rakennettuna yksikerroksinen materiaali toimii hyvin normaaleissa kosteusolosuhteissa, vaikka hetkellisesti altistuisikin korkeammille kosteuden vaikutuksille. Tuloksien perusteella voidaan todeta, että vaikka suhteellinen kosteus olisikin korkeammalla ajoittain, niin vauriotumista olisi havaittavissa mahdollisesti vain ulkopinnan lamellissa. Vuoden kylmät ajan jaksot taannuttavat mahdollista homeenkasvua. Vaurioitumisen mahdollisuutta voi lisätä liian tiivis pintasuojaus tai mahdollinen liimaliitoksen aiheuttama kosteuden siirtoa hidastava vaikutus.

Mittauspisteen 2 seinärakenteen toimivuudessa ei ole lamellihirren osalta suurta eroa mittauspisteen 1 toimintaan. Keskimmaisessä lamellissa on havaittavissa kuitenkin suurempia RH:n arvoja. Homeen kasvulle otollisia olosuhteita ei muodostu pitkäaikaisesti, joten vaurioitumisen riskiä ei ole. Vuoden kylmät ajanjaksot taannuttavat mahdollista homeenkasvua.

## 11.2 Suosituksia rakenteen parantamiseen

Hyvän laskentamallin luonti vaatii hyvää materiaaliominaisuuksien tuntemusta ja ymmärrystä siitä, mitä vaikutuksia valinnoilla on. Tässä laskentamallissa oli haasteellista saada RH toimimaan mitattujen arvojen kanssa samalla tavalla. Nyt suhteellinen kosteus on korkeammalla lähes koko rakenteen paksuudelta, mikä voi johtua osaltaan liimapintojen vaikutuksista. Vaikuttavana tekijänä saattaa olla myös SD-arvon määrittäminen.

Rakenteen parantamisen suunnittelua varten olisi tärkeää saada ensin toimiva laskentapohja, johon voitaisiin alkaa testaamaan rakenteen muuttamista ja siten nähdä rakenteen toimivuus. Toimivan laskentamallin avulla voitaisiin mallintaa myös rakenteiden vikasietoisuutta erilaisissa olosuhteissa. Rakenteen parantamisessa voisi ajatella olevan hyödyllistä miettiä pintakäsittelyä ja sen vaikutusta rakenteisiin. Nyt ei ole tietoa, millä pinta on käsitelty, mutta käsittelyn tulisi olla hyvin vesihöyryä läpäisevää. Suhteellinen kosteus on mitattujen arvojen mukaan korkea pintalamellissa, mikä saattaa olla seurausta liian

tiivästä pintakäsittelystä. Voi olla, että kosteus pääsee tunkeutumaan rakenteeseen jostain pintakäsittelyn epäjatkuvuuskohdasta tai rakennuksen sisäpuolelta mutta ei pääse kuivumaan ulospäin. Pintakäsittelyn vaikutus olisi hyvä testata simuloinnin avulla.

Hirsitaloissa halutaan monesti hyödyntää valmis pinta jättämällä se esiin jo kustannussyistä. Kosteuden hallinnan kannalta se ei kuitenkaan välttämättä ole järkevää. Simuloinnilla voisi tarkastella, millä tavalla rakenteen lämpö- ja kosteusominaisuudet paranisivat lisäämällä ulkopuolelle 5 cm:n paksuinen puukuitupohjainen eriste ja tuulensuoja. Entisvanhaisesti ulkovuorilaudat asennettiin hirsitaloihin, mahdollisuuksien mukaan, niin sanotuiksi uhrilaudoiksi, jotka olivat helpommin vaihdettavissa vaurioiden ilmetessä.

Jatkotyössä toimivan laskentamallin löytymisen jälkeen voisi testata, mikä vaikutus simuloinnissa olisi nähtävissä, jos pesuhuoneen seinään laitettaisiin harkon sijasta materiaali, joka on hygroskooppisempaan ja ominaisuuksiltaan lähempänä puun ominaisuuksia. Harkon voisi vaihtaa esimerkiksi savilevyyn. Toisaalta hirren epätasaisuuden vuoksi sisäisen konvektion estämiseksi suositeltavampaa olisi asentaa hirsiseinään esimerkiksi savirappaus. Rappauksen ei pitäisi aiheuttaa ongelmia painumattomien hirsirakenteiden yhteydessä.

## 12 POHDINTA

Rakennusfysiikan osaaminen on noussut tärkeään asemaan rakenteiden ongelmien kuten kosteusvaurioiden ja homeongelmien myötä. Suunnittelun tärkeänä pohjana on nykyään rakenteiden rakennusfysikaalinen käyttäytyminen. Laskentaohjelmilla tutkittavana oleva rakenne voidaan sijoittaa olosuhteiltaan samankaltaisiin oloihin ja päästä tarkastelemaan sen käyttäytymistä niissä olosuhteissa useamman vuoden ajalla. Rakenteen olosuhteita voidaan myös heikentää niin, että tiedetään, mitä rakenteessa tapahtuu, jos olosuhteet olisivatkin epäedullisemmat tulevaisuudessa.

Rakenteiden laskennallisessa simuloinnissa tärkeäksi seikaksi muodostuu materiaalien rakennusfysikaalisten ominaisuuksien tunteminen tarkasti. Tätä työtä tehdessä kävi ilmi, että materiaalien ominaisuuksien selvittämistyö ei ole helppoa, vaikka taulukoituja arvoja onkin useista tavanomaisista materiaaleista olemassa valmiina. Taulukoidut arvotkaan eivät anna tarkkoja arvoja vaan arvojen vaihteluväli on suuri. Joistakin tuotteista löytyisi tutkimuksia, mutta tutkimustuloksiin pääsy voi olla vaikeaa. Toinen todella tärkeä vaihe simuloinnin onnistumiseksi on lähtöarvojen määrittäminen. Erityisesti sisä- ja ulkopinnalle valittavilla lähtöarvoilla on tämän työn perusteella hyvin iso merkitys.

Jotta rakenteiden simuloinnissa onnistuttaisiin, niin rakenteiden käyttäytymisestä tarvittaisiin lisää todellisia tuloksia eri materiaaleilla toteutettuina, jotta päästäisiin vertailemaan niitä laskennallisiin tuloksiin. Tuloksien perusteella voitaisiin suunnitella vähemmän riskialttiita rakenteita. Rakenteita suunniteltaessa tärkeintä on miettiä niiden luotettavuutta ja vikasietoisuutta. Yhdistelemällä materiaaleja, jotka käyttäytyvät kosteuden kannalta tasaavasti, luodaan rakenteeseen pitkäaikaista varmuutta, yllättävissäkin olosuhteissa, sekä terveyden ja turvallisuuden kannalta hyvät olosuhteet. Huolestuttavaa on ollut, että rakenteiden toiminta on suunniteltu valmiiksi sähkökäyttöisten laitteiden varaan. On kuitenkin tilanteita, jolloin laitteet eivät toimi tai ne otetaan pois käytöstä kustannuksien vähentämiseksi. Mielestäni järkevämpää olisikin suunnitella rakenteet niin, että materiaalit itsessään tasaavat ympäröiviä kosteusolosuhteita sekä tarvittaessa niin, että ilmanvaihtoa voidaan tehostaa kriittisinä ajankohtina.

Suunnan muutos rakentamisessa on ollutkin valtava tämän neljän vuoden aikana, joina olen ollut opiskelijana. Nähtävillä oleva suuntaus vaikuttaa mielestäni todella hyvältä.



Luonnonmukaisten ja yksikerrosrakenteisten rakennuksien suunnittelu on lisääntynyt ja arvostus nousee sitä mukaa, kun hyvistä ominaisuuksista saadaan lisää kokemuspäistä tai tutkittua tietoa. Toivottavasti jatkotutkimukselle löytyy motivaatiota ja rahoittajia. Tutkitun tiedon perusteella saadaan lisää tietoa myös koulutustarpeisiin. Kova kysyntä osaavista suunnittelijoista näyttää olevan jo tällä hetkellä.

Tutkittavina olleet rakenteet osoittautuivat tarkasteluissa toimiviksi, vaikka laskentamallin virheen takia suhteellinen kosteus oli mitattua RH-arvoa korkeammalla koko laskennan ajan. Pientä riskiä homeen kasvulle oli havaittavissa mittaustulosten perusteella pintalammellissa keväisin, mutta homeentaantumaa voidaan kuitenkin olettaa olevan riittävää näissä lämpöolosuhteissa, jolloin vaurioitumisen riski pienenee. Kosteuden aiheuttamaa vaikutusta ulkopintaan voidaan vähentää pintakäsittelyaineilla sekä ulkokuorauksella.

Haasteellisinta tämän työn teossa oli ulkoilma- ja sisäilmatiedostojen rakentaminen mitattujen arvojen mukaan sekä työn rajaaminen, sillä aihe olisi kiinnostanut laajemminkin. WUFIN käytön ohjeeksi on saatavilla muutamia opinnäytetöitä, joiden avulla sain koottua tämän työn tekemiseen tarvittavia tietoja. Lisäksi minulla oli käytössä rakennusfysiikan sovelluksien kurssilta saamani ohjeistuksia sekä tutkin YouTubesta WUFIN käyttöä ja esimerkiksi tiedostojen siirtämisen ohjeita.

Työ oli kaikin puolin mielenkiintoinen, vaikka sisälsikin paljon tiedostojen käsittelyä ja oli välillä haastava. Mielenkiintoista olisikin saada nämä laskentamallit vastaamaan mitattuja arvoja ja löytää virhe tai virheet, jotka aiheuttivat poikkeamat käyrissä. Työ on hyvin ajan-kohtainen ja lähellä omia mielenkiinnon kohteita suunnitteluun liittyen. Koen tärkeäksi, että olen saanut oppia työn yhteydessä paljon lisää rakenteiden toiminnasta sekä WUFI-ohjelman käytöstä. Toivottavasti tästä opinnäytetyöstä on myös apua muille opiskelijoille, suunnittelijoille tai muuten asiasta kiinnostuneille.

## LÄHTEET

1. Siikanen, Unto 2014. Rakennusfysiikka. Perusteet ja sovellukset. Helsinki: Rakennustieto Oy.
2. Björkholtz, Dick 2002. Lämpö ja kosteus. Rakennusfysiikka. Helsinki: Rakennustieto Oy.
3. Siikanen, Unto 2012. Rakennusten lämpö- ja kosteustieteellisiä näkökohtia. PDF. Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/kortistot/rk/fi/index/haku.html.stx> (haku sanalla: Siikanen Unto). Hakupäivä 18.3.2020.
4. RAFNET-oppimateriaali. 2004. Kosteus. Rafnet-oppimateriaalin teoriaosan osio K (Kosteus). PDF. Saatavissa: [http://www.tekniikka.oamk.fi/~kimmoi/talrakjatko/kosteus\\_27092004.pdf](http://www.tekniikka.oamk.fi/~kimmoi/talrakjatko/kosteus_27092004.pdf). Hakupäivä 16.3.2020.
5. RIL 255-1-2014. 2014. Rakennusfysiikka 1. Rakennusfysiikallinen suunnittelu ja tutkimukset. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL.
6. Rakennusfysiikan tutkimusryhmä. Rakennusfysiikka. Tampereen Yliopisto. Saatavissa: <https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/suomalainen-homemalli/>. Hakupäivä 1.5.2020.
7. Fraunhofer IBP 2020. What is WUFI? Saatavissa: <https://wufi.de/en/software/what-is-wufi/>. Hakupäivä 12.3.2020.
8. Piesala, Pirjo 2011. Puun monet mahdollisuudet. Suomenmetsäyhdistys Ry. Saatavissa: <https://smy.fi/materiaali/puun-monet-mahdollisuudet/>. Hakupäivä 4.5.2020.
9. Usein kysytyt kysymykset. 2020 Kontiotuote Oy. Saatavissa: <https://www.kontio.com/fi-FI/ukk/estaako-lamellihirren-liimaus-hengittavyytta/>. Hakupäivä 1.5.2020.
10. Löf, Mikko 2017. Hirsirakennusten suunnittelu ja toteutus. PUUNET-koulutusmateriaali 28.9.2017.PDF. Saatavissa: <https://www.tts.fi/haku?searchterms=Hirsirakennusten+suunnittelu+ja+toteutus>. Hakupäivä 4.5.2020.

11. RT 38407. 2013. Leca perusharkot, Leca Term -harkot, Leca Design -harkot, Erikoisharkot. Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/Tarvike-tieto/pdf/38407.pdf> (vaatii käyttäjälisenssin). Hakupäivä 18.3.2020.

12. WUFI Pro 5.3. Online help 2020. WUFI-ohjelmiston sisäinen ohje.