

CLT-koetalon vaipparakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen  
toiminnan analysointi

Valtteri Pirttinen

Opinnäytetyö  
Rakennustekniikan koulutusohjelma  
Rakennustekniikan insinööri AMK  
2014

LAPIN AMMATTIKORKEAKOULU  
TEKNIikka JA LIIKENNE  
Rakennustekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyö

# **CLT-KOETALON VAIPPARAKENTEIDEN LÄMPÖ- JA KOSTEUSTEKNISEN TOIMINNAN ANALYSOINTI**

Valtteri Pirttinen

2014

Toimeksiantaja Arctic Power

Ohjaaja Kai Ryyänen

Hyväksytty \_\_\_\_\_ 2014 \_\_\_\_\_

Työ on Theseus-verkkokirjastossa

Tekniikan ja liikenne  
Rakennustekniikka

---

<b>Tekijä</b>	Valtteri Pirttinen	Vuosi	2014
<b>Toimeksiantaja</b>	Arctic Power		
<b>Työn nimi</b>	CLT-koetalon vaipparakenteiden lämpö- ja kosteusteknisentoiminnan analysointi		
<b>Sivu- ja liitemäärä</b>	68 + 12		

---

Opinnäytetyössä tutkitaan CLT-rakenteisen koetalon lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa. Tutkimusongelmina oli selvittää CLT-materiaalin lämpö- ja kosteusteknisiä ominaisuuksia ja sen rakennusfysikaalista soveltuvuutta Suomen olosuhteisiin. Näiden lisäksi työssä selvitetään rakennusfysiikan perusteita. Työssä käydään myös läpi CLT-koetaloprojekti ja sen tarkoitus.

Opinnäytetyö perustui valmistajien antamiin tietoihin CLT-levyistä sekä kanadalaisen tutkimuskeskuksen käsikirjaan. Tiedot CLT-materiaalin ja muiden koetalossa käytettävien rakennusmateriaalien rakennusfysikaalisista ominaisuuksista hankittiin oppikirjoista, Suomen rakennusmääräyskokoelmista sekä Tampereen teknillisen yliopiston julkaisemasta tutkimusraportista, jossa on määritelty rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona.

Opinnäytteessä tutkitaan laskennallisesti CLT-rakenteisen koetalon rakennusfysikaalista toimintaa Kemin alueella. Työssä myös verrataan laskennallisia tuloksia koetalon mittausdatan avulla tuotettuihin tuloksiin. Työn lopputuloksia ovat rakenteen lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan laskennallinen tarkastelu sekä mitatun datan avulla tehty tarkastelu.

Avainsanat

CLT, diffuusio, kondenssi, kastepiste

School of Technology  
Degree Programme in Civil Engineering

---

<b>Author</b>	Valtteri Pirttinen	<b>Year</b>	2014
<b>Commissioned by</b>	Arctic Power		
<b>Subject of thesis</b>	Analysis of Thermal and Hygrothermal Performance of a CLT Experimental House		
<b>Number of pages</b>	68 + 12		

---

This thesis studied thermal and hygrothermal performance of a CLT experimental house. The purpose of the study was to find out the thermal and hygrothermal characteristics of the CLT-materials and their suitability for Finnish building conditions. In addition, the project studied the criteria of building physics. The thesis also explained the CLT experimental house project and its purpose.

The thesis was based on an information provided by the manufacturers of CLT panels and a Canadian Research Company's handbook. The information about a building physics properties of a CLT material and other materials used in the test house were acquired from textbooks and the Finnish building codes. In addition, a research report published by Tampere University of Technology (TUT) was used. The report defined the physical properties of building materials as a function of temperature and relative humidity.

The thesis computationally investigated building physical activity of experimental house in Kemi. This thesis also compared the theoretical calculations to the measurement data read from the sensors installed to structures of the experimental house. The final results of this thesis were a theoretical computational analysis and an analysis done with the measurement data.

Key words

CLT, diffusion, condensation, dew point

## SISÄLTÖ

<b>KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO.....</b>	<b>1</b>
<b>1 JOHDANTO.....</b>	<b>3</b>
<b>2 CLT-KOETALO PROJEKTI .....</b>	<b>5</b>
<b>3 CLT RAKENTAMINEN.....</b>	<b>7</b>
<b>3.1 TIETOA CLT MATERIAALISTA JA SEN KÄYTTÖKOHTEISTA .....</b>	<b>7</b>
<b>3.2 CLT:N LÄMPÖ- JA KOSTEUSTEKNINEN TOIMINTA .....</b>	<b>10</b>
<b>4 RAKENNUKSEN LÄMPÖTEKNINEN TOIMINTA .....</b>	<b>15</b>
<b>4.1 LÄMMÖN SIIRTYMINEN.....</b>	<b>15</b>
<b>4.2 U-ARVO .....</b>	<b>16</b>
<i>4.2.1 Määritelmä ja käytettävät arvot .....</i>	<i>16</i>
<i>4.2.2 Laskenta.....</i>	<i>17</i>
<i>4.2.3 U-arvo vaatimukset eri tiloille .....</i>	<i>19</i>
<b>5 RAKENNUKSEN KOSTEUSTEKNINEN TOIMINTA.....</b>	<b>21</b>
<b>5.1 TIETOA KOSTEUSTEESTA RAKENNUKSISSA.....</b>	<b>21</b>
<b>5.2 ILMAN KOSTEUS .....</b>	<b>22</b>
<b>5.3 KOSTEUDEN SIIRTYMINEN RAKENTEISSA.....</b>	<b>25</b>
<i>5.3.1 Diffuusio .....</i>	<i>25</i>
<i>5.3.2 Konvektio .....</i>	<i>28</i>
<i>5.3.3 Kondenssi .....</i>	<i>28</i>
<i>5.3.4 Diffuusion kondenssi.....</i>	<i>29</i>
<b>5.4 HOMEMALLI.....</b>	<b>33</b>
<b>6 MITTAUSLAITTEISTO JA MITTAUSTEN TUOTTO.....</b>	<b>38</b>

<b>6.1 MITTAUSLAITTEISTO</b> .....	<b>38</b>
<b>6.2 TUTKIMUSASETELMA</b> .....	<b>39</b>
<b>6.3 MITTAUSSEKTORIT</b> .....	<b>41</b>
6.3.1 <i>Ulkoseinärakenne US1</i> .....	41
6.3.2 <i>Ulkoseinärakenne US2</i> .....	42
6.3.3 <i>Yläpohjarakenne YP1</i> .....	43
6.3.4 <i>Alapohjarakenne AP1</i> .....	44
<b>7 CLT-KOETALON LÄMPÖ- JA KOSTEUSTEKNISET LASKUT</b> .....	<b>45</b>
<b>7.1 KOSTEUSTEKNISISSÄ LASKUISSA KÄYTETTÄVÄT SUUREET</b> ....	<b>45</b>
<b>7.2 ULKOSEINÄRAKENNE US1</b> .....	<b>48</b>
<b>7.3 ULKOSEINÄRAKENNE US2</b> .....	<b>49</b>
<b>7.4 YLÄPOHJARAKENNE YP</b> .....	<b>50</b>
<b>7.5 ALAPOHJARAKENNE AP</b> .....	<b>51</b>
<b>8 CLT – KOETALON TULOSTEN ANALYYSI</b> .....	<b>52</b>
<b>8.1 MITTAUSOLOSUHTEET JA TULOSTEN VERRANNOLLISUUS</b> .....	<b>52</b>
<b>8.2 ULKOSEINÄRAKENNE US1</b> .....	<b>53</b>
<b>8.3 ULKOSEINÄRAKENNE US2</b> .....	<b>54</b>
<b>8.4 YLÄPOHJARAKENNE YP</b> .....	<b>55</b>
<b>8.5 ALAPOHJARAKENNE AP</b> .....	<b>56</b>
<b>9 JOHTOPÄÄTÖKSET</b> .....	<b>57</b>
<b>LÄHTEET</b> .....	<b>59</b>
<b>LIITTEET</b> .....	<b>62</b>

## KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

KUVIO 1. CLT-KOETALON 3D-LUONNOS (VATANEN 2013) .....	5
KUVIO 2. CLT-LEVY (DIGIPOLIS OY 2011) .....	7
KUVIO 3. ASENNUSVALMIS CLT-ELEMENTTI (STORA ENSO OY 2012) .....	8
KUVIO 4. RAKENNUSMATERIAALIEN VALMISTUKSEN AIHEUTTAMA LUONNONVAROJEN KULUTUS (TOLPPANEN– KARJALAINEN–LAHTELA–VILJAKAINEN 2013, 130).....	9
KUVIO 5. RAKENNUSMATERIAALIEN VALMISTUKISEN AIHEUTTAMAT HIILIDIOKSIDIPÄÄSTÖT (TOLPPANEN–KARJALAINEN– LAHTELA–VILJAKAINEN 2013, 131).....	10
KUVIO 6. SORPTIOKÄYRÄ (RAFNET-RYHMÄ 2004).....	11
KUVIO 7. RAKENNUSAINEIDEN SORPTIOKÄYRIÄ (RAFNET-RYHMÄ 2004) .....	12
KUVIO 8. RAKENNUKSEN YLEISIÄ KOSTEUDEN LÄHTEITÄ (RAKENNUSTIETO 1999).....	21
KUVIO 9. KYLLÄSTYSVESIHÖYRYPITOISUUS LÄMPÖTILAN FUNKTIONA (RAFNET-RYHMÄ 2004).....	23
KUVIO 10. VESIHÖYRYN SIIRTYMINEN DIFFUUSIOILLA (STYF 2009) .....	26
KUVIO 11. KOSTEUDEN KONVEKTIO (STYF 2009) .....	28
KUVIO 12. LÄMPÖTILA- JA KOSTEUSJAKAUMA HOMOGEENISESSÄ SEINÄSSÄ (RAFNET-RYHMÄ 2004) .....	31
KUVIO 13. HOMEEN KASVULLE SUOSIOLLISET KOSTEUS- JA LÄMPÖTILAOLOT MATEMAATTISENA MALLINA (KOKKO– OJANEN–SALONVAARA–HUKKA–VIITANEN 1999, 38).....	35
KUVIO 14 MITTAUS- JA TIEDONKERUUJÄRJESTELMÄN TOIMINTAPERIAATE. (AUTIONIEMI 2013).....	38
KUVIO 15. CLT-KOETALON POHJOIS-SEINÄN VAIPPARAKENTEIDEN MITTAUSSEKTORIT (VATANEN 2013) .....	39
KUVIO 16. CLT-KOETALON ETELÄ-SEINÄN VAIPPARAKENTEIDEN MITTAUSSEKTORIT (VATANEN 2013) .....	40
KUVIO 17 US1 MITTAUSPISTEET JA RAKENNE (VATANEN 2013).....	41
KUVIO 18 US2 MITTAUSPISTEET JA RAKENNE (VATANEN 2013).....	42

KUVIO 19 YP1 MITTAUSPISTEET JA RAKENNE (VATANEN 2013) .....	43
KUVIO 20 AP1 MITTAUSPISTEET JA RAKENNE (VATANEN 2013) .....	44
KUVIO 21 LÄMPÖTILA, KYLLÄSTYS- JA OSAPAINI US1-RAKENTEESTA .....	48
KUVIO 22 LÄMPÖTILA, KYLLÄSTYS- JA OSAPAINI US2-RAKENTEESTA .....	49
KUVIO 23 LÄMPÖTILA, KYLLÄSTYS- JA OSAPAINI YP-RAKENTEESTA .....	50
KUVIO 24 LÄMPÖTILA, KYLLÄSTYS- JA OSAPAINI AP-RAKENTEESTA .....	51
KUVIO 25 LÄMPÖTILA, KYLLÄSTYS- JA OSAPAINI MITATULLA DATALLA US1-RAKENTEESTA .....	53
KUVIO 26 LÄMPÖTILA, KYLLÄSTYS- JA OSAPAINI MITATULLA DATALLA US2-RAKENTEESTA .....	54
KUVIO 27 LÄMPÖTILA, KYLLÄSTYS- JA OSAPAINI MITATULLA DATALLA YP-RAKENTEESTA .....	55
KUVIO 28 LÄMPÖTILA, KYLLÄSTYS- JA OSAPAINI MITATULLA DATALLA AP-RAKENTEESTA .....	56
TAULUKKO 1. SISÄ- JA ULKOPUOLINEN PINTAVASTUS $R_{Si}$ JA $R_{Se}$ (YMPÄRISTÖMINISTERIÖ 2003 RAKMK C4) .....	19
TAULUKKO 2. ILMAN KYLLÄSTYSVESIHÖYRYPITOISUUS JA KYLLÄSTYSOSAPAINI LÄMPÖTILAN FUNKTIONA (RAFNET-RYHMÄ 2004) .....	24
TAULUKKO 3. HOMEINDEKSI (VTT 2011A) .....	34
TAULUKKO 4. RAKENNUSMATERIAALIEN HOMEHTUMISHERKKYYSLUOKAT (VTT 2011A) .....	36
TAULUKKO 5. HOMEEN KASVUN TAANTUMALUOKAT (VTT 2011A) .....	36
TAULUKKO 6 ILMANPAINI- JA LÄMPÖTILA TILASTOT (AALTO-KARLSSON-KAUKORANTA-PIRINEN-RUUHELA-SIMOLA 2012 48-49) .....	45
TAULUKKO 7 SUHTEELLINEN KOSTEUS, SÄDEMÄÄRÄ, SADEPÄIVÄT JA LUMENSYVYYS TILASTOT (AALTO-KARLSSON-KAUKORANTA-PIRINEN-RUUHELA-SIMOLA 2012 48-49) .....	46



## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön taustana on CLT-rakentamisen kasvava kiinnostus niin Euroopassa kuin Pohjois-Amerikassakin. Stora Enso on tuonut CLT-rakentamisen myös Suomeen, mutta elementtien valmistus tapahtuu vielä nykyisellään Itävallan tehtailla. CLT-rakenteiden toimivuudesta Suomen olosuhteissa tarvitaan lisää tietoa, ennen kuin Suomeen saadaan myös CLT-tehdasinvestointeja. Tähän tarpeeseen pyritään CLT-koetaloprojektin avulla vastaamaan.

Opinnäytetyön tilaajana toimii Arctic Power, joka on Lapin ammattikorkeakoulun alainen yksikkö, jonka toiminta on keskittynyt talvi- ja kylmätekniikan kehittämiseen. Arctic Powerilla on lukuisia eri hankkeita ja hanketoiminta on koko yksikön kannalta erittäin merkittävä osa sen toimintaa. Hanketoiminnan lisäksi Arctic Power tarjoaa palveluitaan yrityksille. Palvelutoiminta on keskittynyt testaustoimintaan, sillä Arctic Powerin laboratorion tilat ja laitteet ovat nykyaikaisia sekä monipuolisia. (Arctic Power 2014 a; Arctic Power 2014 b.)

Opinnäytetyön tarkoituksena on käsitellä CLT-runkoisen koetalon rakennusfysikaalista toimintaa ja sen soveltamista suomalaiseen rakentamiseen. Laskennallinen rakennusfysikaalinen tarkastelu tehtiin ilmatieteen laitoksen Kemi-Tornion lentoaseman mitattujen olosuhteiden tammi- ja helmikuun keskiarvoilla, joita verrataan koetalosta saatuun vuoden 2014 tammi- ja helmikuun mittausdataan. Työ on rajattu koskemaan vuoden 2014 tammikuun ja helmikuun olosuhteita.

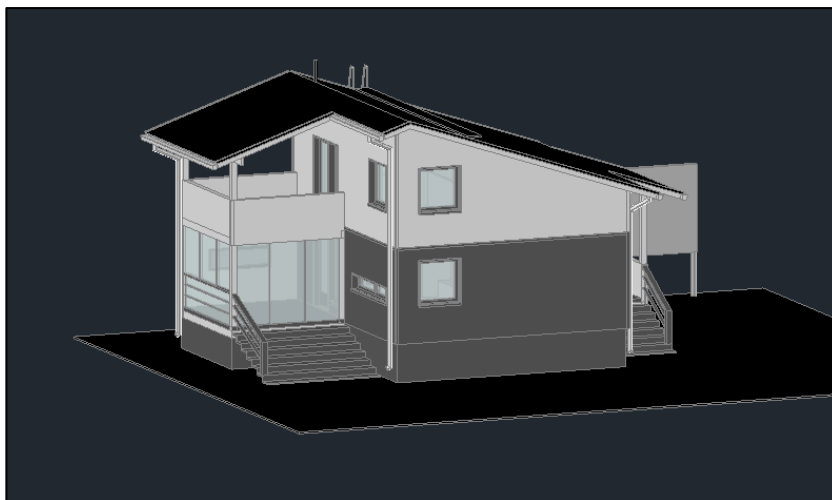
Vastaavanlaisia koetalo tutkimushankkeita on Suomessa tehty lukuisia. CLT-koetalo on kuitenkin ensimmäinen koetalo, jossa tutkitaan CLT-rakenteiden rakennusfysikaalista toimintaa käytännön olosuhteissa Suomessa. Suomalaisessa tutkimuksessa CLT-rakenteiden rakennusfysikaalista toimivuutta on aiemmin selvitetty mm. VTT:n tutkimusselostuksessa vuodelta 2011. Selvityksessä tehtiin rakenteen tarkasteluita laskentaohjelmiston avulla. Tutkimuksessa saatujen tulosten perusteella voidaan todeta, että tuuletettujen CLT-elementtirakenteiden kosteustekninen toimintavarmuus on Suomen ilmastossa ja normaalissa asuinkäytössä olevan rakennuksen kuivien sisätilo-

jen kosteuskuormituksella yhtä hyvä tai osin jopa parempi verrattaessa puurankarakenteisiin. (VTT 2011 b.)

Opinnäytetyön viidessä ensimmäisessä kappaleessa esitellään työn tarkoitukset, CLT-materiaali sekä rakennusfysiikan perusteoriaa. Näiden jälkeen esitellään CLT-koetalo mittauspisteinen. Kappaleessa seitsemän esitellään laskennallisesti tekemäni tarkastelu CLT-rakenteiden rakennusfysikaalisesta toimivuudesta. Tämän jälkeen esitellään mittausdatan avulla tuottamani kuvat rakenteen toiminnasta. Työn lopussa pohditaan tulosten luotettavuutta, verrannollisuutta ja mahdollisia jatkotoimenpiteitä.

## 2 CLT-KOETALO PROJEKTI

CLT-koetaloprojekti on Euroopan aluekehitysrahaston (EAKR) osittain rahoittama projekti, jonka rahoittajaviranomaisena toimii Lapin Liitto. Projektin muita rahoittajia ovat Ammattiopisto Lappia, Digipolis Oy, Lapin ammattikorkeakoulu, Lapin muut kunnat, Kemi-Tornio alueen kehittämiskeskus ja yritykset ja yhteisöt. Projekti on kehittämis- ja investointihanke, joka kohdistuu EAKR-toimintalinjaan 2. (Vatanen 2013.)



Kuvio 1. CLT-koetalon 3D-luonnos (Vatanen 2013)

CLT-koetaloprojektissa toteutettava rakennus on pohjan pinta-alaltaan 40 m<sup>2</sup> kokoinen kuvion 1 mukainen 1 ½ -kerroksinen pientalo. Rakennus sijaitsee Kemissä Digipolis-kampuksen alueella. Koetalon runkorakenteet toteutetaan pääosin CLT-levyistä toteutettuina elementteinä (seinärakenteet, ala-, ylä- ja välipohjat) tai elementtien ja puupalkistojen yhdistelmä rakenteina. (Vatanen 2013.)

CLT-koetaloprojektissa toteutettavan rakennusfysikaalisen tutkimuksen tarkoituksena on täydentää sitä kuvaa, mikä CLT-rakentamisesta on jo tähän mennessä tutkimuksellisin keinoin selvitetty. Koetalossa tehtävä kenttätutkimus sopii laskennallisten tarkasteluiden lisäksi todentamaan rakenteiden toimivuutta todellisissa olosuhteissa. Lämpö- ja kosteusteknisen toimivuuden lisäksi CLT-koetaloprojektin tutkimusasetelmassa selvitetään useita muita

CLT-rakentamiseen liittyviä aiheita, kuten paukemelu-, ääneneristävyys-  
värähtely- ja taipumamittaukset. (Vatanen 2013.)

### 3 CLT RAKENTAMINEN

#### 3.1 TIETOA CLT MATERIAALISTA JA SEN KÄYTTÖKOHTEISTA

CLT (Cross Laminated Timber)-levy on massiivipuinen rakennuslevy (kuvio 2), joka koostuu toisiinsa nähden ristiin laminoituista lautakerroksista. Näitä eri paksuisia lautakerroksia eli lamelleja voi yhdessä CLT-levyssä olla kolme, viisi, seitsemän tai useampia. Lamellit ovat yleensä valmistettu kuusesta, mutta niitä on myös mahdollista saada männystä ja lehtikuusesta tehtynä. Lamellien liimauksessa käytetään formaldehydittömiä liimoja, niiden ympäristöystävällisyyden vuoksi. Lamellien ristiinlaminointi takaa CLT-levyn lujuuden ja muodonsapitävyyden. Tämän vuoksi rakenteessa ei juuri tapahdu painumista ja kosteuseläminen on vähäistä (Stora Enso, Building Solutions 2012.)



Kuvio 2. CLT-levy (Digipolis Oy 2011)

CLT-tuotteita voidaan valmistaa levyinä, joiden suurin koko on 2,95 x 16 m ja paksuus enintään 400 mm. Levyjen suuri koko mahdollistaa nopean rakentamisen ja minimoi levyjen välisten puskuliitosten määrän. Liitospintojen pieni määrä parantaa huomattavasti rakenteen ilmatiiveyttä. CLT-massiivipuulevyistä voidaan tehdä kaikki rakennuksen maanpäälliset kantavat rakenteet. CLT-rakenteet käyvät niin seiniin, välipohjiin kuin kattoihinkin. Välipohjarakenteena käytettäessä maksimijänneväli on käytännössä 6 m johtuen Suomessa käytettävistä mitoitus värähtelykriteereistä. Kattorakenteissa sen sijaan voi olla pidempiäkin jännevälejä. CLT-levy toimii sekä kantavana että jäykistävänä rakenteena yhtä aikaa, jolloin erillistä jäykistävää rakennetta ei tarvita. (Tolppanen–Karjalainen–Lahtela–Viljakainen 2013, 44, 88.)

CLT:ssä kantavana rakenteena toimiva puu voidaan jättää joko näkyviin tai se voidaan peittää. Äänitekniset seikat ja palomääräykset vaativat useimmissa tapauksissa kuitenkin suojalevytystä. Toiminnallisella palomitoituksella perustellen suojalevytys voidaan kuitenkin tapauskohtaisesti jättää pois, jolloin CLT-levy voidaan laadultaan tehdä myös pintaverhouksiin sopivaksi ja jättää näkyviin. (Tolppanen–Karjalainen–Lahtela–Viljakainen 2013, 45.)

CLT-levyjä valmistavaa tehdasta ei vielä ole Suomessa, vaan lähin CLT-tehdas löytyy Itävallassa. Stora Ensolla on kuitenkin Suomessa kaksi tehdasta, joissa se valmistaa CLT- elementtejä. Stora Enson Pälkäneen yksikössä valmistetaan esivalmistettuja suurelementtejä eli CLT-elementtejä ja Hartolan yksikössä valmistetaan puurakenteisia tilaelementtejä. (Puuinfo 2013.)

Elementtitehtaalla CLT-elementteihin tehdään CNC-työstökoneella mahdolliset ikkuna- ja oviaukot sekä elementtiliitosten ja LVIS-asennusten vaatimat työstöt. CLT-elementteihin voidaan asentaa tarpeen mukaan tehtaalla valmiiksi pintamateriaalit, eristeet, ikkunat ja ovet, jolloin rakentaminen työmaalla nopeutuu huomattavasti (Stora Enso, Building Solutions 2012; Puuinfo 2013.) CLT- elementtien toimitus voi myös sisältää niiden asennuksen asiakkaan tahtoa (Tolppanen–Karjalainen–Lahtela–Viljakainen 2013, 455). Kuviossa 3 esitetään esimerkki asennusvalmiista CLT-elementistä.

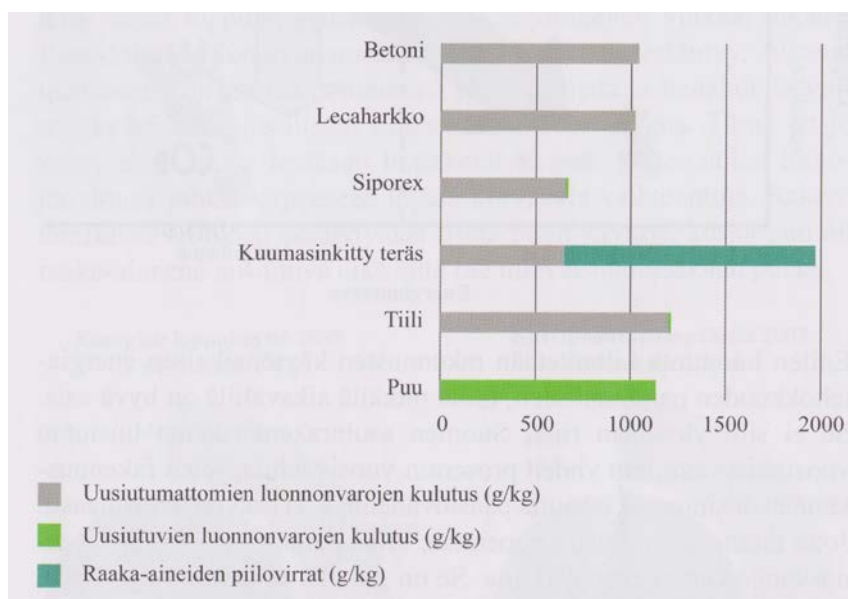


Kuvio 3. Asennusvalmis CLT-elementti (Stora Enso Oy 2012)

CLT:n käytön kannalta hyviä ominaisuuksia ovat muun muassa suhteellisen lyhyt pystytysaika, rakenteen keveys, työstettävyys työmaalla, helppo tiiviiden

liittymien toteutus ja talvirakentaminen. Edellä mainittujen ominaisuuksiensa vuoksi CLT-rakenteisen talon runko voidaan parhaimmillaan pystyttää yhdessä päivässä. Asentamisen nopeus luo hyvät edellytykset talvirakentamiselle, koska tarvittavan suojauksen määrä on huomattavasti pienempi. Verrattaessa esimerkiksi betonirakentamiseen on CLT-elementtien etuna myös se, että niitä ei tarvitse pitää lämpiminä jäätyminen ehkäisemiseksi. (Puuinfo 2013.)

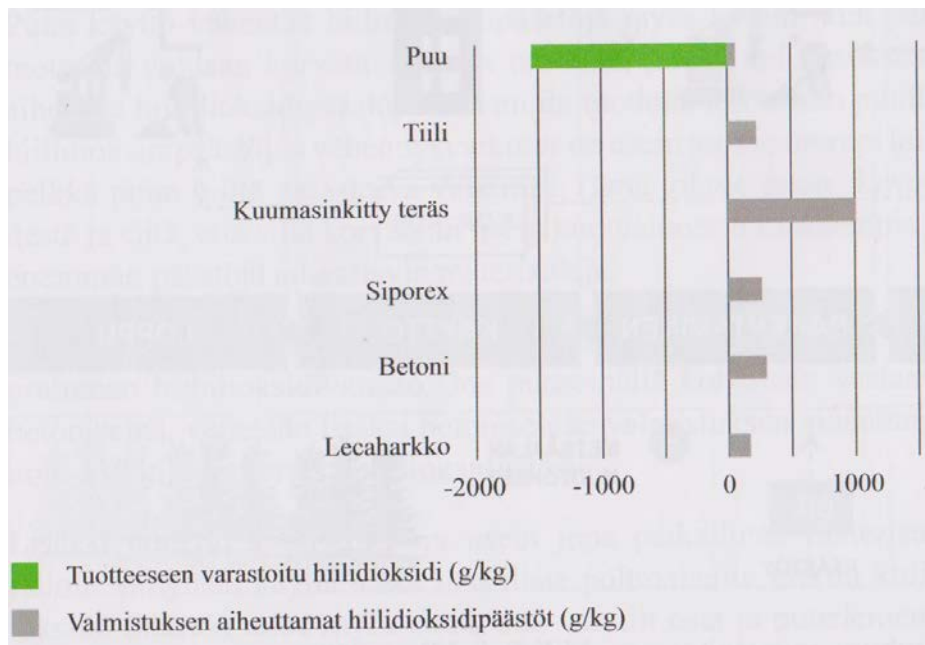
Ympäristöystävällisyys ja ekologisuus ovat myös CLT-rakentamisen etuja. Puupohjaisten rakennusmateriaalien käytöllä voidaan huomattavasti vähentää uusiutumattomien luonnonvarojen kulutusta, rakentamisen ja rakennustuotteiden valmistuksen aiheuttamia hiilidioksidipäästöjä ja ympäristöhaittoja sekä energiankulutusta. (Tolppanen–Karjalainen–Lahtela–Viljakainen 2013, 130.) Kuviossa 4 on vertailtu puun ja muiden yleisten rakennusmateriaalien valmistuksen uusiutumattomien ja uusiutuvien luonnonvarojen kulutusta.



Kuvio 4. Rakennusmateriaalien valmistuksen aiheuttama luonnonvarojen kulutus (Tolppanen–Karjalainen–Lahtela–Viljakainen 2013, 130)

Eri rakennusmateriaaleja verrattaessa keskenään huomataan, että puun hiilijalanjälki on huomattavasti pienempi. Hiilijalanjäljellä tarkoitetaan rakennusaineen aiheuttamaa ilmastokuormaa eli sitä, kuinka paljon kasvihuonekaasuja rakennusaineen valmistuksen ja elinkaaren käytön aikana muodostuu.

(Tolppanen–Karjalainen–Lahtela–Viljakainen 2013, 130.) Seuraavassa kuviossa on verrattu rakennusmateriaalien valmistuksessa aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä.



Kuvio 5. Rakennusmateriaalien valmistuksen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt (Tolppanen–Karjalainen–Lahtela–Viljakainen 2013, 131)

### 3.2 CLT:N LÄMPÖ- JA KOSTEUSTEKNINEN TOIMINTA

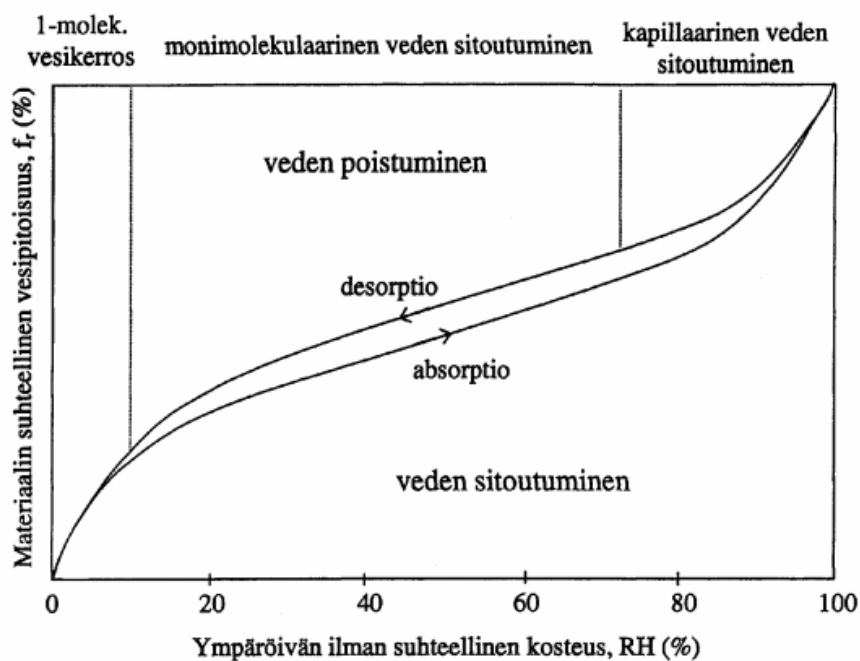
CLT-levyn lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet ovat melkein samanlaiset kuin puulla. Puun lämmönjohtavuus [W/mK] riippuu enimmäkseen sen tilavuuspainosta ja kosteuspitoisuudesta. CLT:n lämmönjohtavuuden arvoksi eli lambda-arvoksi on määritetty 0,11–0,13 W/mK Itävaltalaisissa standardeissa. (Stora Enso, Building Solutions 2012.) CLT toimii rakenteessa omalta osaltaan myös lämmöneristeenä matalan lämmönjohtavuutensa vuoksi. Tässä työssä käytetään CLT:n laskennallisena lämmönjohtavuuden lambda-arvona  $\lambda=0,11$  W/mK.

Puun ja puupohjaisten rakennusmateriaalien yksi tärkeimmistä ominaisuuksista on sen **hygroσκοoppisuus**. Hygroσκοoppiset rakennusmateriaalit sitovat itseensä ilman kosteutta tai luovuttavat sitä, kun ilman suhteellinen kosteus materiaalin ympärillä muuttuu (Kokko – Ojanen – Salonvaara – Hukka – Viitanen 1999, 154). Niin sanottu hygroσκοoppinen tasapainokosteus on saa-

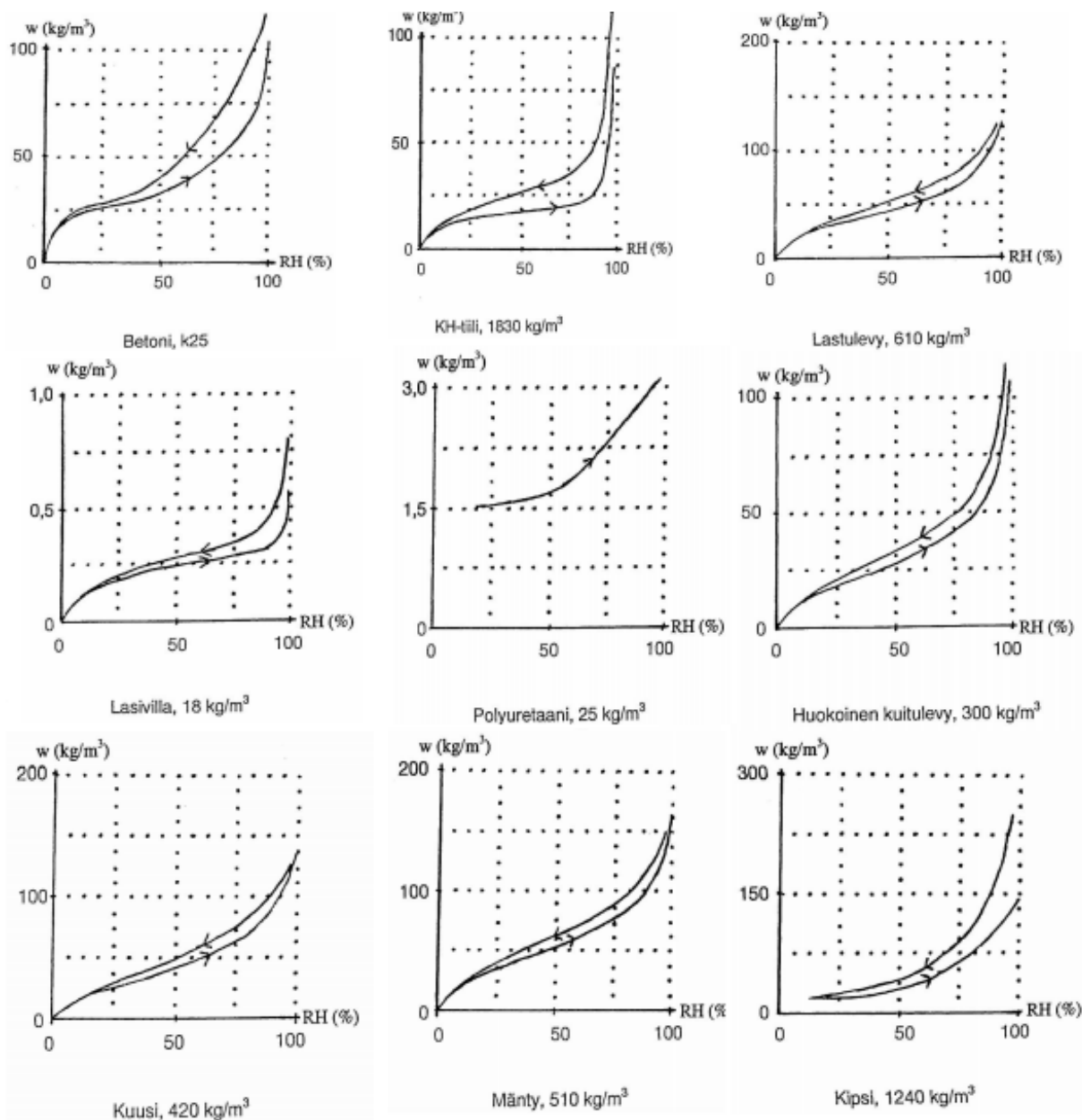


vutettu, kun aineen huokosissa olevan ilman suhteellinen kosteus on asettu-  
nut samaan arvoon kuin ympäröivän ilman suhteellinen kosteus. Tämän suu-  
ruus on erilainen aineesta riippuen (Björkholtz 1997, 60). Hygroskooppisen  
tasapainokosteuden on mahdollista vaihdella samalla aineella ympäröivän  
ilman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan funktiona sekä riippuen siitä, onko  
tasapainokosteus saavutettu kostumisen (absorptio) vai kuivumisen (desorp-  
tion) kautta. (Rafnet-ryhmä 2004.)

Ympäröivän ilman ja aineen kosteuden välille asettuu tasapaino, jota kuvaa  
alla olevan kuvion mukainen aineelle ominainen sorptio- eli tasapainokäyrä.  
(Rafnet-ryhmä 2004.)



Kuvio 6. Sorptiokäyrä (Rafnet-ryhmä 2004)



Kuvio 7. Rakennusaineiden sorptiokäyriä (Rafnet-ryhmä 2004)

Kuten yllä olevista käyristä (kuvio 7) huomataan, vaihtelee hygroskooppisuus laajasti eri aineiden kesken. Puupohjaisilla aineilla hygroskooppisuus on suurin ja mineraalivilloilla lähes olematon. (Björkholtz 1997, 60.)

VTT:n tekemässä tutkimuksessa Puurakenteiden kosteustekninen toiminta (1999), käsitellään muun muassa hygroskooppisten materiaalien vaikutusta

sisäilmaan. Tutkimuksessa on todettu, että huoneilman kanssa vuorovaikutuksessa oleva rakennuspuu ja puupohjaiset rakennusmateriaalit vaimentavat tehokkaasti huoneilman suhteellisen kosteuden muutoksia vesihöyryn tuoton vaihdellessa huoneessa. Vesihöyryn ajoittaisella sitoutumisella hygroskooppiseen materiaaliin on merkitystä varsinkin hellejaksojen aikana, kun ulkoilman vesihöyrypitoisuus ja sisäilman suhteellinen kosteus ovat luonnostaan korkealla. Huonetilassa, jossa ilman kosteuden lähtötaso on korkea tai ilmanvaihto on puutteellinen, on aktiivinen huoneilman kanssa vuorovaikutuksessa oleva hygroskooppinen massa merkittävä mukavuustekijä. Tämä ilmiö on tärkeä myös CLT-rakenteiden markkinoinnin näkökulmasta, kun kohdemaassa on lämpimiä ja kosteita sääjaksoja. (Kokko–Ojanen–Salonvaara–Hukka–Viitanen 1999, 147.)

Puulla on keveydestä huolimatta hyvä lämpökapasiteetti [C] eli **terminen massa**. Tällä tarkoitetaan kappaleen kykyä sitoa ja luovuttaa lämpöä. Rakenteiden lämpökapasiteetin merkitys perustuu siihen, että rakenteet, jotka omaavat suuren lämpökapasiteetin, pystyvät varastoimaan itseensä suoraa auringon lämpösäteilyä tai huonetilan tilapäisiä ”ylilämpöjä” (ihmiset, koneet, auringonlämpö yms.) ja pienentämään näin huoneilman lämmönousua. Rakennuksen sisälämpötilan laskiessa materiaalit luovuttavat varastoimaansa lämpöä ja tasaavat siten pitkällä aikavälillä huoneen lämpötilaa. (Siikanen 2008, 137.)

CLT-levyjen valmistamisessa käytettävän ristiinliimauksen vuoksi niiden ilmatiiveys on hyvä. CLT-levyn ilmatiiveys parantaa omalta osaltaan myös sen lämmöneristävyttä. Itävaltalainen Holzforschung Austria on tutkinut CLT-levyjen tiiveyttä vuonna 2008. Testiraportista selviää, että levyjen väliset liitokset sekä itse CLT-levyt ovat niin ilmatiiviitä, ettei ilmavirtausta pystytty mittaamaan. Näiden tutkimustulosten perusteella voidaan todeta, että erillistä ilman- ja höyrynsulkukerrosta ei tarvita CLT-rakentamisessa. (Stora Enso, Building Solutions 2012.) CLT-levyn matalan lämmönjohtavuuden, massiivisuuden ja hyvän ilmatiiveyden vuoksi, CLT-elementtien lämmöneristeeksi riittää yleensä muita runkotyyppejä jonkin verran ohuempi kerros (Tolppanen–Karjalainen–Lahtela–Viljakainen 2013, 44; FPInnovations 2012, Enclousure 10).

Rakennuksen vaipparakenteen ilmatiiveyttä kuvataan ilmanvuotoluvulla. Rakennuksen ulkovaipan ilmanvuotoluku (1/h) on luku, joka ilmaisee ulkovaipan läpi virtaavan ilmamäärän tunnissa jaettuna sisäilmatilavuudella, kun ulko- ja sisäilman paine-ero on 50 Pa. (Ympäristöministeriö 2010 RakMk D3.) CLT-rakenteita käyttämällä saadaan rakennuksen vaipan ilmanvuotoluku vastamaan passiivitalon vaatimusta 0,6. Kuitenkin tähän raja-arvoon yltäminen vaatii CLT-levyjen saumojen huolellista asennusta. Liitoksien ilmatiiveys voidaan varmistaa käyttämällä saumateippiä. Saumateippi voidaan kiinnittää liitoksien saumoihin levyjen ulko- tai sisäpinnoille. Liitoksien tiivistämiseksi saumanauhojen lisäksi voidaan käyttää joustavia saumamassoja. (Stora Enso, Building Solutions 2012.)

Lämmöneristeen paikaksi suositellaan CLT-levyn ulkopuolta. Lämmöneriste pitää puun vakiolämpöisenä, sisäilman sopivan kuivana ja suojaaa sitä kosteusvahingoilta. CLT-rakenteiden eristeeksi suositellaan hengittäviä ja ilmaa läpi päästäviä eristeitä kuten puukuitueristeet, sillä hygroskooppisten ominaisuuksiensa vuoksi CLT luovuttaa ja sitoo kosteutta itseensä. XPS- ja EPS-eristeiden käyttöä ei suositella, koska niiden vesihöyrynläpäisevyys on suhteellisen pieni ja tämän vuoksi CLT-rakenteeseen voisi tulla kaksinkertainen höyrynsulku ja kosteutta voisi jäädä CLT-levyyn loukkuun. (FPInnovations 2012, Enclousure 10.)

## 4 RAKENNUKSEN LÄMPÖTEKNINEN TOIMINTA

### 4.1 LÄMMÖN SIIRTYMINEN

Lämpö siirtyy materiaalissa johtumalla, säteilemällä ja konvektiolla. Lämmön johtuminen on rakenteissa tapahtuvista lämmönsiirtymisilmiöistä keskeisin. Johtumisessa molekyylien liike-energiaa siirtyy molekyylistä toiseen aineen sisällä. Siirtymisen vuoksi puhutaan lämmönvirtauksesta. Lämmön olemukseen kuuluu, että se pyrkii tasoittumaan aineen sisällä suuremmasta pienempään. Eri aineilla on eri lämmönjohtavuusarvot eli  $\lambda$ -arvot. (Björkholtz 1997, 12; Vahanen Oy.)

Rakenteiden pinnoista lämpö siirtyy säteilemällä. Energia siirtyy säteilyssä sähkömagneettisen aaltoliikkeen välityksellä valon nopeudella. Kaikki aineet ja kappaleet, joiden lämpötila on absoluuttisen nollapisteen yläpuolella emittoivat eli lähettävät lämpösäteilyä. Lämpö siirtyy parhaiten säteilemässä tyhjiössä, jossa ei ole mitään väliainetta, joka sitoisi lämpösäteilyä. Kuten johtumisessakin, on säteilyssä eri materiaaleilla eriävät säteilyarvot eli emissiviteetti-arvot. Säteilyn osuessa pintaan, se osittain heijastuu, osittain absorboituu. Valoa läpäisevissä pinnoissa kuten lasi, osa säteilystä menee pinnan läpi. (Björkholtz 1997, 13; Vahanen Oy.)

Konvektiolla tarkoitetaan lämpövirtausta nesteessä tai kaasussa. Konvektio voi olla joko luonnollista tai pakotettua. Luonnollisessa konvektiossa kaasu tai neste liikkuu lämpötilaerojen aiheuttamista tiheyseroista, pakotetussa konvektiossa taas jonkin ulkopuolisen voiman vaikutuksesta. Puhtaasti luonnollista konvektiota esiintyy rakenteissa harvoin. Kyse on yleensä luonnollisen ja pakotetun konvektion yhdistelmästä. Rakennuksen sisätiloissa pakotettuja virtauksia saavat aikaan mm. ilmanvaihdon puhaltimet ja ihmisten liikkeet kun taas rakennuksen ulkopuolella on tuuli ensisijainen pakotetun konvektion aikaansaaja. (Björkholtz 1997, 13.)

## 4.2 U-ARVO

### 4.2.1 Määritelmä ja käytettävät arvot

Lämmönläpäisykerroin eli U-arvo kuvaa sitä lämpövirtaa, joka kulkee  $1\text{m}^2$ -kokoisen rakenteen osan läpi lämpötilaeron ollessa  $1\text{ }^\circ\text{C}$  ( $=1\text{ K}$ ). Todellisissa rakenteissa U-arvo ei pysy vakiona vaan se vaihtelee olosuhteiden muuttuessa. Esimerkiksi seinän kostuessa U-arvo heikkenee ja kuivuessa se paranee. Kuormituksen alla oleva lämmöneristys voi iän myötä painua hiukan kokoon samalla heikentäen rakenteen U-arvoa. U-arvo kuvaa tehdyn rakenteen keskimääräistä kykyä vastustaa lämmönkulkua koko rakenteen käyttöajan. (Björkholtz 1997, 14.)

Rakennusosan U-arvon laskelmissa käytetään rakennusaineiden normaalisia lämmönjohtavuusarvoja ( $\lambda_n$ ), joissa on jo huomioitu kosteuden ja vastaavien tekijöiden aiheuttamat lisät. Käytettäessä  $\lambda_n$ -arvoja on huomioitava, että samalla rakennusaineella on useita  $\lambda_n$ -arvoja johtuen muun muassa käyttöta-voista. Saman rakennusaineen kosteuspitoisuus voi olla erilainen eri käyttökohteissa, konvektiovirtaukset vaikuttavat eri tavalla riippuen siitä, miten aine on näitä vastaan suojattu. Toinen suuresti vaikuttava tekijä on se, että samannimistä rakennusainetta valmistetaan eri tilavuuspainoisina, jolloin itse laboratorioissa mitattu materiaaliominaisuus  $\lambda_{10}$  on erilainen. (Björkholtz 1997, 14.)

CE-merkittyjen rakennusosien U-arvon määrittämiseen voidaan käyttää myös lambda declared arvoja ( $\lambda_{\text{Declared}}$ ) ja lambda design arvoja ( $\lambda_{\text{Design}}$ ). CE-merkinnällä varustetun lämmöneristeen lämmönjohtavuuden suunnitteluarvona käytetään EN-standardeilla määritettyä lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoa  $\lambda_{\text{Design}}$ . (Ympäristöministeriö 2010 RakMk C3.)  $\lambda_{\text{Declared}}$ - arvo on CE-merkityn tuotteen valmistajan ilmoittama eristävyysarvo, jossa ei oteta huomioon tuotteen ilmanläpäisevyyden ja asennus- ja suojaustapojen vaikutusta. U-arvoa laskettaessa CE-merkityillä rakennustuotteilla tulee käyttää  $\lambda_{\text{Design}}$ - arvoa, johon on lisätty edellä mainittujen tekijöiden vaikutukset. (Siikanen 2008, 134.) Rakennustuotteiden CE-merkinnällä valmistaja ilmoittaa tuotteen ominaisuudet yhdenmukaisella eurooppalaisella tavalla.

Rakennustuotteen CE-merkintä on keino osoittaa tuotteen ominaisuudet siten, että tuotteen voi laittaa markkinoille kaikissa Euroopan talousalueen maissa. (Suomen standardisoimisliitto SFS ry 2011.)

#### 4.2.2 Laskenta

U-arvo lasketaan RakMK osan C4 mukaan seuraavan kaavan mukaisesti.

U-arvon laskeminen

$$U = 1 / R_T \quad [W/(m^2K)] \quad (1)$$

missä

$R_T$  on rakennusosan kokonaislämmönvastus ympäristöstä ympäristöön.  $[(m^2K)/W]$

$R_T$  lasketaan kaavalla 2 kun ainekerrokset ovat tasapaksuja, tasa-aineisia ja kun lämpö siirtyy ainekerrokseen nähden kohtisuoraan.

RT- laskenta tasapaksuilla ja homogeenisilla ainekerroksilla

$$RT = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_m + R_g + R_b + R_{q1} + R_{q2} + \dots R_{qn} + R_{se} \quad (2)$$

$[(m^2K)/W]$

missä

$$R_1 \quad \text{on} \quad d_1 / \lambda_1 \quad [(m^2 \cdot K)/W]$$

$$R_2 \quad \text{on} \quad d_2 / \lambda_2 \dots \quad [(m^2 \cdot K)/W]$$

$$R_m \quad \text{on} \quad d_m / \lambda_m \quad [(m^2 \cdot K)/W]$$

$$d_1, d_2, \dots d_m \quad \text{on} \quad \text{ainekerroksen 1, 2 ... m paksuus,} \quad [m]$$

$$\lambda_1, \lambda_2, \dots \lambda_m \quad \text{on} \quad \text{ainekerroksen 1, 2 ... m lämmönjohtavuuden suunnitteleuarvo, esim. normaalin lämmönjohtavuus} \quad [W/(m \cdot K)]$$

$R_g$	on	rakennusosassa olevan ilmakerroksen lämmönvastus	$[(m^2 \cdot K)/W]$
$R_b$	on	maan lämmönvastus	$[(m^2 \cdot K)/W]$
$R_{q1}, R_{q2}$	on	ohuen ainekerroksen 1, 2... n lämmönvastus	$[(m^2 \cdot K)T/W]$
$R_{si}$	on	sisäpuolinen pintavastus	$[(m^2 \cdot K)/W]$
$R_{se}$	on	ulkopuolinen pintavastus	$[(m^2 \cdot K)/W]$

Mikäli tasa-aineisen ainekerroksen paksuus vaihtelee rakenteen tason suunnassa, voidaan paksuutena käyttää keskimääräistä arvoa edellyttäen, ettei paikallinen vähimmäispaksuus alita keskimääräistä enempää kuin 20 %. (Ympäristöministeriö 2003 RakMk C4.)

Rakennusosan ollessa epätasa-aineinen niin, että siinä on pintojen suuntaisia ainekerroksia, joissa on rinnakkain lämmönvastukseltaan erilaisia osa-alueita, lasketaan epätasa-aineisen ainekerroksen  $j$  lämmönvastus  $R_j$  alla olevalla kaavalla.

Kokonaislämmönvastuksen määrittäminen kun ainekerrokset ovat tasapaksuja ja epähomogeenisiä

$$1/R_j = f_a / R_{aj} + f_b / R_{bj} + \dots + f_n / R_{nj} \quad [(m^2 K/W)] \quad (3)$$

missä

$f_a, f_b, \dots, f_n$  on epätasa-aineisessa ainekerroksessa  $j$  olevan tasa-aineisen osa-alueen  $a, b \dots n$  suhteellinen osuus ainekerroksen kokonaispinta-alasta

$R_{aj}, R_{bj}, \dots, R_{nj}$  on epätasa-aineisessa kerroksessa  $j$  olevan tasa-aineisen osa-alueen  $a, b \dots n$  lämmönvastus, jossa  $R_{aj} = d_i / \lambda_{aj}$ ,  $R_{bj} = d_j / \lambda_{bj}$ , ...  $R_{jn} = d_j / \lambda_{nj}$   
 $[(m^2 \cdot K)/W]$

$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  on ainekerroksen 1, 2 ... n lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvo, esim. normaalin lämmönjohtavuus. (Ympäristöministeriö 2003 RakMk C4.)  
 $[W/(m \cdot K)]$



Pintavastusten arvoina laskennassa käytetään alla olevan Suomen rakentamismääräyskokoelman C4 taulukko 1:en mukaisia arvoja.

Taulukko 1. Sisä- ja ulkopuolinen pintavastus  $R_{si}$  ja  $R_{se}$  (Ympäristöministeriö 2003 RakMk C4)

Sisäpuolinen pintavastus $R_{si}$ ( $m^2 \cdot K$ )/W			Ulkopuolinen pintavastus $R_{se}$ ( $m^2 \cdot K$ )/W		
Lämpövirran suunta					
vaakasuora	ylöspäin	alaspäin	vaakasuora	ylöspäin	alaspäin
0,13	0,10	0,17	0,04	0,04	0,04

#### 4.2.3 U-arvo vaatimukset eri tiloille

Suomen rakennusmääräyskokoelma määrittelee lämpimän tilan sellaiseksi tilaksi, jonka mitoittavaksi huonelämpötilaksi lämmityskaudella oleskelu- tai muista syistä valitaan  $+17\text{ °C}$  tai sitä korkeampi lämpötila. Erityisen lämpimällä tilalla tarkoitetaan sellaista tilaa, jossa käyttötarkoituksesta johtuen huonelämpötila on jatkuvasti tai ajoittain korkea verrattuna tavanomaiseen lämpimään tilaan esimerkiksi sauna. Jäähdytettävällä kylmällä tilalla tarkoitetaan sellaista tilaa, jossa jäähdytys- ja lämmitysjärjestelmän avulla ympärivuotisesti ylläpidetään käyttötarkoituksen mukaista alle  $17\text{ °C}$  lämpötilaa. Tällaisia tiloja ovat esimerkiksi viileät kellari- ja varastotilat. (Ympäristöministeriö 2010 RakMk C3.)

Suomen rakennusmääräyskokoelman U-arvon minimivaatimukset uudisrakentamisessa ovat seuraavalla sivulla olevan luettelon mukaiset lämpimälle, erityisen lämpimälle ja jäähdytettävän kylmän tilan rakennusosille. Rakennusosien U-arvot eivät saa ylittää alla olevia rakennusosien arvoja, kun tila rajoittuu ulkoilmaan, lämmittämättömään tilaan tai maahan. (Ympäristöministeriö 2010 RakMk C3.)

Rakenneosien minimi U-arvovaatimukset ovat seuraavanlaiset:

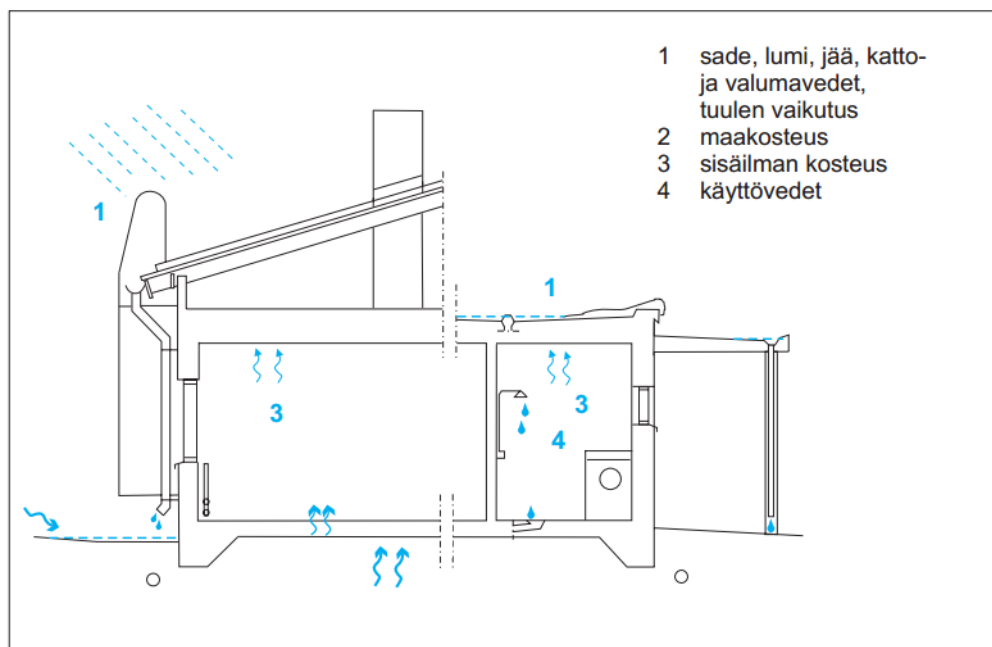
- seinä 0,17 W/m<sup>2</sup>K
- hirsiseinä 0,40 W/m<sup>2</sup>K  
(hirsirakenteen keskimääräinen paksuus vähintään 180 mm)
- yläpohja ja ulkoilmaan rajoittuva alapohja 0,09 W/m<sup>2</sup>K
- ryömintätilaan rajoittuva alapohja 0,17 W/m<sup>2</sup>K  
(tuuletusaukkojen määrä enintään 8 promillea alapohjan pinta-alasta)
- maata vastaan oleva rakennusosa 0,16 W/m<sup>2</sup>K
- ikkuna, kattoikkuna, ovi 1,0 W/m<sup>2</sup>K  
(Ympäristöministeriö 2010 RakMk C3.)

## 5 RAKENNUKSEN KOSTEUSTEKNINEN TOIMINTA

### 5.1 TIETOA KOSTEUDESTA RAKENNUKSISSA

Rakennusosien kostuminen, kuivumisen pitkittyminen ja jatkuva kosteus voi aiheuttaa haitallisia kosteusvaurioita. Pitkään kosteina pysyvissä rakennusosissa voi alkaa kasvamaan erilaisia home- ja lahosieniä, hiivoja ja bakteereja, joita yhteisesti nimitetään mikrobeiksi. Rakennusosan lyhytaikainen kostuminen ja sen jälkeen kuivuminen ei aiheuta yleensä mikrobien kasvamisen alkamista. (Rakennustieto 1999.)

Kosteusvaurioiden yleisimmän syyt ovat: suunnitteluvirheet tai suunnitelman puuttuminen, rakennustyön aikainen virhe, puutteet rakentamisen laadun hallinnassa, rakennusosien vanheneminen sekä puutteellinen huolto ja käytövirheet. Jos rakennuksessa ilmenee kosteus- ja mikrobivaurioita, tulisi ne korjata ja niiden aiheuttajat korjauksen yhteydessä poistaa. On erittäin tärkeää selvittää kosteusvaurioiden syyt ja laajuus ennen korjaustöiden aloittamista. (Rakennustieto 1999.) Alla olevassa kuviossa käydään läpi rakennuksen yleisimpiä kosteudenlähteitä.



Kuvio 8. Rakennuksen yleisiä kosteuden lähteitä (Rakennustieto 1999)

## 5.2 ILMAN KOSTEUS

Vedenpinnan yläpuolella olevat rakenteet ovat aina kosketuksissa ilman kanssa, oli se sitten sisäilma, ulkoilma tai maan huokosissa oleva ilma. Tämän lisäksi suurin osa rakennusaineista on huokoisia, ja niiden huokosissa on ilmaa. Ilman kosteuspitoisuus on otettava aina huomioon, kun suunnitellaan rakenteita, jotka toimivat kosteusteknisesti toivotulla tavalla. (Björkholtz 1997, 43.) Tästä esimerkkinä voidaan käyttää pesuhuoneen ja asuinhuoneen erilaista kosteusteknistä toimintaa.

Kostea ilma on kuivan ilman ja vesihöyryn seos. Kuiva ilma koostuu pääasiallisesti typestä [N] (78 tilavuus-%), hapesta [O<sub>2</sub>] (21 tilavuus-%) ja argonista [Ar] (1 tilavuus-%). Kuivan ilman yleisesti käytettävä laskennallinen moolipaino on  $M_i = 28,96$  kg/kmol ja vesihöyryn vastaava on  $M_v = 18,02$  kg/kmol. Vesihöyry on kuivaa ilmaa kevyempi kaasu. Ilma on siis sitä kevyempää mitä suurempi vesihöyrypitoisuus sillä on. (Björkholtz 1997, 43.)

Tietyssä lämpötilassa, eli **kastepisteessä**, ilma voi sisältää enintään tietyn määrän vesihöyryä. Kyseistä vesihöyry- ja kosteusmäärää kutsutaan yleisesti kyllästyskosteudeksi. Kyllästyskosteus riippuu ilman kosteudesta, sillä mitä suurempi lämpötila on niin, sitä suurempi on myös kyllästyskosteus. Näiden välillä ei ole täsmällistä matemaattista kaavaa, vaan kyllästyskosteuden määrittämiseen käytetään erilaisia likiarvokaavoja. (Björkholtz 1997, 43.) Kyllästyskosteuden riippuvuutta voidaan kuvata esimerkiksi alla olevalla keuhollisella matemaattisella funktiolla. (Rafnet-ryhmä 2004.)

Kyllästysvesihörypitoisuuden ja lämpötilan riippuvuus lämpötila-alueella – 20 °C... + 80 °C

$$v_k = 4,85 + 3,47 (t/10) + 0,945 (t/10)^2 + 0,158 (t/10)^3 + 0,0281 (t/10)^4$$

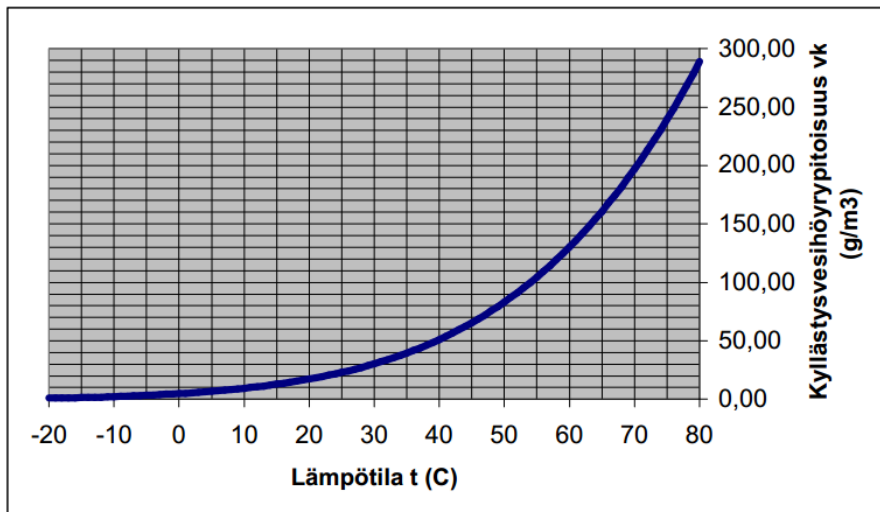
[g/m<sup>3</sup>]

(4)

missä

$v_k$  on ilman kyllästysvesihörypitoisuus [g/m<sup>3</sup>]

$t$  on ilman lämpötila [°C] (Rafnet-ryhmä, 2004.)



Kuvio 9. Kyllästysvesihörypitoisuus lämpötilan funktiona (Rafnet-ryhmä 2004)

Yllä olevan kuvion arvot on saatu käyttämällä kaavaa 4. Kuvaajassa ilmenee kyllästysvesihörypitoisuuden kasvu lämpötilan noustessa.

Ilman vesihörypitoisuutta voidaan myös kuvata ilman vesihöyryn osapaineen  $p_v$  [Pa] avulla, koska vesihörypitoisuuden ja vastaavan vesihöyryn osapaineen välillä vallitsee yhteys. (Rafnet-ryhmä 2004.)

Ilman vesihöyrypitoisuuden määrittäminen ilman vesihöyryn osapaineen avulla

$$p_v = 461,4 \cdot 10^{-3} \cdot T \cdot v \quad [\text{Pa}] \quad (5)$$

missä

T on ilman lämpötila [K]

v on ilman vesihöyrypitoisuus [ $\text{g}/\text{m}^3$ ] (Rafnet-ryhmä 2004).

Taulukko 2. Ilman kyllästysvesihöyrypitoisuus ja kyllästysosapaine lämpötilan funktiona (Rafnet-ryhmä 2004)

t (°C)	v <sub>k</sub> (g/m <sup>3</sup> )	p <sub>vk</sub> (Pa)	t (°C)	v <sub>k</sub> (g/m <sup>3</sup> )	p <sub>vk</sub> (Pa)	t (°C)	v <sub>k</sub> (g/m <sup>3</sup> )	p <sub>vk</sub> (Pa)	t (°C)	v <sub>k</sub> (g/m <sup>3</sup> )	p <sub>vk</sub> (Pa)
-20	0,88	102	1	5,21	658	22	19,40	2640	43	59,41	8663
-19	0,95	111	2	5,58	708	23	20,54	2805	44	62,40	9128
-18	1,04	122	3	5,98	762	24	21,74	2979	45	65,52	9614
-17	1,14	135	4	6,40	818	25	23,00	3162	46	68,77	10122
-16	1,25	149	5	6,84	878	26	24,32	3355	47	72,15	10653
-15	1,38	164	6	7,31	941	27	25,71	3559	48	75,67	11207
-14	1,52	181	7	7,80	1008	28	27,17	3773	49	79,33	11786
-13	1,67	200	8	8,32	1079	29	28,70	3999	50	83,14	12390
-12	1,83	221	9	8,87	1154	30	30,31	4237	51	87,10	13020
-11	2,01	243	10	9,45	1234	31	31,99	4487	52	91,21	13677
-10	2,20	266	11	10,06	1318	32	33,75	4750	53	95,48	14362
-9	2,40	292	12	10,71	1408	33	35,60	5027	54	99,92	15075
-8	2,61	319	13	11,39	1502	34	37,54	5317	55	104,52	15818
-7	2,84	348	14	12,10	1603	35	39,56	5622	56	109,30	16592
-6	3,08	379	15	12,86	1708	36	41,68	5943	57	114,25	17397
-5	3,33	412	16	13,65	1820	37	43,90	6279	58	119,39	18234
-4	3,60	447	17	14,49	1939	38	46,21	6631	59	124,72	19105
-3	3,89	485	18	15,37	2064	39	48,63	7001	60	130,24	20010
-2	4,19	524	19	16,30	2197	40	51,16	7388	61	135,95	20951
-1	4,51	566	20	17,28	2337	41	53,79	7793	62	141,87	21928
0	4,85	611	21	18,31	2484	42	56,54	8218	63	147,99	22943

Taulukossa 2 on esitetty ilman kyllästysvesihöyrypitoisuus ja kyllästysosapaine lämpötilan funktiona. Taulukon arvot on määritelty kaavoilla 4 ja 5.

Suhteellinen kosteus RH tarkoittaa ilmassa olevan kosteusmäärän suhdetta kyllästyskosteuteen, jota kuvataan useimmiten prosenteissa. (Björkholtz 1997, 44.)

Suhteellisen kosteuden määrittäminen vesihöyrypitoisuudella

$$RH = \frac{v}{vk} \cdot 100 \% \quad (6)$$

missä

$v$  on ilman vesihöyrypitoisuus [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]

$v_k$  on ilman kyllästysvesihöyrypitoisuus [ $\text{g}/\text{m}^3$ ] (Rafnet-ryhmä 2004).

tai

Suhteellisen kosteuden määrittäminen vesihöyryn paineilla

$$RH = \frac{p}{pk} \cdot 100 \% \quad (7)$$

missä

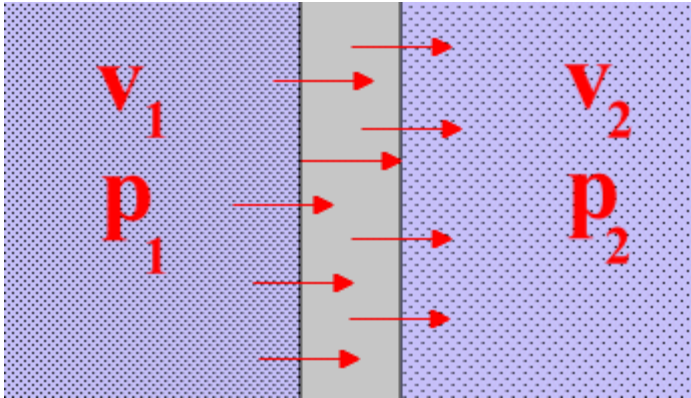
$p$  on vesihöyryn osapaine [Pa]

$p_k$  on vesihöyryn kyllästyspaine [Pa] (Björkholtz 1997, 45.)

## 5.3 KOSTEUDEN SIIRTYMINEN RAKENTEISSA

### 5.3.1 Diffuusio

Vesihöyryn diffuusio on kaasun molekyylien liikettä kaasun suuremmasta pitoisuudesta pienempään pitoisuuteen (kuvio 10). Kaasun molekyylien liike johtuu niiden keskinäisistä törmäyksistä. (Rafnet-ryhmä 2004.)



Kuvio 10. Vesihöyryn siirtyminen diffuusiolla (Styf 2009)

Suomessa tyypillinen vesihöyryn diffuusiosiiirtyminen esiintyy talviaikana, jolloin sisäilmassa on enemmän vesihöyryä kuin ulkoilmassa. Sisäilman vesihöyry pyrkii diffundoitumaan ulkoilmaan ulkovaipan rakenteiden läpi ja rakenne pyrkii estämään diffuusiovirtausta. Diffuusiotarkasteluissa ilman vesihöyrypitoisuutta voidaan kuvata joko vesihöyryn osapaineena tai vesihöyrypitoisuutena. (Rafnet-ryhmä 2004.)

Diffuusiotarkastelu vesihöyrypitoisuutena

(8)

$$g = \bar{\delta}_v \cdot \frac{\Delta v}{\Delta x} \quad [\text{kg/m}^2\text{s}]$$

missä

$\bar{\delta}_v$	on	vesihöyrynläpäisevyys [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
$\Delta v$	on	kosteusero matkalla x [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$\Delta x$	on	diffuusiomatka [m] (Björkholtz 1997, 55.)



Diffuusiotarkastelu osapaineen avulla

(9)

$$g = \bar{\delta}_p \cdot \frac{\Delta p}{\Delta x} \quad [\text{kg/m}^2\text{s}]$$

missä

$\bar{\delta}_p$	on	vesihöyryn läpäisevyys [kg/m s Pa]
$\Delta p$	on	vesihöyryn osapaineen ero matkalla x [Pa]
$\Delta x$	on	diffuusiomatka [m] (Björkholtz 1997, 55.)

Rakenteen koostuessa useista homogeenisista ainekerroksista, voidaan sen läpi diffuusiolla kulkevaa kosteusvirtaa laskea alla olevilla kaavoilla. (Björkholtz 1997, 56.)

Kosteusvirran määrittäminen vesihöyrymäärillä

$$g = \frac{V_s - V_u}{\Sigma Z v} \quad [\text{kg/m}^2\text{s}] \quad (10)$$

tai

Kosteusvirran määrittäminen vesihöyryn osapaineen avulla

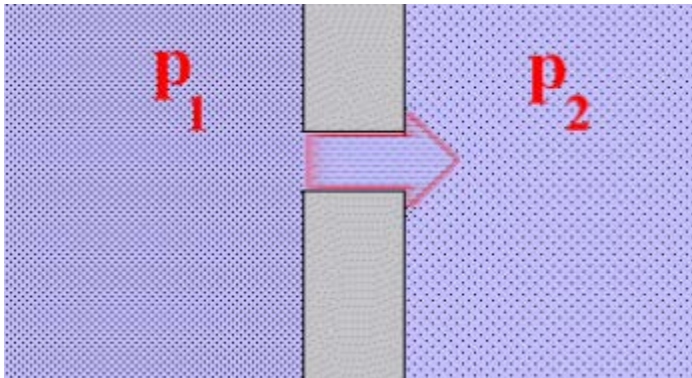
$$g = \frac{p_s - p_u}{\Sigma Z p} \quad [\text{kg/m}^2\text{s}] \quad (11)$$

joissa

$v_s, v_u$	on	vesihöyrymäärät sisä- ja ulkoilmassa [kg/m <sup>3</sup> ]
$p_s, p_u$	on	vesihöyryn osapaine sisä- ja ulkoilmassa [Pa]
$Z = \frac{d}{\bar{\delta}}$ [m <sup>2</sup> ·s·Pa/kg]	on	eri ainekerrosten vesihöyrynvastus $Z_v$ [s/m] tai $Z_p$
$d$	on	homogeenisen ainekerroksen paksuus [m] (Björkholtz 1997, 56.)

### 5.3.2 Konvektio

Vesihöyryä siirtyy konvektiossa ilmavirtausten mukana. Jotta ilmavirtauksia syntyy, täytyy rakenteen eri puolilla vallita erilaiset ilman kokonaispaineet (kuvio 11). Vesihöyryn konvektion mahdollistavat siis ilmanpaine-erot, joita voi aiheuttaa tuuli, lämpötilaerot, ilmanvaihtojärjestelmä ja puhaltimet. (Björkholtz 1997, 58.)



Kuvio 11. Kosteuden konvektio (Styf 2009)

Konvektio voidaan jakaa vaikutuksiltaan seuraavasti:

- Ilma jäähtyy virratessaan sisältä ulospäin. Tämän tuloksena voi olla kosteuden tiivistymistä ja keräytymistä haitallisessa määrin.
- Ilma lämpenee virratessaan sisälle. Tämän tuloksena virtaus kuivattaa rakennetta, koska ilman kosteuden sitomiskyky kasvaa. (Björkholtz 1997, 58.)

Kosteuden konvektiota voi tapahtua rei'issä, raoissa ja huokoisissa materiaaleissa. Käytännössä rakenteessa olevien reikien ja rakojen kautta tapahtuva kosteuden konvektio on merkityksellinen verrattuna huokoisissa materiaaleissa tapahtuvaan konvektioon. (Björkholtz 1997, 58.)

### 5.3.3 Kondenssi

Kosteuden tiivistymistä eli kondenssia ilmenee rakenteessa, jos kostea ilma joutuu kosketuksiin sellaisen pinnan tai huokosseinämän kanssa, jonka läm-

pötila alittaa ilman kastepistelämpötilan. Edellä mainittu tiivistyminen ilmenee rakenteen pinnalle tiivistyneenä vetenä tai huokosseinämässä olevana kosteutena. (Björkholtz 1997, 64.)

Kun halutaan varmistaa, että tiivistymistä ei tapahdu rakenteen pinnalle tulee pintalämpötilan olla suurempi kuin ympäröivän tilan kastepistelämpötila. Ratkaisevat tekijät kosteuden tiivistymisille rakenteiden sisäpinnoille ovat rakenteen lämmönvastus, sisäpinnan lämmönvastus, sisäilman kosteuspitoisuus ja ulkoilman lämpötila. Koska ulkoilman lämpötilaan ei voida vaikuttaa lainkaan, keskitytään edellä mainittujen kolmen ensimmäisen tekijän olosuhteiden parantamiseen. (Björkholtz 1997, 64.)

Pohdittaessa kosteuden tiivistymistä rakenteen sisään, tulee huomioida että kosteuspitoisuudet rakennuksen vaipan eri kohdissa vaihtelevat jatkuvasti. Nämä kosteuspitoisuuksien muutokset johtuvat ympäröivien olosuhteiden suurista muutoksista, joita ovat esimerkiksi vuodenajat, sateet ja auringonpaiste. Rakenteita suunnitellessa tulee laskelmin varmistaa, että rakenteen kosteuspitoisuus ei kasva vuosien mittaan. Suunnitelmissa tulee tarkastella ulkoa tulevan kosteuden lisäksi sisältä tulevaa kosteutta. Osa sisältä tulevasta kosteudesta tiivistyy vedeksi jossakin rakenteen kohdassa, jos vesihöyryn osapaine ylittää tämän kohdan lämpötilaa vastaavan kyllästyspaineen. (Björkholtz 1997, 66.)

#### **5.3.4 Diffuusion kondenssi**

Laskettaessa diffuusion aiheuttamaa kondenssia jaetaan vuosi tiivistymisjaksoon ja kuivumisjaksoon. Tiivistymisajanjakson pituudeksi valitaan esimerkiksi 60 vuorokautta ja ilmastoparametreiksi vuoden kahden kylmimmän kuukauden keskiarvot. Kuivumisajanjakso valitaan yhtä pitkäksi. Laskettaessa seinien kondenssia käytetään ulkoilman lämpötilana vuoden kahden lämpimmän kuukauden keskiarvoja. Katoissa voidaan olettaa pintalämpötilojen olevan korkeampia auringonpaisteen vuoksi. (Björkholtz 1997, 66.)

Kondenssilaskelmista tulee ilmetä, tiivistyneen kosteuden määrä ja paikka rakenteessa. Kyseisen kosteusmäärän on poistuttava tiivistyneestä kohdasta kuivumisajanjakson aikana, jotta rakennetta voidaan pitää toimivana. Vesihöyryn osapaine ja lämpötila rakenteen mielivaltaisessa kohdassa x voidaan arvioida seuraavien kaavojen avulla. (Björkholtz 1997, 66.)

Vesihöyryn osapaineen määrittäminen paikassa x

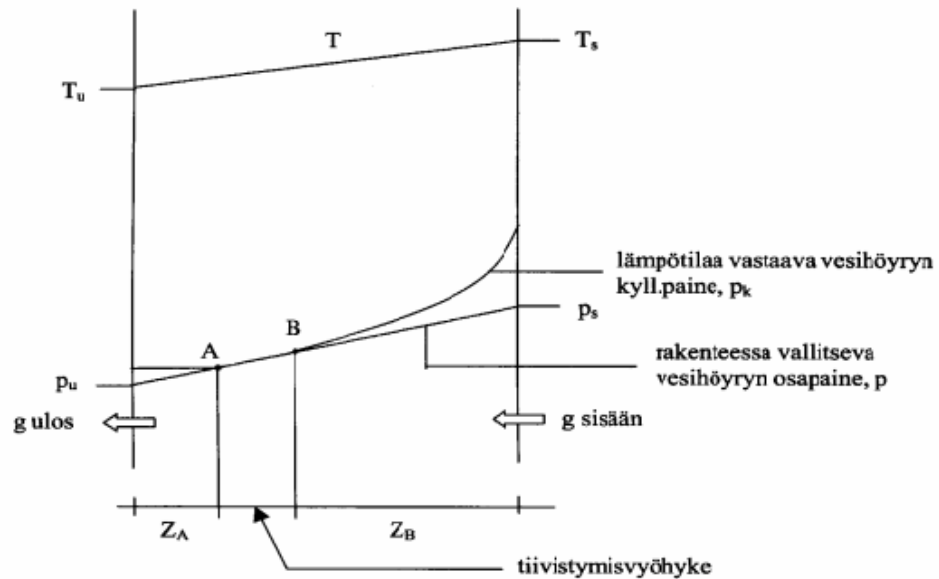
$$p_x = p_s - \frac{\sum Z_x}{\sum Z} \cdot (p_s - p_u) \quad [\text{Pa}] \quad (12)$$

Lämpötilan määrittäminen paikassa x

$$t_x = t_s - \frac{\sum m_x}{\sum m} \cdot (t_s - t_u) \quad [^\circ\text{C}] \quad (13)$$

joissa

$p_x$	on	vesihöyryn osapaine paikassa x [Pa]
$\sum Z_x$	on	sisäpinnasta kohtaan x olevien kerrosten vesihöyryn vastusten summa [ $\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$ ]
$\sum Z$	on	koko rakenteen vesihöyryn vastus [ $\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$ ]
$p_s, p_u$	on	vesihöyryn osapaineet sisä- ja ulkoilmassa [Pa]
$t_x$	on	lämpötila kohdassa x [ $^\circ\text{C}$ ]
$\sum m_x$	on	lämmönvastus sisäpinnasta kohtaan x [ $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ ]
$\sum m$	on	koko rakenteen lämmönvastus [ $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ ]
$t_s, t_u$	on	sisä- ja ulkoilman lämpötilat [ $^\circ\text{C}$ ] (Björkholtz 1997, 66-67.)



Kuvio 12. Lämpötila- ja kosteusjakauma homogeenisessä seinässä (Rafnet-ryhmä 2004)

Yllä olevasta kuviosta huomataan, että alueella A-B on tiivistymisvaara, koska vesihöyryn osapaine ylittää kyllästysosapaineen. Mahdollinen kosteuden tiivistymismäärä voidaan laskea alla olevalla kaavalla.

Tiivistyneen kosteuden määrän laskenta

$$g_{\text{tiiv}} = \frac{p_s - p_b}{z_b} - \frac{p_a - p_u}{z_a} \quad [\text{kg/m}^2\text{s}] \quad (14)$$

Yllä olevan kaavan ensimmäinen termi kuvaa rakenteeseen sisältä tulevaa ja tiivistyvää kosteutta. Jälkimmäinen termi sen sijaan kuvaa kosteusmäärää, joka samanaikaisesti diffundoituu tiivistymiskohdasta ulos. Näiden termien erotus kuvaa seinään jäävää kosteusvirtaa. (Björkholtz 1997, 67.)

Käytännössä kosteuden tiivistyminen tapahtuu yleensä kahden eri materiaalin yhtymäkohdassa. Tällöin yhdistyvät myös A ja B. Rakenteeseen kerään-

tyneen kosteuden määrä tiivistymisajanjaksona  $t_{tiiv}$  voidaan laskea seuraavalla kaavalla. (Björkholtz 1997, 67.)

Kosteuden määrä tiivistymisajanjaksona

$$G_{tiiv} = g_{tiiv} \cdot t_{tiiv} \quad [\text{kg/m}^2] \quad (15)$$

Rakenteessa voi myös tapahtua kuivumista sekä ulos- että sisäänpäin. Alla olevalla kaavalla saadaan määritettyä aikayksikössä poistuva kosteus. Kaavan ensimmäinen termi kuvaa kuivumista tiivistymiskohdasta ulospäin ja jälkimmäinen sen sijaan kuivumista tiivistymiskohdasta sisäänpäin. (Björkholtz 1997, 67.)

Rakenteesta poistuva kosteus

$$g_{kuiv} = \frac{p_A - p_u}{Z_A} - \frac{p_B - p_s}{Z_B} \quad [\text{kg/m}^2\text{s}] \quad (16)$$

Kuivumisajanjakson  $t_{kuiv}$  aikana rakenteesta poistuneen kosteuden määrä saadaan seuraavalla kaavalla.

Rakenteesta poistuneen kosteuden määrän laskenta kuivumisajanjaksolla

$$G_{kuiv} = g_{kuiv} \cdot t_{kuiv} \quad [\text{kg/m}^2] \quad (17)$$

Kondenssilaskelmissa on hyvä noudattaa seuraavaa järjestystä:

1. Aluksi on selvitettävä laskelmissa käytettävät ilmasto-olosuhteet eli lämpötilat ja vesihöyrynsapaineet rakenteen molemmilla puolilla.

2. Selvitetään käytettävien rakenteiden aineominaisuudet:  $\lambda$ -arvot ja vesihöyryn läpäisevyydet  $\delta_p$  sekä lasketaan tarvittavat vastukset.
3. Lasketaan lämpötilan jakauma rakenteessa kaavalla 13.
4. Lasketaan lämpötiloja vastaavat vesihöyryn kyllästyspaineet, taulukosta 2.
5. Lasketaan vesihöyryn osapaineen jakauma rakenteessa kaavalla 12.
6. Vertaillaan keskenään  $p_k$ - ja  $p$ -arvoja, mikäli  $p < p_k$  jokaisessa kerroksessa, tiivistymistä ei tapahdu. Jos jossakin kerroksessa  $p > p_k$ , se on osoitus tiivistymisestä.
7. Esitetään tulos graafisesti.
8. Lasketaan tiivistyneen kosteuden määrä kaavalla 15.
9. Mikäli tiivistymistä esiintyy, lasketaan kuivumisajanjaksona poistunut kosteuden määrä kaavalla 17.
10. Verrataan rakenteeseen tiivistyneen kosteuden  $G_{tiiv}$  ja rakenteesta poistuneen kosteuden  $G_{kuiv}$  määriä. Poistuneen kosteuden määrä tulee olla kohtuullisesti suurempi kuin tiivistyneen kosteuden määrä. (Björkholtz, 1997 68-69.)

#### 5.4 HOMEMALLI

CLT-koetaloprojektissa tutkitaan myös alun perin Valtion teknillisessä tutkimuskeskuksessa (VTT) kehitettyä homeen kasvun laskennallista mallia, jonka kehitystyö aloitettiin jo 1980-luvulla. Homemallin kehitystyötä on jatkettu Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) ja VTT:n toimesta yhteisprojektissa vuosina 2005 – 2008 sekä VTT:n ja TTY:n yhteisessä jatkokehityshankkeessa (ENERSIS v.2010 – 2013.), joissa mallin tarkkuutta on pyritty paranta-

maan entisestään. Kehitystyön tuloksena on saatu aikaan VTT-TTY homeriskimalli. (VTT 2011a.)

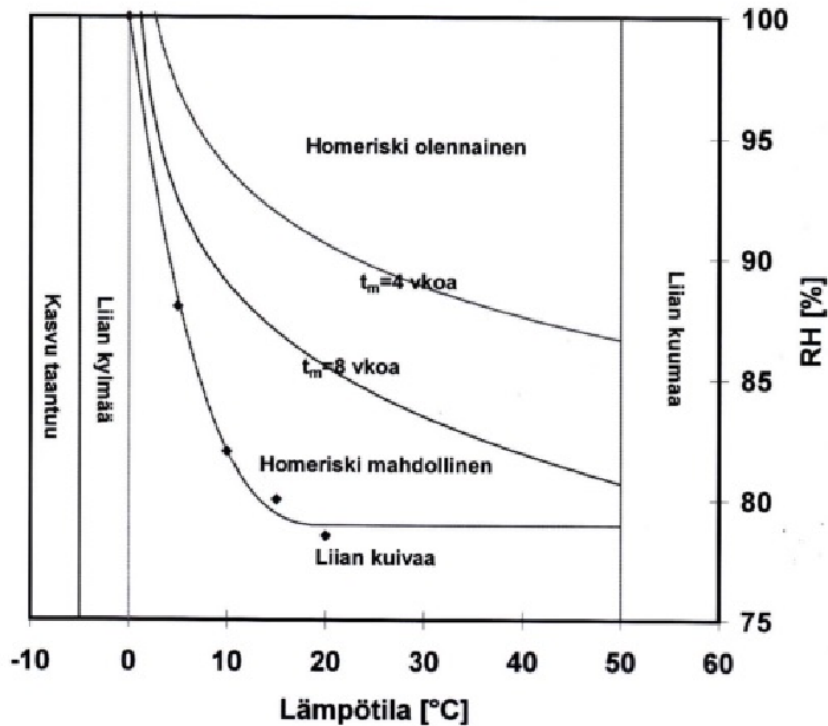
VTT-TTY homeriskimallia käyttämällä voidaan arvioida homeen kasvun riski eri rakennusmateriaalien pinnalla muuttuvissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa. Sen avulla voidaan selvittää kuinka kauan ja paljon rakenteet ja materiaalit kestävät kosteutta ennen kuin hometta alkaa kasvaa. Mallia voidaan käyttää myös apuna rakennusten home- ja kosteusongelmien ehkäisyyn sekä arvioimaan home- ja kosteusvaurioiden laatua ja niiden korjaustarpeen laatua. (VTT 2011a.)

Homemallissa kasvua kuvataan ns. homehtumisasteella tai **homeindeksillä** M (0–6). Homeindeksi perustuu visuaalisiin havaintoihin materiaalin pinnalla. Alla olevassa kuvassa on esitetty homeindeksi ja määritelty sen lukuarvojen merkitykset. (Kokko–Ojanen–Salonvaara–Hukka–Viitanen 1999, 37.)

Taulukko 3. Homeindeksi (VTT 2011a)

Homeindeksi M	Havaittu homekasvu	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





Kuvio 13. Homeen kasvulle suosiolliset kosteus- ja lämpötilaolot matemaattisena mallina (Kokko–Ojanen–Salonvaara–Hukka–Viitanen 1999, 38)

Homeen kasvun alkamiselle sopivat kosteusolot riippuvat ympärillä vallitsevasta lämpötilasta kuvion 13 mukaisesti. Yllä olevasta kuviosta huomataan, että mitä alhaisempi lämpötila on, sitä suurempi suhteellinen kosteus vaaditaan, jotta homeen kasvun alkaminen mahdollistuu. Mikäli suhteellinen kosteus on tämän kriittisen rajan alapuolella, on homeen kasvun kannalta kysymyksessä ns. kuiva aika, joka selvästi hidastaa kasvua. Kuvaajasta huomataan myös, että lämpötila antaa myös omat rajoituksensa homeen kasvulle. Pakkasessa home ei kasva, eikä myöskään yli 50 °C asteen lämpötilassa. Riittävän kuuma tai kylmä lämpötila lopettaa jo alkaneen homeen kasvun ja saattaa jopa tappaa rihmaston. (Kokko–Ojanen–Salonvaara–Hukka–Viitanen 1999, 37.)

VTT-TTY:n homemallissa rakennusmateriaalit ovat jaettu neljään eri **homehtumisherkkyysluokkaan**. Materiaalille valittavaan homehtumisherkkyysluokkaan vaikuttaa, sekä homehtumisen alkamisajankohta että lopullisen homekasvuston määrä materiaalin pinnalla homeen kasvulle otollisissa läm-

pötila- ja kosteusolosuhteissa. Seuraavassa taulukossa ilmenee yleisimpien rakennusmateriaalien homehtumisherkeysluokkia. (VTT 2011a.)

Taulukko 4. Rakennusmateriaalien homehtumisherkeysluokat (VTT 2011a)

Homehtumis-herkeysluokka	Rakennusmateriaalit
Hyvin herkkä HHL 1	karkeasahattu ja mitallistettu puutavara (mänty ja kuusi), höylätty mänty
Herkkä HHL 2	höylätty kuusi, paperipohjaiset tuotteet ja kalvot, puupohjaiset levyt, kipsilevy
Kohtalaisen kestävä HHL 3	mineraalivillat, muovipohjaiset materiaalit, kevytbetoni, kevytsorabetoni, karbonatisoitunut vanha betoni, sementtipohjaiset tuotteet, tiilet
Kestävä HHL 4	lasi ja metallit, alkalinen uusi betoni, tehokkaita homesuoja-aineita sisältävät materiaalit

Homemallissa kuvataan myös **homeen kasvun taantumaluokka** eri homehtumisherkeysluokkien materiaaleilla, jotka esitetty alla olevassa taulukossa. (VTT 2011a.)

Taulukko 5. Homeen kasvun taantumaluokat (VTT 2011a)

Homehtumis-herkeysluokka	Taantumaluokka
Hyvin herkkä HHL 1	Voimakkaasti taantuva
Herkkä HHL 2	Kohtalaisesti taantuva
Kohtalaisen kestävä HHL 3	Vähäisesti taantuva
Kestävä HHL 4	Vähäisesti taantuva

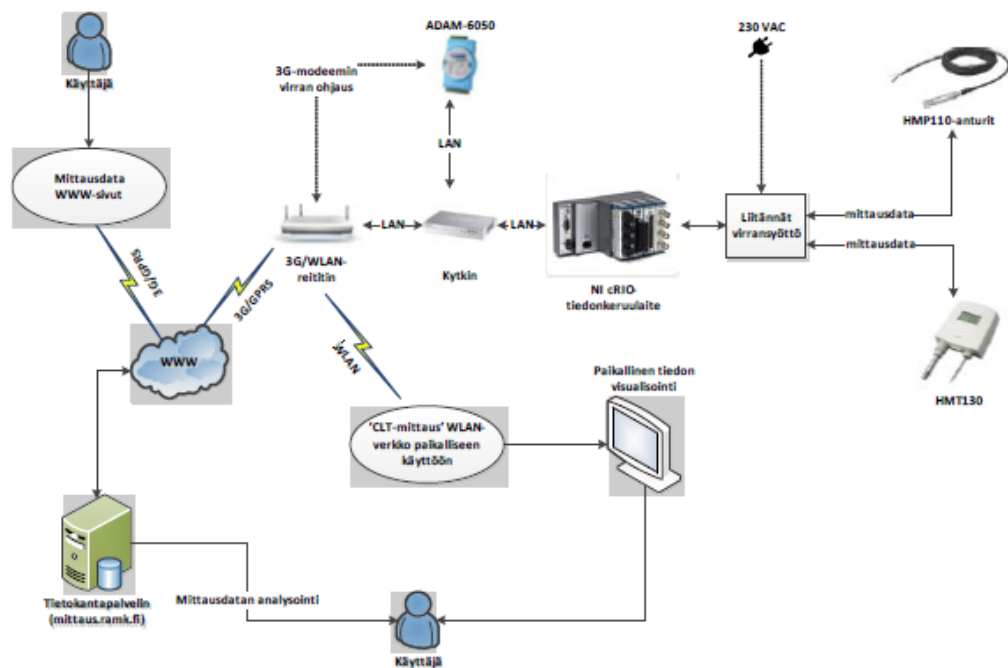
Homemallia käytettäessä on huomioitava, ettei homeindeksi kuvaa homehtumisen terveysriskiä. Sillä esimerkiksi kivipohjaisissa materiaaleissa tai kipsilevyssä elävien homeiden aineenvaihduntatuotteet voivat olla huomattavasti myrkyllisempiä kuin puumateriaaleissa elävien homeiden, vaikka niiden homeindeksi olisikin selvästi alhaisemmalla tasolla. Huomioitava on myös se,

että kahden materiaalin välisen rajapinnan homehtumisriskiä tulee aina tarkastella herkemmän materiaalin mukaan, koska herkemmin homehtuva materiaali lisää homeen kasvua myös vähemmän herkässä materiaalissa. (VTT 2011a.)

## 6 MITTAUSLAITTEISTO JA MITTAUSTEN TUOTTO

### 6.1 MITTAUSLAITTEISTO

Mittaus- ja tiedonkeruujärjestelmä mittaa lämpötila- ja kosteustietoja 49 mittauspisteestä, joten mitattavia arvoja on yhteensä 98 kappaletta. Mitattavia rakenneosia ovat kaksi seinärakennetyyppiä, alapohja ja yläpohja. Näiden lisäksi mitataan myös ulkolämpötilaa. Antureiden tarkat sijainnit ilmenevät kappaleessa 6.2. Mittauksista 96 kappaletta tehdään NI cRIO-laitteella sekä ulkolämpötilaa ja kosteutta mitataan CPX4-laitteella. (Autioniemi 2013.)



Kuvio 14 Mittaus- ja tiedonkeruujärjestelmän toimintaperiaate. (Autioniemi 2013)

Mittaus- ja tiedonkeruujärjestelmä toimii kuvion 14 mukaisesti. NI cRIO-tiedonkeruulaite kerää mittausdatan HMP110-antureilta ja lähettää sen tietoliikennelaitteiden välityksellä tietokantapalvelimelle. Tietokantapalvelimelle ohjelmoitu vastaanottorajapinta käsittelee lähetetyn datan ja tallentaa sen tietokantaan. 3G-verkon virhetilanteissa cRIO käynnistää ADAM-6050 rele-moduulin avulla Telewell EA530-reitittimen uudelleen. Mittausdata esitetään paikallisesti tietokoneella, jolle mittausdata välitetään tietokannasta 3G- ja WLAN-yhteyksien kautta. Mittausdataa visualisoidaan myös Internetissä kiin-

topuun nettisivulla. Työssä tehtäviä tarkempia analysointeja varten mittausdata haettiin suoraan tietokannasta käsiteltäväksi. (Autioniemi 2013.)

## 6.2 TUTKIMUSASETELMA

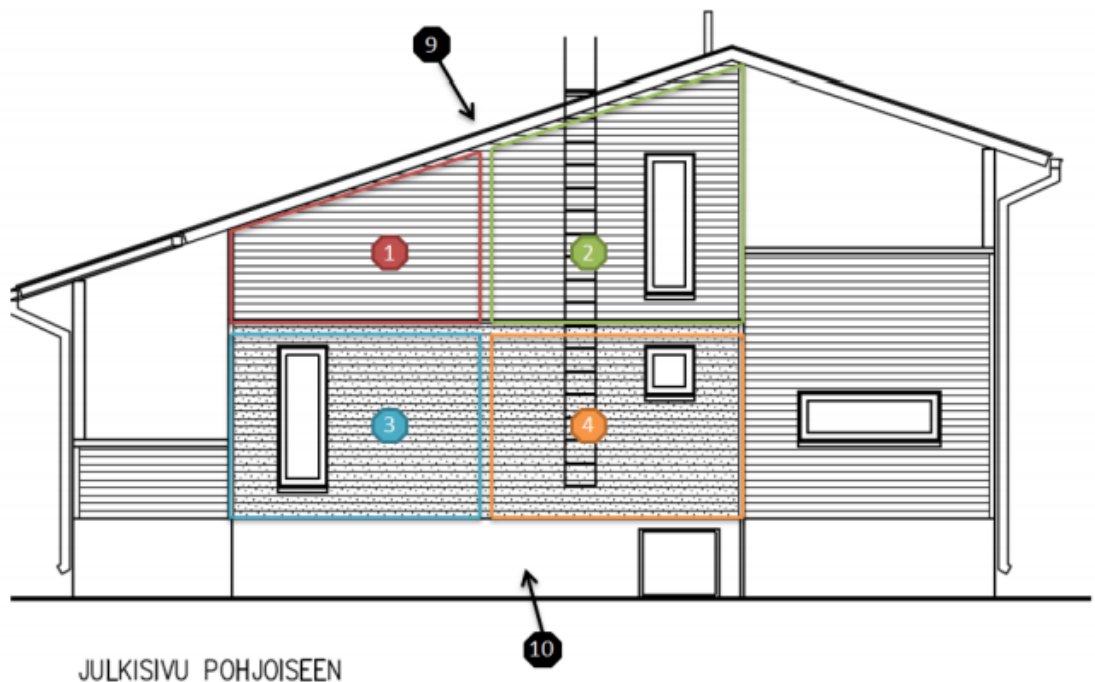
Tässä opinnäytetyössä käsiteltävä CLT-koetalo on jaettu erilaisiin mittaussektoreihin, joissa sijaitsevat mittauspisteet mittaavat lämpötilaa [°C] ja suhteellista kosteutta [RH%]. CLT-koetalo on jaettu alla olevien kuvioiden mukaisiin mittaussektoreihin. Mittaussektoreilla tutkitaan ulkoverhouksen väriä (tumma/vaalea), ilmansuunnan (etelä/pohjoinen) ja eristemateriaalin (puukuitu/mineraalivilla) vaikutusta koetalon lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan.

### Vaipparakenteiden mittaussektorit (pohjoinen)

1 – 4 = seinärakenteiden mittaussektorit

9 = yläpohja

10 = alapohja



Kuvio 15. CLT-koetalon pohjois-seinän vaipparakenteiden mittaussektorit (Vatanen 2013)

Pohjoiseen päin olevassa julkisivussa mittaussektoreilla 1 ja 2 on vaalea ulkoverhous ja sektoreilla 3 ja 4 tumma ulkoverhous. Sektoreilla 1 ja 3 on käy-

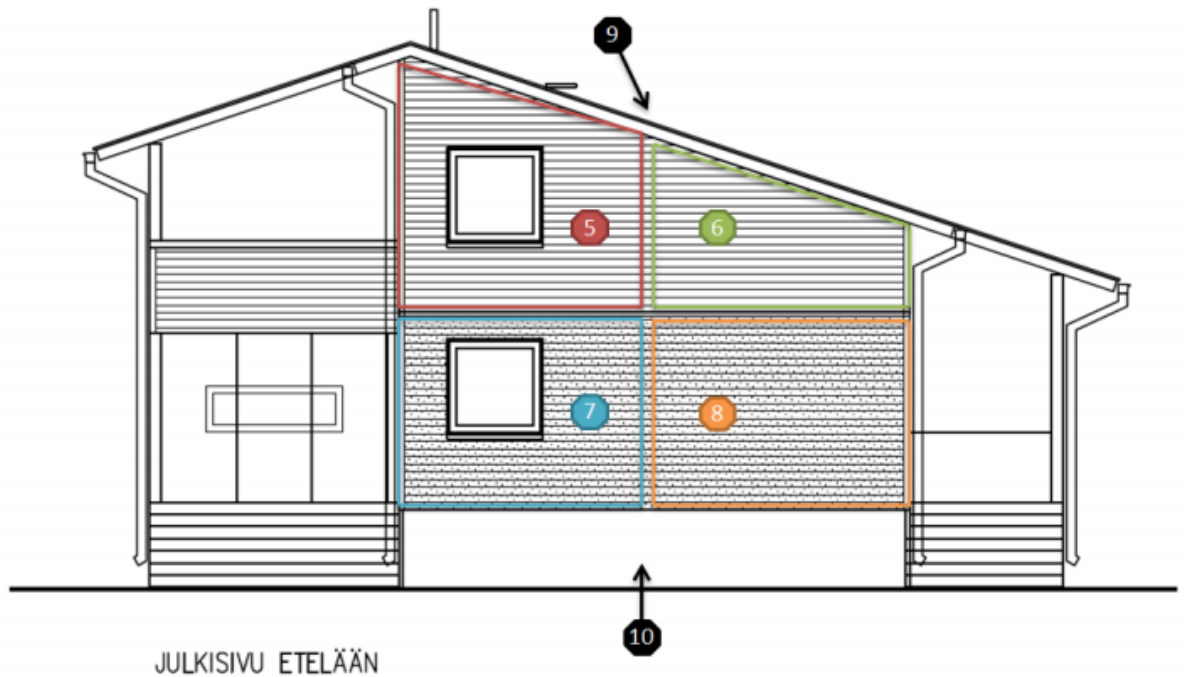
tetty puukuitueristettä (US1) ja sektoreilla 2 ja 4 mineraalivillaa (US2). Ulkoseinärakenteet US1 ja US2 esitellään kappaleessa 6.3.

### Vaipparakenteiden mittaussektorit (etelä)

5 – 8 = seinärakenteiden mittaussektorit

9 = yläpohja

10 = alapohja

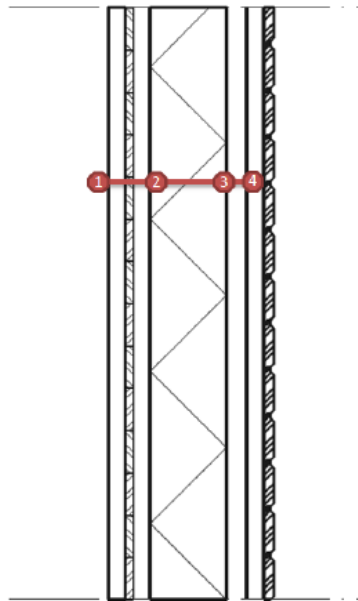


Kuvio 16. CLT-koetalon etelä-seinän vaipparakenteiden mittaussektorit (Vatanen 2013)

Etelään päin olevassa julkisivussa mittaussektoreilla 5 ja 7 on vaalea ulko-  
verhous ja sektoreilla 6 ja 8 tumma ulko-  
verhous. Sektoreilla 5 ja 7 on käytetty  
puukuitueristettä (US1) ja sektoreilla 6 ja 8 mineraalivillaa (US2). Ulkoseinä-  
rakenteet US1 ja US2 esitellään seuraavassa kappaleessa.

## 6.3 MITTAUSSEKTORIT

### 6.3.1 Ulkoseinärakenne US1



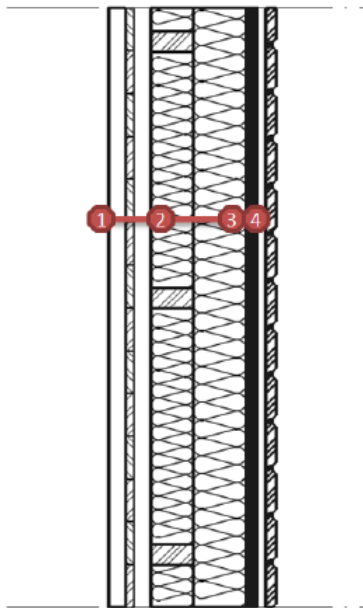
CLT-levy 40/20/40, 100mm  
Tuulensuojaeriste, Paroc Cortex One, 180 mm  
Tuuletusrakorima 48x48 k 600  
Tuuletusrakorima 48x40 k 600  
Ulkoverhouslauta UYW 28x170

Kuvio 17 US1 mittauspisteet ja rakenne (Vatanen 2013)

US1-rakenteessa on 4 mittauspistettä, jotka mittaavat lämpötilaa [°C] ja suhteellista kosteutta [RH%]. Mittauspisteiden sijainnit seinärakenteessa ovat seuraavat:

- piste 1 CLT-levyn sisäpinta
- piste 2 CLT-levyn ja eristekerroksen rajapinta
- piste 3 eristekerroksen ja tuulensuojan rajapinta
- piste 4 tuuletusväli.

### 6.3.2 Ulkoseinärakenne US2



CLT-levy 40/20/40, 100mm  
 Lämmöneriste, Ekovilla + vaakarunko 42x98 k 600  
 Lämmöneriste, Ekovilla + pystyrunko 42x123 k 600  
 Tuulensuojalevy, Runkoleijona 25  
 Tuuletusrakorima 22x100 k 600  
 Ulkooverhouslauta UYW 28x170

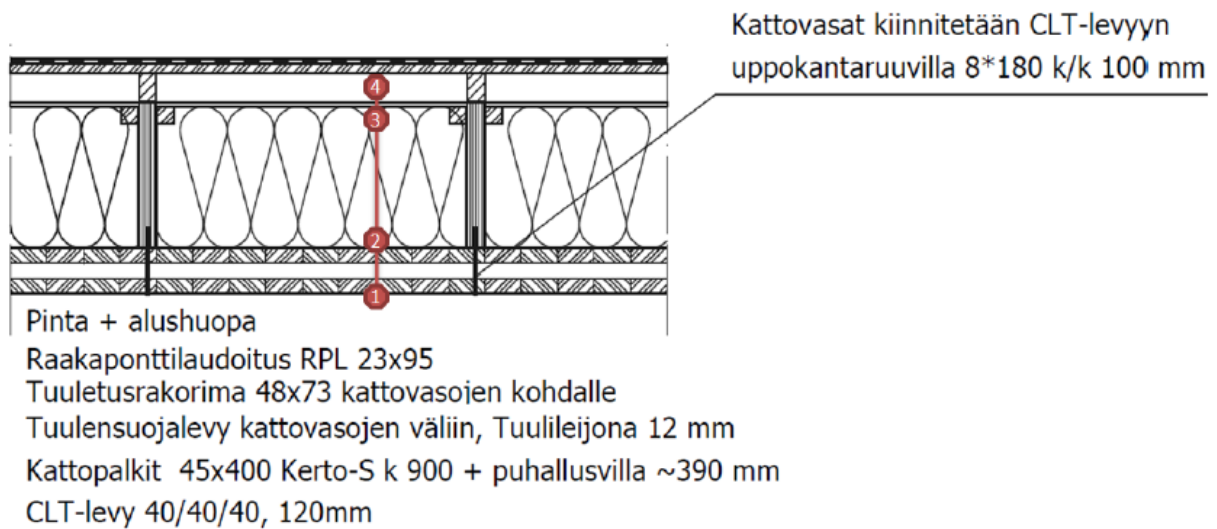
Kuvio 18 US2 mittauspisteet ja rakenne (Vatanen 2013)

US2-rakenteessa on 4 mittauspisteitä, jotka mittaavat lämpötilaa [°C] ja suhteellista kosteutta [RH%]. Mittauspisteiden sijainnit seinärakenteessa ovat seuraavat:

- piste 1 CLT-levyn sisäpinta
- piste 2 CLT-levyn ja eristekerroksen rajapinta
- piste 3 eristekerroksen ja tuulensuojan rajapinta
- piste 4 tuuletusväli.



### 6.3.3 Yläpohjarakenne YP1

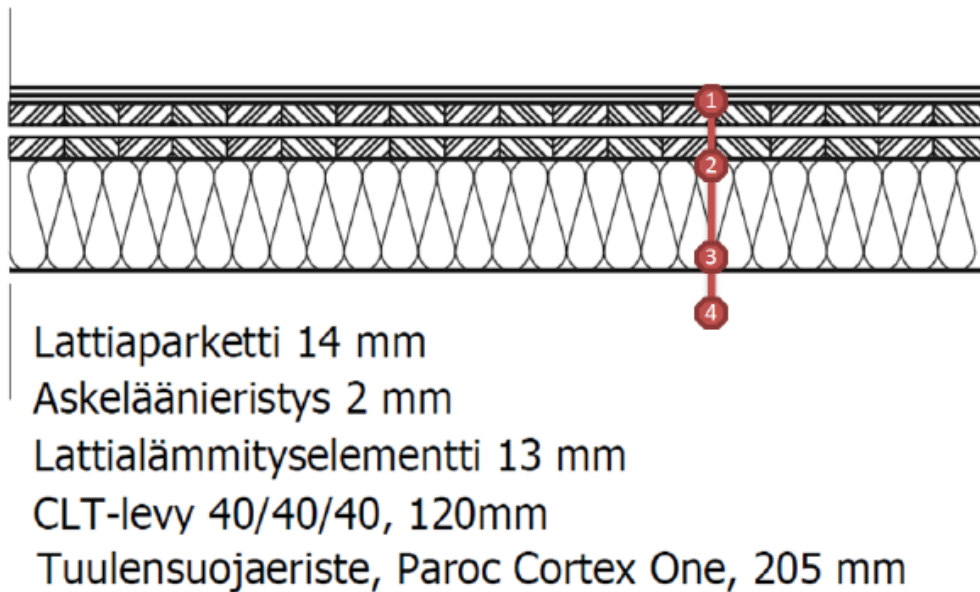


Kuvio 19 YP1 mittauspisteet ja rakenne (Vatanen 2013)

YP1-rakenteessa on 4 mittauspistettä, jotka mittaavat lämpötilaa [°C] ja suhteellista kosteutta [RH%]. Mittauspisteiden sijainnit seinärakenteessa ovat seuraavat:

- piste 1 CLT-levyn sisäpinta
- piste 2 CLT-levyn ja eristekerroksen rajapinta
- piste 3 eristekerroksen ja tuulensuojan rajapinta
- piste 4 tuuletusväli.

### 6.3.4 Alapohjarakenne AP1



Kuvio 20 AP1 mittauspisteet ja rakenne (Vatanen 2013)

AP1-rakenteessa on 4 mittauspistettä, jotka mittaavat lämpötilaa [°C] ja suhteellista kosteutta [RH%]. Mittauspisteiden sijainnit seinärakenteessa ovat seuraavat:

- piste 1 CLT-levyn sisäpinta
- piste 2 CLT-levyn ja eristekerroksen rajapinta
- piste 3 eristekerroksen ja tuulensuojan rajapinta
- piste 4 ryömintätila.

## 7 CLT-KOETALON LÄMPÖ- JA KOSTEUSTEKNISET LASKUT

### 7.1 KOSTEUSTEKNISISSÄ LASKUISSA KÄYTETTÄVÄT SUUREET

Laskennat suoritettiin sivuilla 32–33 olevan ohjeen mukaan. Ilmastolliset parametrit saatiin Ilmatieteen laitoksen julkaisemasta raportista, johon on tilastoitu Suomen ilmastoa vuodelta 1981 lähtien. Raportista löytyi Kemi-Tornion Lentoaseman säähavaintoaseman lukemat, joita tässä työssä käytetään.

Taulukko 6 Ilmanpaine- ja lämpötila tilastot (Aalto–Karlsson–Kaukoranta–Pirinen–Ruuhela–Simola 2012 48–49)

Kk Month	Ilmanpaine Air pressure hPa		Ilman lämpötila Air temperature °C				Lämpötilan ääriarvot Extreme temperature °C				Lämpötilapäivät Temperature days Kpl/Number				Maanp. alin Gr.min <0,0°C		
	Aika/Time UTC				Karvo Mean	Keskim/Average		Absol ylin max	Absol alin min	V/Year	Absol alin min	V/Year	Ylin Max >25,0°C	Ylin Max <0,0°C		Alin Min <0,0°C	Alin Min <-10,0°C
	00	06	12	18													
6301	KEMINMAA KEMI-TORNION LENTOASEMA, 6310 KEMINMAA																
1	-11,0	-11,0	-10,1	-11,0	-10,8	-6,8	-15,5	6,6	2002	-42,6	1999	-	24	30	21		
2	-11,4	-11,7	-8,3	-10,4	-10,4	-6,3	-15,3	7,2	1993	-35,0	1982	-	22	28	19		
3	-7,9	-8,2	-2,9	-5,3	-5,9	-1,5	-10,7	9,6	1982	-34,0	1981	-	19	30	15		
4	-2,4	-0,8	2,9	1,3	0,2	4,4	-4,1	18,3	2002	-24,9	1997	-	3	23	4		
5	2,7	6,5	9,5	7,9	6,6	11,4	1,5	27,8	2010	-10,6	1999	0	-	10	0		
6	8,3	12,6	15,2	14,0	12,5	17,1	7,1	29,6	2000	-2,7	1996	1	-	1	-		
7	12,1	15,7	18,4	17,3	15,8	20,2	10,9	31,1	1988	-0,2	1996	2	-	0	-		
8	10,3	12,9	16,3	14,4	13,3	17,6	8,6	28,2	1989	-3,6	1997	1	-	1	-		
9	6,2	6,9	10,9	8,2	8,1	12,0	4,1	23,7	2004	-7,6	1996	-	-	7	-		
10	1,6	1,3	4,2	2,4	2,4	5,3	-0,7	14,1	2005	-22,3	1992	-	3	16	2		
11	-3,9	-4,0	-2,9	-3,8	-3,7	-0,8	-7,0	10,0	2003	-29,4	1988	-	14	24	9		
12	-8,5	-8,4	-8,2	-8,6	-8,5	-4,6	-13,0	6,6	1989	-34,8	2002	-	20	29	18		
Vuosi/ Year	-0,3	1,0	3,8	2,2	1,6	5,7	-2,8	31,1		-42,6		4	105	199	88		

Kosteuden tiivistyslaskelmissa käytetään yllä olevan taulukon kahden kylmimmän kuukauden keskiarvoista lämpötilaa ja tiivistymisajanjakson pituutena on 60 vrk. Tiivistymisajanjakson ulkolämpötilaksi saadaan Tammikuun ja Helmikuun keskiarvo  $t_u = (-10,8 + -10,4) / 2 = -10,6$  °C. Vastaavasti kuivumisajanjakson laskelmissa käytetään yllä olevan taulukon kahden lämpimmän kuukauden keskiarvoista lämpötilaa. Kuivumisajanjakson pituus on sama kuin tiivistymisajanjakson, eli 60 vrk. Tiivistymisajanjakson ulkolämpötilaksi saadaan Heinäkuun ja Elokuun keskiarvo  $t_u = (15,8 + 13,3) / 2 = 14,6$  °C. Sisäilman lämpötila on, sekä tiivistymis- että kuivumislaskelmissa sama, 21 °C.

Taulukko 7 Suhteellinen kosteus, sädemäärä, sadepäivät ja lumensyvyys tilastot (Aalto–Karlsson–Kaukoranta–Pirinen–Ruuhela–Simola 2012 48–49)

Kk Month	Suhteellinen kosteus Relative humidity %				Sademäärä Precipitation mm				Sadepäivät Precipitation days			Suurin vrksade Max daily prec. mm	Lumensyvyys Snow depth cm		
	Aika/Time UTC				Karvo Mean	Keskim Mean	Suurin Max	V/Year	Pienin Min	V/Year	Kpl/Number ≥0,1 mm ≥1,0 mm ≥10,0mm			15 p. viim.p. 15th last day	
	00	06	12	18											
6301	KEMINMAA KEMI-TORNION LENTOASEMA, 6303 KEMINMAA LIEDAKKALA, 6312 TORNIO TORPPI														
1	88	87	87		49	112,2	1983	9,4	1985	18	10	1	23,0	39	47
2	88	85	87		38	94,5	1990	1,9	1994	15	9	1	22,8	56	62
3	88	75	83		38	98,2	1989	9,0	1996	14	8	1	20,6	67	62
4	79	64	72		27	79,3	2000	7,7	2004	10	6	0	24,3	42	10
5	69	57	63		42	77,1	1982	6,0	1997	12	8	1	29,8	0	-
6	67	55	61		43	100,8	1981	5,8	2006	11	7	1	29,4	-	-
7	74	62	67		65	124,8	1998	4,8	1994	13	9	2	47,9	-	-
8	82	64	76		60	145,0	1992	3,0	1996	13	8	2	52,5	-	-
9	89	70	85		56	154,3	2004	14,6	1996	13	8	2	39,8	-	-
10	91	81	88		61	135,3	1983	15,6	2005	15	10	2	34,8	1	3
11	91	90	90		57	101,4	1986	8,7	1987	18	11	1	33,5	6	12
12	89	89	89		44	101,6	1993	11,6	1986	17	10	1	22,5	16	25
Vuosi/ Year	83	73	79		580	154,3		1,9		169	104	15	52,5		

Tiivistymisajanjakson suhteelliseksi kosteudeksi saatiin yllä olevasta taulukosta Tammikuun ja Helmikuun keskiarvo RH = 87 %. Ulkoilman vesihöyryn osapaine ratkaistiin kaavalla 7,  $p = 0,87 * 251,6 = 219$  Pa. Sisäilmassa on vesihöyryä  $4 \text{ g/m}^3$  enemmän kuin ulkoilmassa. Joten osapainelisäksi tulee kaavalla 5 laskettuna  $461,4 * 10^{-3} * 294 * 4 = 542$  Pa. Täten sisäilman vesihöyryn osapaine talvella on  $p_s = 219 + 542 = 761$  Pa.

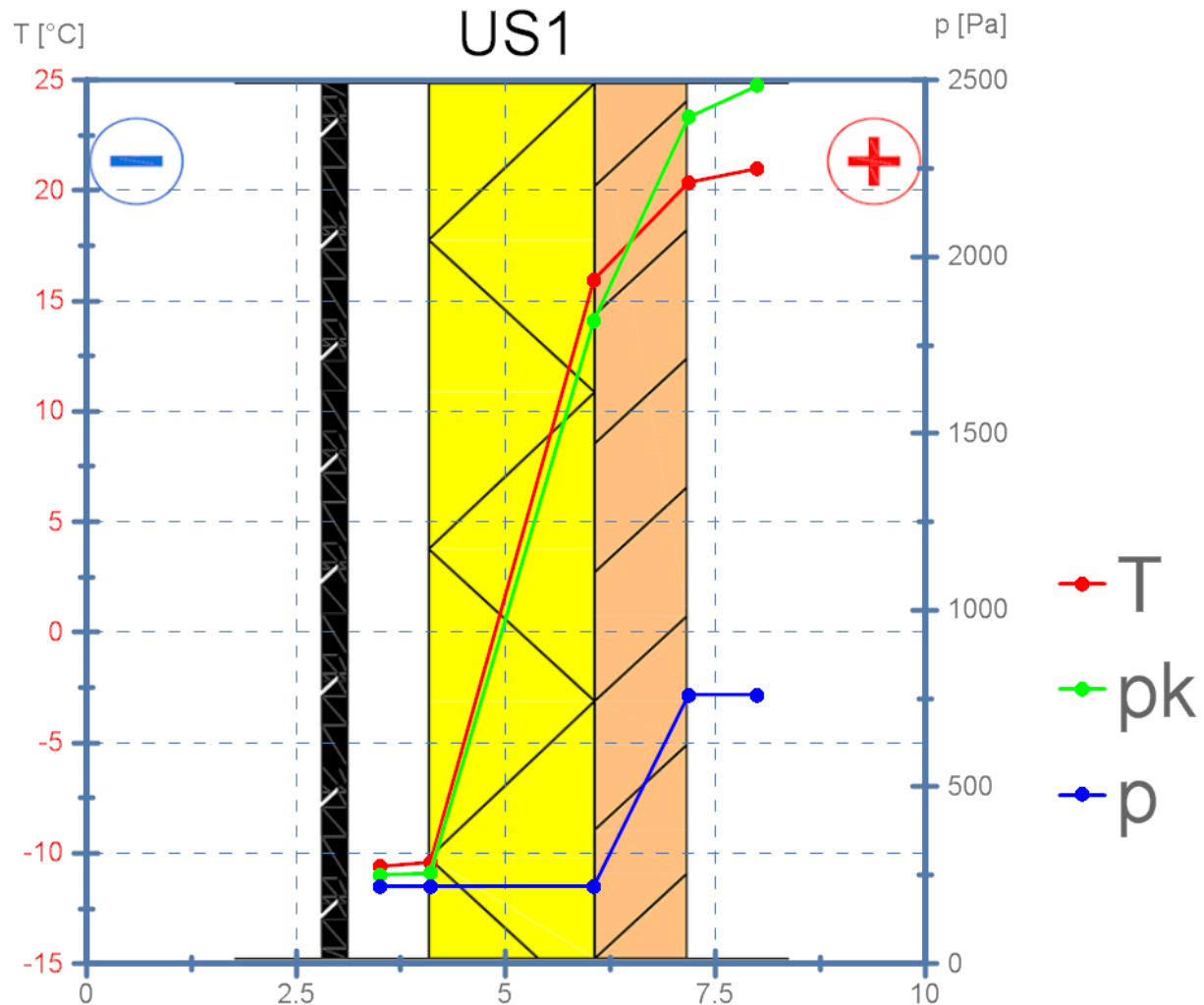
Kuivumisajanjakson suhteelliseksi kosteudeksi saatiin taulukosta 7 Tammi-kuun ja Helmikuun keskiarvo RH = 71 %. Ulkoilman vesihöyryn osapaine ratkaistiin kaavalla 7,  $p = 0,71 * 1\ 665,6 = 1182$  Pa. Sisäilman vesihöyryn osapaine kesällä on  $p_s = 219 + 1182 = 1401$  Pa.

Laskuissa käytettävät rakennusmateriaalien  $\lambda$ -arvot saatiin valmistajien internetsivuilta sekä RakMK osasta C4. Rakennusaineiden vesihöyrynläpäisevyys arvojen  $[\delta_p]$  lähteinä käytettiin rakennusmateriaalien valmistajien ilmoittamia arvoja ja TTY:n julkaisemaa tutkimusraporttia Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona. Raportissa oli mitattu materiaalien ominaisuuksia eri lämpötiloissa, joista tähän työhön käytettäväksi mitoitustilaksi valitsin  $-9,2$  °C, joka on melkein sama kuin laskennassa käytettävä mitoitustilaksi.

Laskuissa CLT-elementtiä käsiteltiin yhtenäisenä männyn pinta puukerrokse-  
na, eikä liimasaumojen vaikutusta otettu huomioon. Tämä valinta lisäsi tar-  
kastelun varmuutta sisäilmasta rakenteeseen tulevien kosteudenkuormien  
vaikutuksille, sillä liimasaumat voivat hieman kasvattaa kerroksen vesi-  
höyrynvastusta. (VTT 2011b.)

U-arvot ja kosteuden kulku rakenteessa laskettiin Excel-taulukko-ohjelmalla.  
Laskelmien tuloksista tuotettiin DIAdem-ohjelmalla kuviot, joissa ilmenee  
lämpötilan, osa- ja kyllästyspaineen liike rakenteessa. U-arvo ja diffuusiotar-  
kasteluissa ei otettu huomioon tuuletusväliä ja ulkoverhousta.

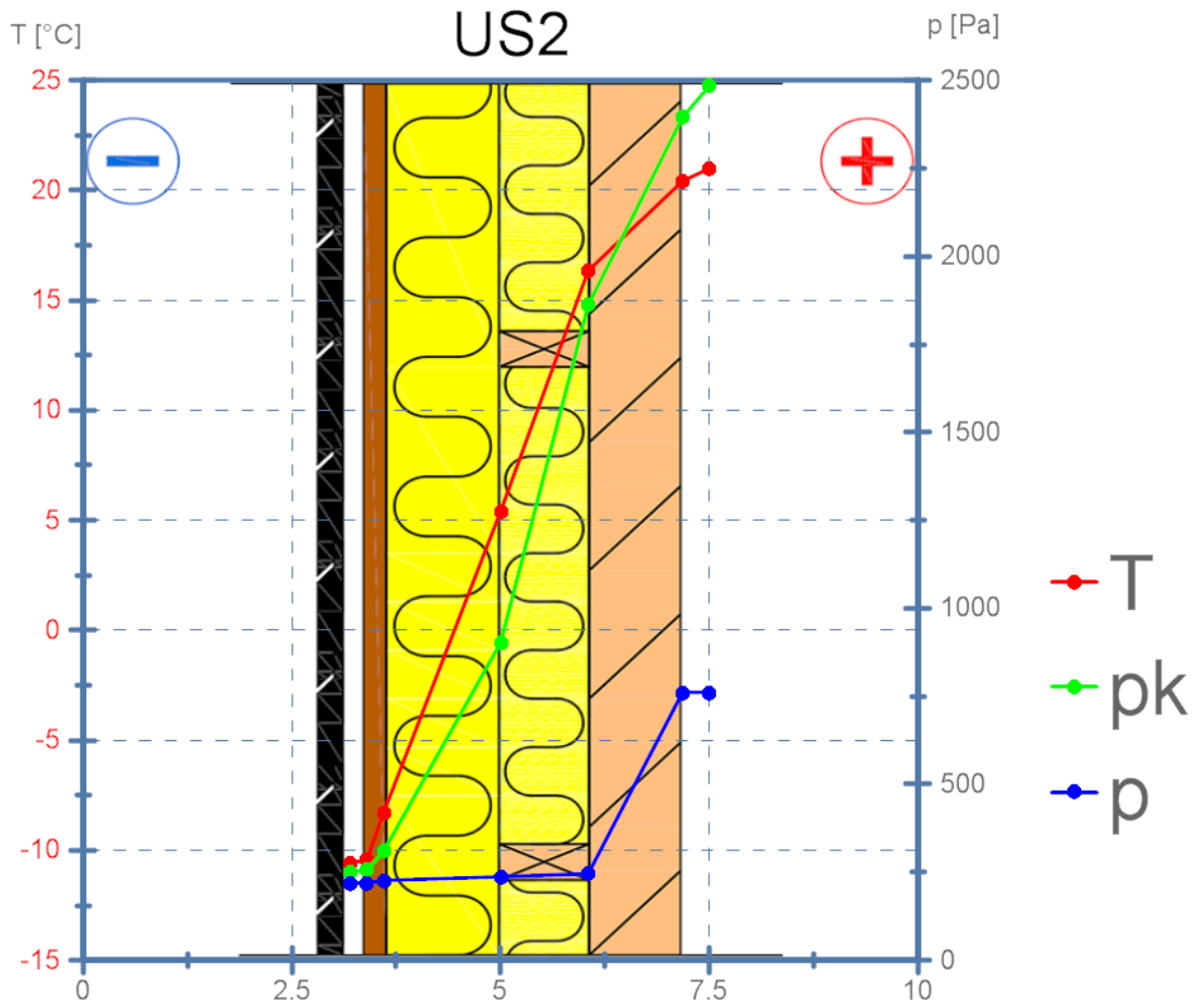
## 7.2 ULKOSEINÄRAKENNE US1



Kuvio 21 Lämpötila, kyllästys- ja osapaine US1-rakenteessa

US1-ulkoseinärakenteen U-arvoksi saatiin  $0,153 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  käyttäen kaavoja 1 ja 2. Kuivumisajanjakson tarkastelua ei tarvitse suorittaa, koska haitallista kosteuden tiivistymistä rakenteeseen ei tapahdu. Laskelmissa todettiin että rakenteeseen ei tiivisty kosteutta eli  $p < p_k$ . Laskelmat ja kosteuden kulku rakenteessa on liitteissä 1 ja 5.

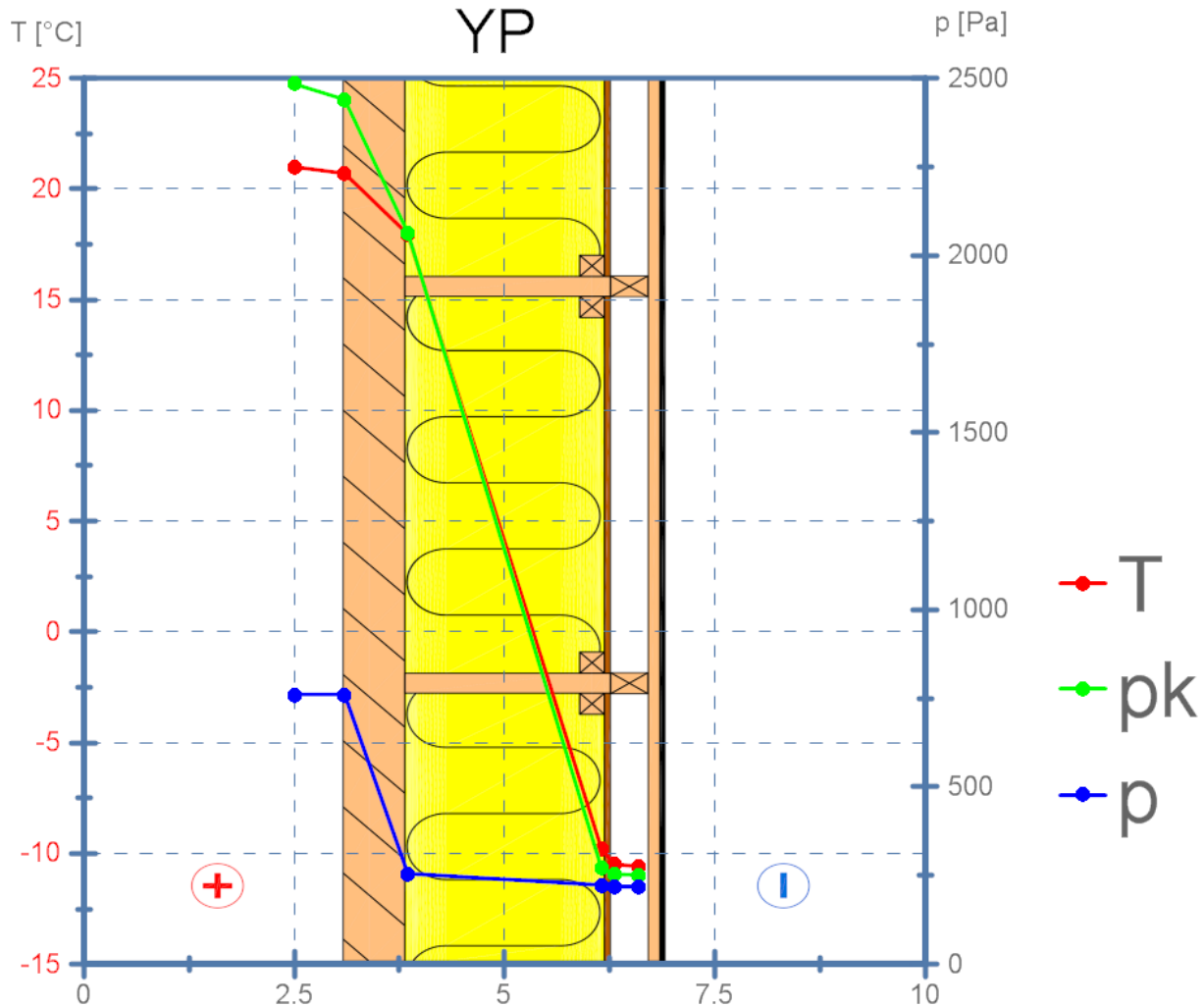
### 7.3 ULKOSEINÄRAKENNE US2



Kuvio 22 Lämpötila, kyllästys- ja osapaine US2-rakenteessa

US2-ulkoseinärakenteen U-arvoksi saatiin  $0,141 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  käyttäen kaavoja 1 ja 2. Kuivumisajanjakson tarkastelua ei tarvitse suorittaa, koska haitallista kosteuden tiivistymistä rakenteeseen ei tapahdu. Laskelmissa todettiin että rakenteeseen ei tiivisty kosteutta eli  $p < p_k$ . Laskelmat ja kosteuden kulku rakenteessa on liitteissä 2 ja 6.

## 7.4 YLÄPOHJARAKENNE YP

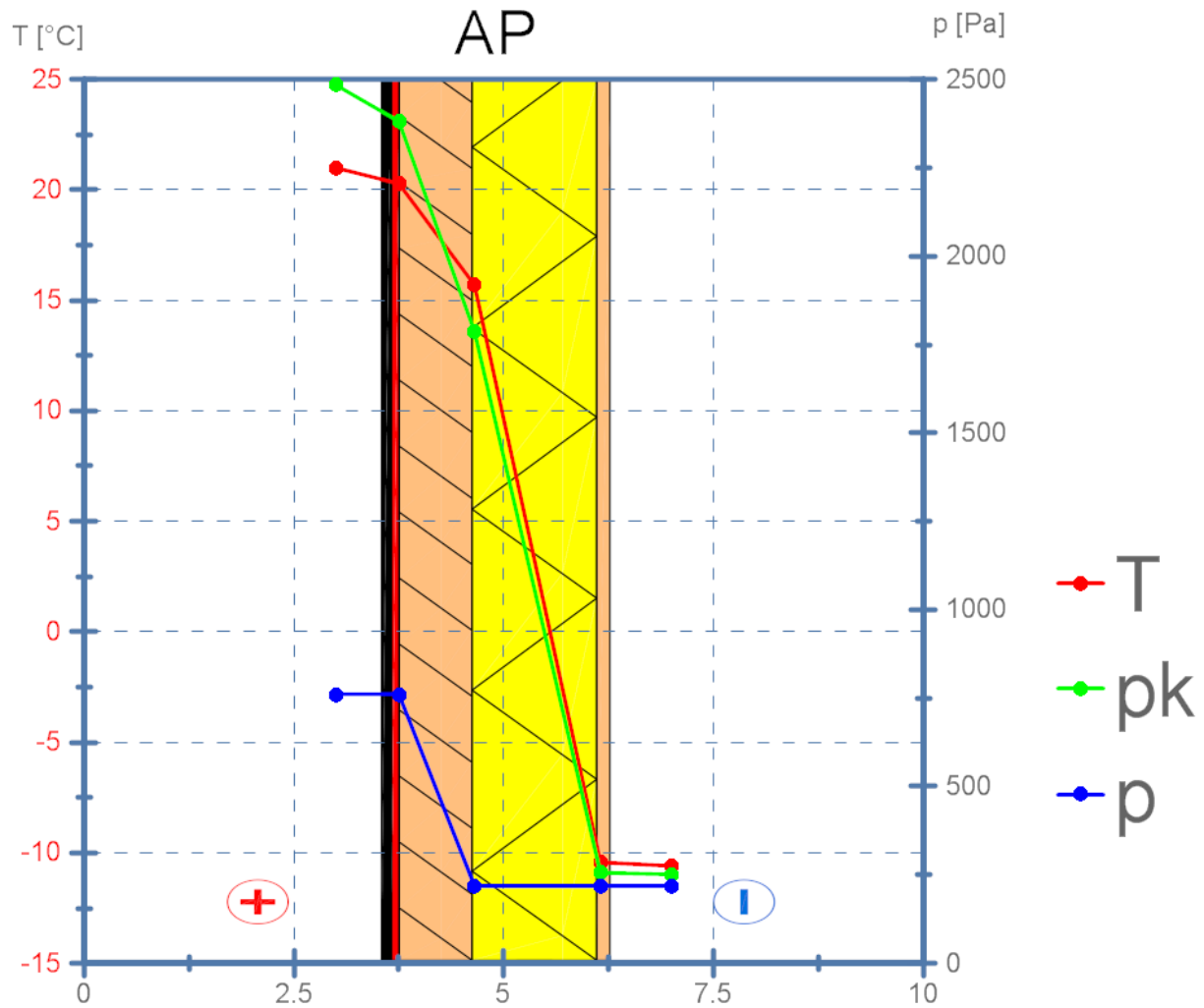


Kuvio 23 Lämpötila, kyllästys- ja osapaine YP-rakenteessa

YP-yläpohjarakenteen  $U$ -arvoksi saatiin  $0,095 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  käyttäen kaavoja 1 ja 2. Kuivumisajanjakson tarkastelua ei tarvitse suorittaa, koska haitallista kosteuden tiivistymistä rakenteeseen ei tapahdu. Laskelmissa todettiin että rakenteeseen ei tiivisty kosteutta eli  $p < p_k$ . Laskelmat ja kosteuden kulku rakenteessa on liitteissä 3 ja 7.



## 7.5 ALAPOHJARAKENNE AP



Kuvio 24 Lämpötila, kyllästys- ja osapaine AP-rakenteessa

AP-alapohjarakenteen U-arvoksi saatiin  $0,134 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  käyttäen kaavoja 1 ja 2. Kuivumisajanjakson tarkastelua ei tarvitse suorittaa, koska haitallista kosteuden tiivistymistä rakenteeseen ei tapahdu. Laskelmissa todettiin että rakenteeseen ei tiivisty kosteutta eli  $p < p_k$ . Laskelmat ja kosteuden kulku rakenteessa on liitteissä 4 ja 8.

## 8 CLT – KOETALON TULOSTEN ANALYYSI

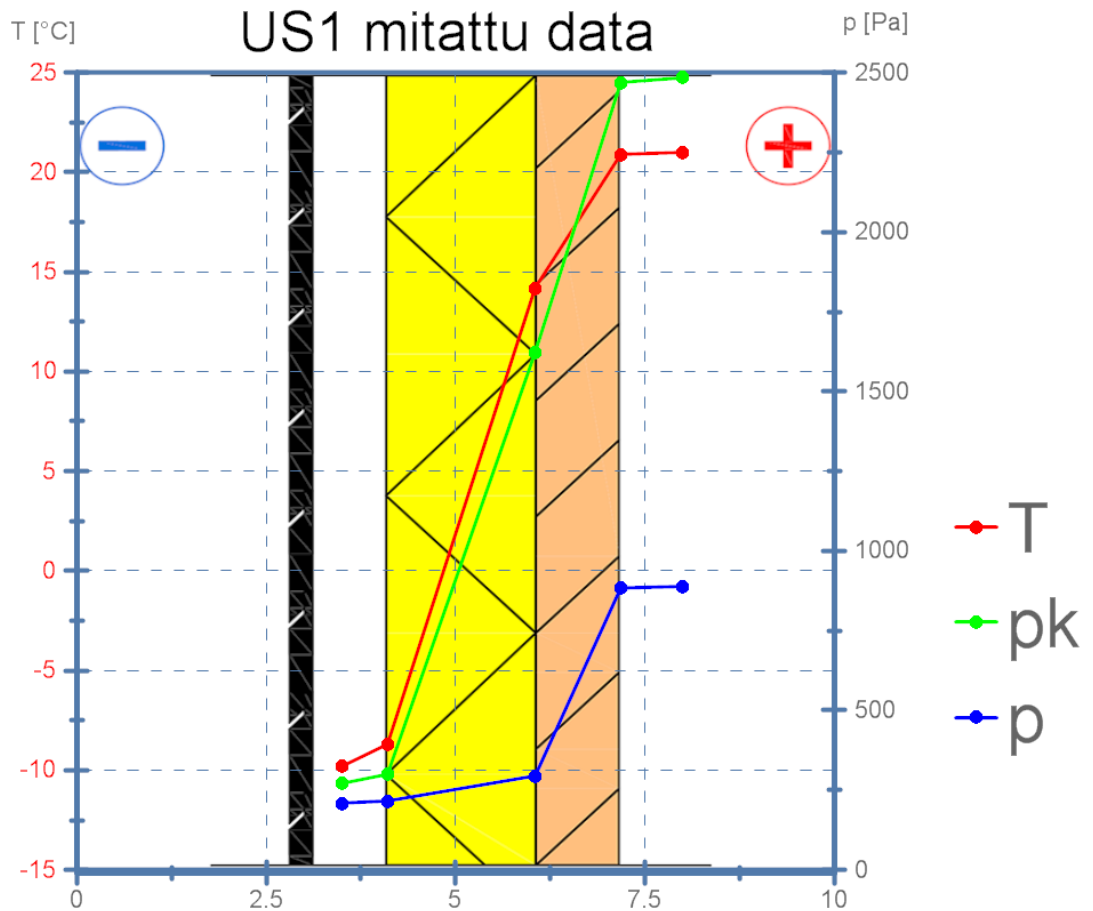
### 8.1 MITTAUSOLOSUHTEET JA TULOSTEN VERRANNOLLISUUS

Seuraavien kappaleiden kuvaajat on tehty CLT-koetalosta saadulla mitatulla datalla. Mittausdataa, jossa on samankaltaiset ulko- ja sisälämpötilat ei ollut paljoa saatavilla, johtuen poikkeuksellisen matalasta ulkolämpötilasta tammi- ja helmikuun aikana. Myös koetalon sisälämpötila oli alhainen verrattaessa laskennalliseen 21 °C asteeseen suurimman osan ajasta käsiteltävänä ajanjaksona. Mittausdataa, joissa oli samankaltaiset olosuhteet saatiin suurin piirtein yhden vuorokauden verran, jonka avulla kuvaajat luotiin. Tulosten verrannollisuuden kannalta olisi laskelmien mittausolosuhteiden kaltaista mittausdataa pitänyt ollut enemmän käytettävissä, jotta tutkimus olisi ollut luotettavampi.

Tammi- ja helmikuun ajanjaksosta ei löytynyt dataa, jossa alapohja rakenteen sisälämpötila olisi laskennallisessa 21°C asteessa. Tästä johtuen jouduttiin mittausdatan haun sisälämpötilaa laskemaan 15–16 °C asteeseen. Vaikkakin alapohjarakenteen sisälämpötilat ovat eriäviä, havaitaan laskennallisen ja mitatun datan avulla tuotetuista kuvaajista yhtenäisyys.

Mittausdatasta saatujen lämpötila- ja suhteellisen kosteuden keskiarvoilla arvoilla laskettiin kuvaajiin olosuhteita vastaava osapaine  $p$  kaavan 7 avulla. Työssä on käytetty Ilmatieteen laitoksen avointa dataa ulkolämpötilan ja suhteellisen kosteuden osalta, koska koetalon ulkopuolella olevien antureiden tulokset eivät olleet luotettavia tammikuussa. Laskennallisten ja mitattujen arvojen verrannollisuuteen vaikuttaa myös laskennalliset pintavastukset  $R_{si}$  ja  $R_{se}$ . Mittausajanjakson aikana talossa ei ollut laskennassa mukana olevaa kosteuslisää, mutta tällä ei ole suurta vaikutusta rakenteen toiminnan tarkasteluun.

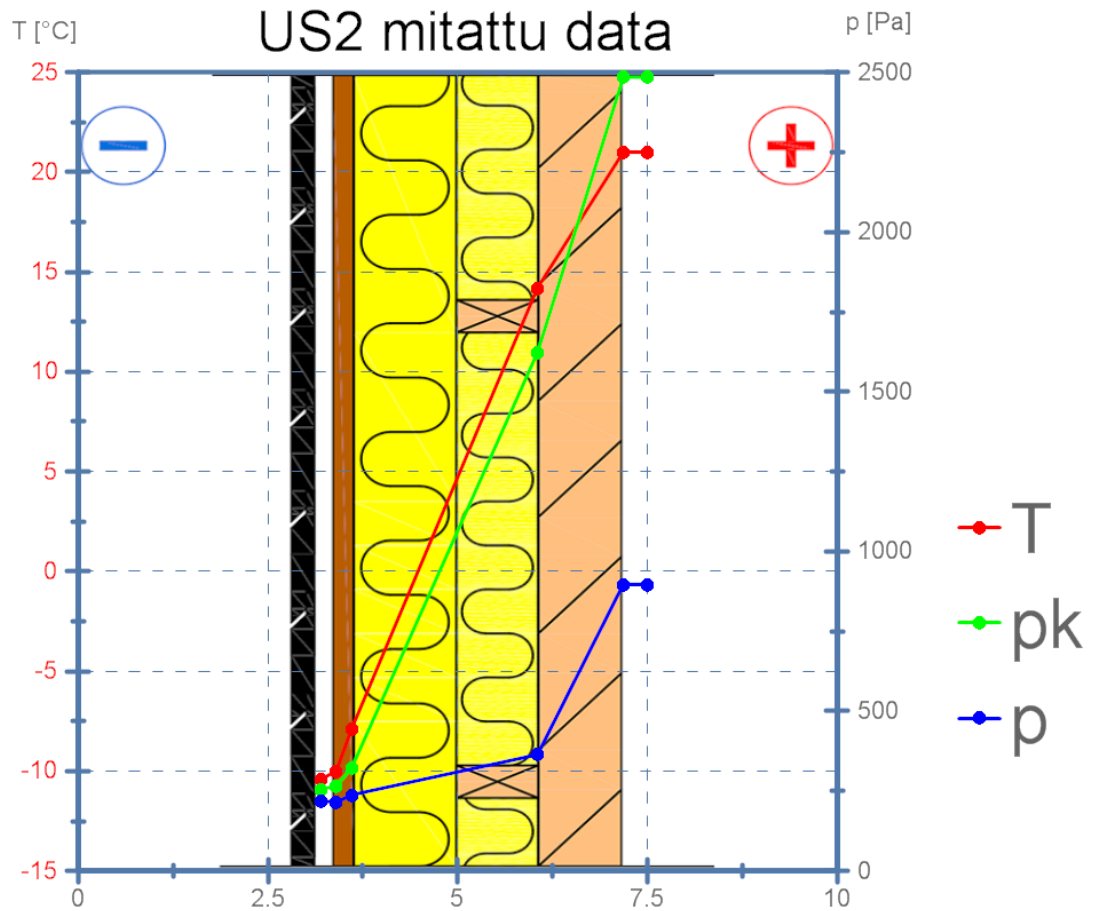
## 8.2 ULKOSEINÄRAKENNE US1



Kuvio 25 Lämpötila, kyllästys- ja osapaine mitatulla datalla US1-rakenteessa

Yllä olevasta kuviosta huomataan yhdenmukaisuus kuvion 21 kanssa, sekä voidaan todeta että haitallista kosteuden tiivistymistä rakenteessa ei tapahdu mitatuilla arvoilla. Kuvaajista huomataan pienet erot lämmön ja kosteuden liikkeessä laskennallisen tarkastelun ja mitatun datan välillä.

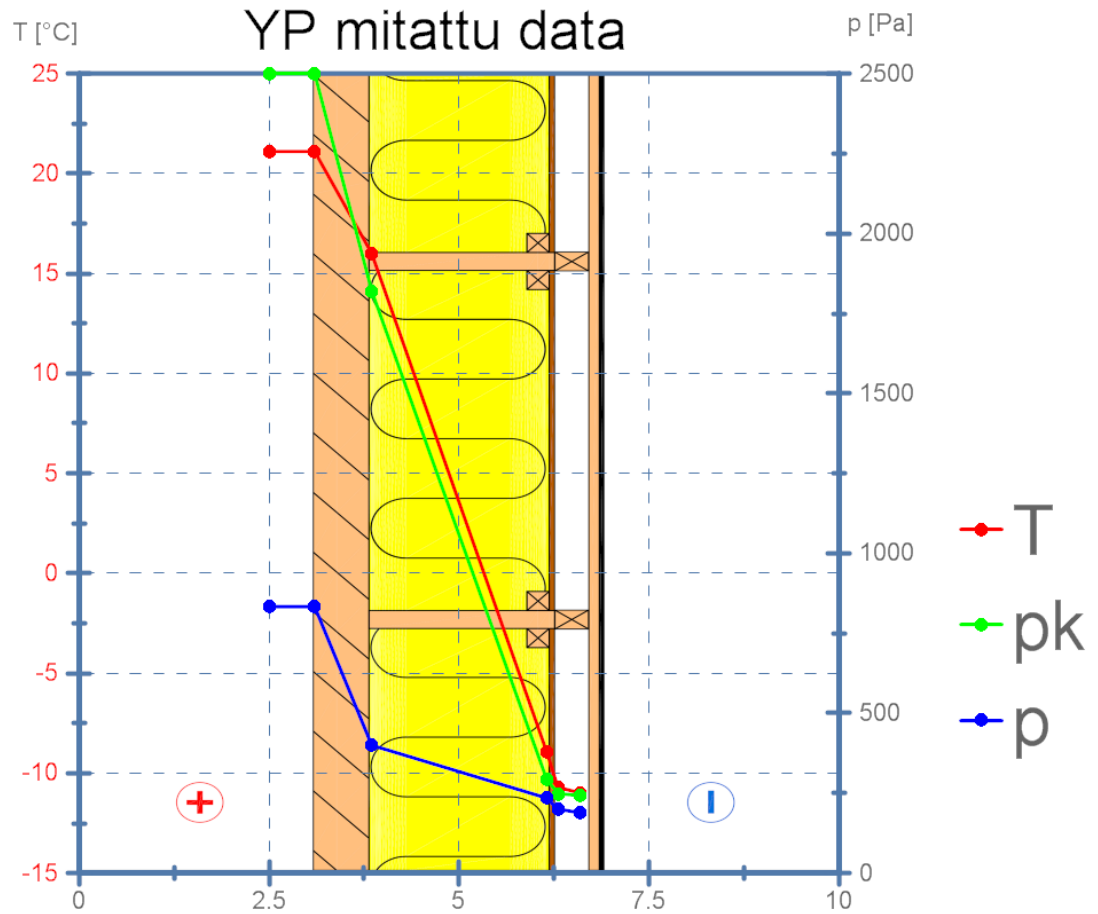
### 8.3 ULKOSEINÄRAKENNE US2



Kuvio 26 Lämpötila, kyllästys- ja osapaine mitatulla datalla US2-rakenteessa

Yllä olevasta kuvioista huomataan yhdenmukaisuus kuvion 22 kanssa, sekä voidaan todeta että haitallista kosteuden tiivistymistä rakenteessa ei tapahdu mitatuilla arvoilla. Kuvaajista huomataan pienet erot lämmön ja kosteuden liikkeessä laskennallisen tarkastelun ja mitatun datan välillä.

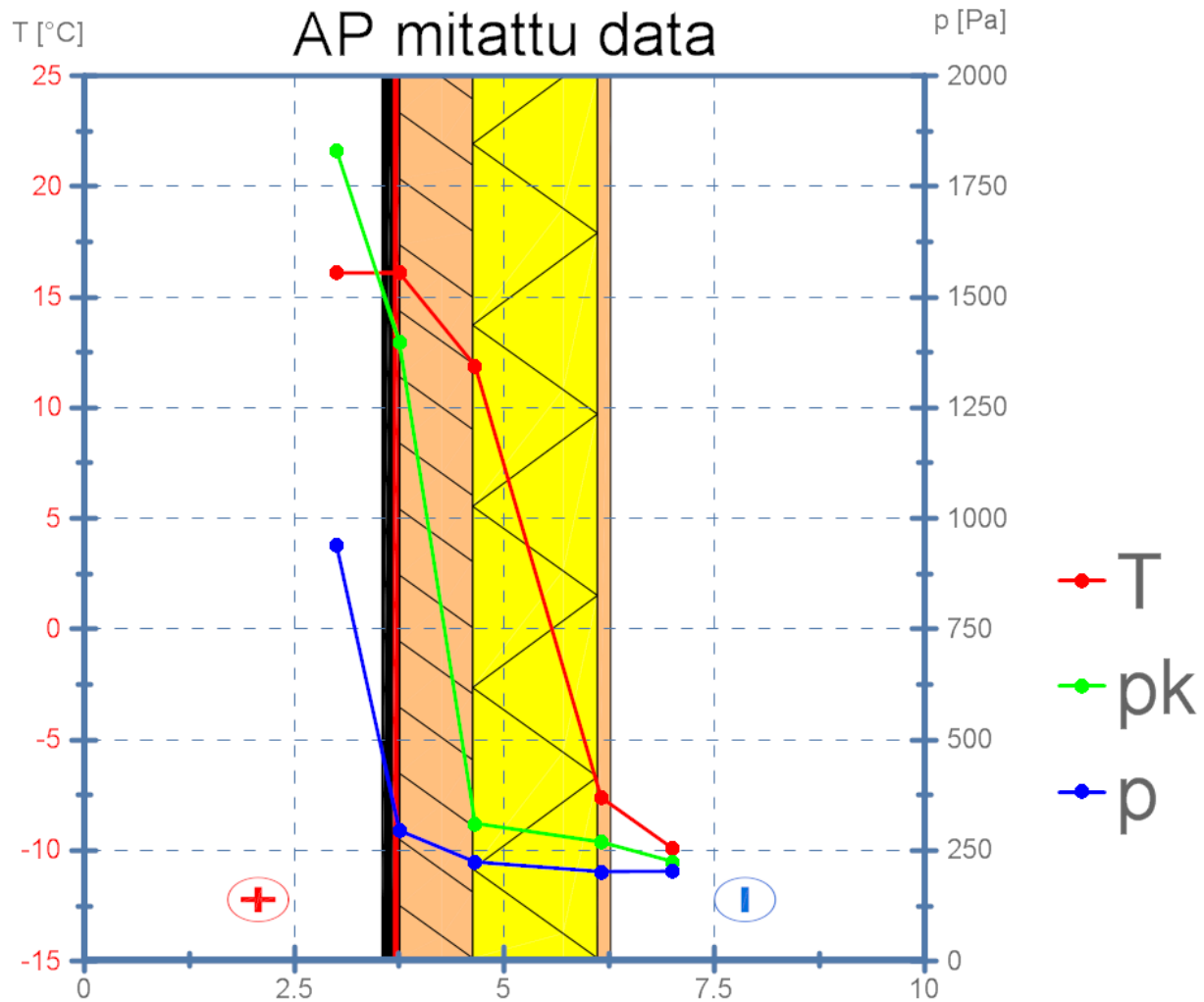
## 8.4 YLÄPOHJARAKENNE YP



Kuvio 27 Lämpötila, kyllästys- ja osapaine mitatulla datalla YP-rakenteessa

Yllä olevasta kuviosta huomataan yhdenmukaisuus kuvion 23 kanssa, sekä voidaan todeta että haitallista kosteuden tiivistymistä rakenteessa ei tapahdu mitatuilla arvoilla. Kuvaajista huomataan pienet erot lämmön ja kosteuden liikkeessä laskennallisen tarkastelun ja mitatun datan välillä.

## 8.5 ALAPOHJARAKENNE AP



Kuvio 28 Lämpötila, kyllästys- ja osapaine mitatulla datalla AP-rakenteessa

Yllä olevasta kuviosta huomataan yhdenmukaisuus kuvion 24 kanssa, sekä voidaan todeta että haitallista kosteuden tiivistymistä rakenteessa ei tapahdu mitatuilla arvoilla. Kuvaajaa ei voida suoraan verrata laskennan avulla tuotettuun kuvaajaan johtuen mittausajanjakson eriävästä sisälämpötilasta.

## 9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Laskennallisen tarkastelun ja mitatun datan tarkastelun avulla voidaan todeta, että CLT-rakenne on toimiva Suomen ilmasto-olosuhteissa. Tämän opinnäytetyön tuloksista saatiin lisää tietoa ja varmistusta CLT-rakenteiden soveltuvuudesta suomalaiseen rakennustapaan.

Opinnäytetyössä käytetty tutkimusmenetelmä oli tarkoituksen mukainen. Työssä olisi voitu myös tutkia rakenteiden toimintaa huomattavan kylmissä olosuhteissa, mutta johtuen lauhasta mittausajanjaksosta, laskennallisella tarkastelulla ei olisi ollut vertailukelpoista mittausdataa käytettävissä.

Laskennallisen tarkastelun avulla saatuja tuloksia ei voida pitää täysin luotettavia, koska työssä käytettäviä materiaalin vesihöyrynläpäisevyys arvoja ei voida pitää täysin oikeina. Tämä johtuu siitä, että kaikilla koetalossa käytettyjen materiaalien valmistajilla ei ollut ilmoittaa omia mitattuja vesihöyrynläpäisevyys arvoja. Voidaan kuitenkin olettaa, että työssä käytetyt arvot ovat oikean suuntaisia ja samalla myös laskennallisella tarkastelulla saadut tulokset ovat oikean suuntaisia.

Laskennallinen tarkastelu olisi pitänyt tehdä korkeammilla lämpötiloilla, jotta vertailukelpoista mittausdataa olisi ollut käytettävissä enemmän. Tämän kuitenkin huomasin vasta maaliskuun lopussa, jolloin sain CLT-koetalon mittausdatan tarkasteluuni. Laskennallista tarkastelua en tehnyt kuitenkaan uusiksi, koska näillä tekemilläni tarkasteluilla voidaan jo todeta rakenteen käyttäytyminen.

Työssä ei tutkittu julkisivun ilmansuunnan sekä tumman- ja vaalean julkisivun vaikutusta rakennusfysikaaliseen toimintaan, sillä tammi- ja helmikuun aikana ei näillä ole suurta vaikutusta. Keväällä näillä kahdella tekijällä on kuitenkin suuri vaikutus, johtuen auringonsäteilystä.

Mitattua dataa olisi pitänyt olla enemmän, jotta opinnäytetyössä tehtyä tarkastelua olisi voitu pitää luotettavampana. Tästä huolimatta voidaan todeta rakenteen oikeanlainen toiminta ja sitä voidaan pitää luotettavana. Tätä ole-

tusta lisää laskennallisen tarkastelun ja mitatun datan avulla tehdyn analyysin samankaltaisuus.

Tässä opinnäytetyössä käytetyn vähäisen mittausdatan vuoksi olisi hyvä tehdä opinnäytetyö, jossa tehtäisiin tarkastelu CLT-koetalon rakennusfysikaalisesta toiminnasta myöhemmin kun luotettavaa mittausdataa olisi käytettävissä enemmän. CLT-koetalon toimintaa voitaisiin myös tarkastella opinnäytetyötasolla ääriolosuhteissa, erittäin kylmissä ja lämpimissä sekä tutkia julkisivun sijainnin ja julkisivuverhouksen värin vaikutusta.

CLT-koetalon rakennusfysikaalista toimintaa on tarkoitus seurata keväälle 2015 asti. Arctic Powerin ideana on tuottaa talosta kolmen kuukauden välein raportti, joissa esitetään mittausdatan avulla tehty analyysi rakenteen toiminnasta. Näissä raporteissa on tarkoitus tutkia mm. julkisivun sijainnin vaikutusta, homehallin avulla rakenteen homeindeksiä, vertailla julkiverhouksen värin vaikutusta rakenteen toimintaan sekä esitellä mineraali- ja puuvillan ominaisuuksien eroavaisuutta. Rakennusfysikaalisen toiminnan ja muiden tutkittavien aiheiden etenemistä voi seurata [www.kiintopuu.fi](http://www.kiintopuu.fi) internetsivulla.



## LÄHTEET

- Arctic Power 2014a. Tilat ja laitteet. Osoitteessa <http://www.arcticpower.fi/fi/tilat-ja-laitteet/>. 10.3.2014.
- 2014b. Arctic Power. Osoitteessa <http://www.arcticpower.fi/fi/arctic-power/>. 10.3.2014.
- Aalto, J. – Karlsson, P. – Kaukoranta, J-P. – Pirinen, P. – Ruuhela, P. – Simola, H. 2012. Tilastoja Suomen ilmastosta 1981–2010. Osoitteessa [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/35880/Tilastoja\\_Suomen\\_ilmastosta\\_1981\\_2010.pdf?sequence=4](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/35880/Tilastoja_Suomen_ilmastosta_1981_2010.pdf?sequence=4). 13.2.2014.
- Autioniemi, J. 2014. CLT-koetalo Mittaus- ja tiedonkeruujärjestelmän dokumentaatio. Arctic Power Ei julkinen.
- Björkholtz, D. 1997. Lämpö ja kosteus rakennusfysiikka. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- Digipolis Oy 2011. Kiintopuuesitys. Osoitteessa <http://www.digipolis.fi/media/puu-rake/kiintopuu-esitys-8.12.11.pdf>. 26.11.2013.
- Digipolis Oy 2013. CLT Kiintopuu. Osoitteessa <http://www.kiintopuu.fi/>. 5.11.2013.
- FPIinnovations 2012. CLT Handbook. Cross-Laminated Timber. Osoitteessa <http://www.scribd.com/doc/158070273/Clt-Handbook-2012>. 28.11.2013.
- Kokko, E. – Ojanen, T. – Salonvaara, M. – Hukka, A. – Viitanen, H. 1999. Puurakenteiden kosteustekninen toiminta. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT).
- Puuinfo 2013. Stora Enson CLT-levyt (Cross-laminated timber). Osoitteessa <http://www.puuinfo.fi/tuotteet/stora-enson-clt-levyt-cross-laminated-timber-0>. 21.11.2013.

Rafnet-ryhmä 2004. Rakennusfysiikkaa rakennusinsinööreille. Kosteus. Osoitteessa [http://www.tekniikka.oamk.fi/~kimmoi/talrakjatko/kosteus\\_27092004.pdf](http://www.tekniikka.oamk.fi/~kimmoi/talrakjatko/kosteus_27092004.pdf). 21.10.2013.

RakMK 2003 = Rakentamismääräyskokoelma C4: Lämmöneristys, ohjeet.

- 2007 = Rakentamismääräyskokoelma D5: Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta.
- 2010 = Rakentamismääräyskokoelma C3: Rakennuksen lämmöneristys määräykset.
- 2010 = Rakentamismääräyskokoelma D3: Rakennuksen energiatehokkuus, määräykset ja ohjeet.

RT 1999= Kosteus rakennuksissa 05-10710. Rakennustietosäätiö.

Suomen Standardisoimisliitto SFS ry 2011. CE-merkintä rakennustuotteisiin 2013 mennessä. Osoitteessa <http://www.sfs.fi/files/307/ce-merkinta2013.pdf>. 7.1.2014.

Siikanen U. 2008. Puurakentaminen. Helsinki: Rakennustieto Oy.

Stora Enso Building Solutions 2012. Osoitteessa <http://www.storaenso.com/products/wood-products/products/buildingsystems/Documents/Building%20Solutions%20Folder%20-%20FI.pdf> . 21.11.2013.

Stora Enso Oy 2011. Rethink construction. Rakentamisen uusi aikakausi. Osoitteessa <http://www.eridomic.fi/pdf/StoraEnsoCLTfi.pdf>. 26.11.2013.

Stora Enso Oy 2012. CLT-Elementit. Osoitteessa <http://www.storaenso.com/products/wood-products/products/elements/cls-elementit/Pages/default.aspx>. 25.11.2013.

- Styf, M. 2009. Jäähallin rakenteet. Insinööriyö. Osoitteessa <http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/2963/inssi.pdf?sequence=1>. 26.11.2013.
- Tolppanen, J. – Karjalainen, M. – Lahtela, T. – Viljakainen, M. 2013. Suomalainen puukerrostalo - Rakenteet, suunnittelu ja rakentaminen. Helsinki: Opetushallitus.
- Vahanen Oy. Rakenteiden lämpö- ja kosteustekniikan perusteita. Osoitteessa [http://www.betonyhdistys.fi/index.php?\\_\\_EVIA\\_WYSIWYG\\_FILE=1536&name=file](http://www.betonyhdistys.fi/index.php?__EVIA_WYSIWYG_FILE=1536&name=file). 21.10.2013.
- Vatanen, M. Vaipparakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen tutkimuksen mittaussektorit ja mittauspisteet. Arctic Power. Osoitteessa <http://kiintopuu.sivuviidakko.fi/media/kiintopuu/mittauspisteet-29-08-2013.pdf>. 3.2.2014.
- Vinha, J. – Käkelä, P. 1999. Vesihöyryn siirtyminen seinärakenteissa diffuusion ja konvektion vaikutuksesta. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu.
- VTT 2011a. Homeen kasvun mallin kehitystyö. Osoitteessa <http://www.rakennusteollisuus.fi/frame>. 18.12.2013.
- CLT –rakenteiden rakennusfysikaalinen toimivuus. Osoitteessa <http://kiintopuu.sivuviidakko.fi/media/kiintopuu/vtt-clt-rakennusfysikaalinen-toimivuus-19-12-2011.pdf>. 14.3.2014.

**LIITTEET**

Ulkoseinä US1 U-arvolaskenta	Liite 1
Ulkoseinä US2 U-arvolaskenta	Liite 2
Yläpohja YP U-arvolaskenta	Liite 3
Alapohja AP U-arvolaskenta	Liite 4
Kosteuden tiivistyslaskelma US1-rakenne	Liite 5
Kosteuden tiivistyslaskelma US2-rakenne	Liite 6
Kosteuden tiivistyslaskelma YP-rakenne	Liite 7
Kosteuden tiivistyslaskelma AP-rakenne	Liite 8
Mittausdata US1 sektorit 2, 5 ja 7	Liite 9
Mittausdata US2 sektorit 1, 6 ja 8	Liite 10
Mittausdata YP sektorit 11 ja 12	Liite 11
Mittausdata AP sektorit 9 ja 10	Liite 12

## Ulkoseinä US1 U-arvolaskenta

## Liite 1

<u>Rakennetyyppi</u>				US1	
<u>Rakennekerrokset</u>					
R=d/λ					
	Materiaalin lämmönjohtavuus λ [W/(m*K)]	Paksuus d [m]			[(m2K)/W]
<u>Sisäpuoli</u>					
Sisäpuolinen lämmön vastus			Rsi		0,13
1. CLT-levy	0,11	0,1	R1		0,9090909
2.Tuulensuojaeriste, Paroc Cortex One	0,033	0,18	R2		5,4545455
5.Ulkoverhouslauta UYW	0,12	0,028	R5		0,2333333
Ulkopuolinen lämmönvastus			Rse		0,04
<u>Ulkopuoli</u>					
			RT		6,5336364
					[W/(m2K)]
			U= 1/RT	U-arvo	<b>0,1530541</b>

## Ulkoseinä US2 U-arvolaskenta

## Liite 2

<u>Rakennetyyppi</u>				US2	
<u>Rakennekerrokset</u>					
R= d/λ					
	Suhteellinen Osuus	Materiaalin lämmönjohtavuus λ [W/(m*K)]	Paksuus d [m]		[(m2K)/W]
<u>Sisäpuoli</u>					
Sisäpuolinen lämmön vastus				Rsi	0,13
1. CLT-levy		0,11	0,1	R1	0,9090909
2.Lämmöneriste, Ekovilla	0,93	0,039	0,1	R2	2,3846154
2.1 vaakarunko 42x98 k600	0,07	0,12	0,098	R2.1	0,0571667
3.Lämmöneriste, Ekovilla	0,93	0,039	0,125	R3	2,9807692
3.1 pystyrunko 42x123 k 600	0,07	0,12	0,123	R3.1	0,07175
4.Tuulensuojalevy, Runkoleijona 25		0,052	0,025	R4	0,4807692
Ulkopuolinen lämmönvastus				Rse	0,04
<u>Ulkopuoli</u>					
				RT	7,0541614
					[W/(m2K)]
			U=1/RT	U-arvo	<b>0,1417603</b>

## Yläpohja YP U-arvolaskenta

## Liite 3

<u>Rakennetyyppi</u>				YP	
<u>Rakennekerrokset</u>					
R= d/λ					
	Suhteellinen Osuus	Materiaalin lämmönjohtavuus λ [W/(m*K)]	Paksuus d [m]		
<u>Sisäpuoli</u>					[(m2K)/W]
Sisäpuolinen lämmön vastus				Rsi	0,1
1. CLT-levy		0,11	0,1	R1	0,9090909
2. Puhallusvilla	0,95	0,041	0,39	R2	9,0365854
2.1 Kattopalkit 45x400 Kerto-S k 900	0,05	0,12	0,39	R2.1	0,1625
3. Tuulensuojalevy, Tuulileijona 12		0,052	0,012	R3	0,2307692
Ulkopuolinen lämmönvastus				Rse	0,04
<u>Ulkopuoli</u>					
				RT	10,478946
					[W/(m2K)]
				U=1/RT	U-arvo
					<b>0,0954294</b>

## Alapohja AP U-arvolaskenta

## Liite 4

<u>Rakennetyyppi</u>				AP	
<u>Rakennekerrokset</u>					
R= d/λ					
		Materiaalin lämmönjohtavuus λ [W/(m*K)]	Paksuus d [m]		
<u>Sisäpuoli</u>					[(m2K)/W]
Sisäpuolinen lämmön vastus				Rsi	0,17
1. CLT-levy		0,11	0,12	R1	1,090909
Paroc Cortex One		0,033	0,205	R2	6,212121
Ulkopuolinen lämmönvastus				Rse	0,04
<u>Ulkopuoli</u>					
				RT	7,51303
					[W/(m2K)]
				U=1/RT	U-arvo
					<b>0,133102</b>

## Kosteuden tiivistyslaskelma US1-rakenne

## Liite 5

Tiivistyslaskelma										
Rakenne						Lämpötilaa	Vesihöyryn			
US1						vastaava	osapaineen			
	Materiaalin					vesihöyryn	kerrosten			
	Rakenteen paksuus	Lämmönjohtavuus	Lämmönvastus	Lämpötilan muutos	Lämpötila	kyllästyspaine	läpäisevyys	vesihöyryn	muutos	kerroksen rajassa
	d	$\lambda n$	R	$\Delta t$	T	pk	$\delta p$	Z	$\Delta p$	p
	[m]	[W/(m*K)]	[(m2K)/W]	[C]	C	[Pa]	[kg/msPA]	[m2sPa/(Pa)]		[Pa]
Ulkoilma (Rse)			0,04	-0,19	-10,60	251,6				219
					-10,41	256,4				219
Paroc Cortex One	0,18	0,033	5,454	-26,38	15,97	1820	5E-09	4E+07	0,389959229	219,39
CLT-levy	0,1	0,11	0,909	-4,40	20,37	2395	2E-12	5E+10	541,6100408	761
Sisäilma (Rsi)			0,13	-0,63	21,00	2484				761
$\Sigma$	0,28		6,533					5E+10	542	

## Kosteuden tiivistyslaskelma US2-rakenne

## Liite 6

Tiivistyslaskelma										
Rakenne						Lämpötilaa	Vesihöyryn			
US2						vastaava	osapaineen			
	Materiaalin					vesihöyryn	kerrosten			
	Rakenteen paksuus	Lämmönjohtavuus	Lämmönvastus	Lämpötilan muutos	Lämpötila	kyllästyspaine	läpäisevyys	vesihöyryn	muutos	kerroksen rajassa
	d	$\lambda n$	R	$\Delta t$	T	pk	$\delta p$	Z	$\Delta p$	p
	[m]	[W/(m*K)]	[(m2K)/W]	[C]	C	[Pa]	[kg/msPA]	[m2sPa/(Pa)]		[Pa]
Ulkoilma (Rse)			0,04	-0,18	-10,60	251,6				219
					-10,42	256,4				219
Tuulensuojalevy Runkoleijon	0,025	0,052	0,481	-26,77	-8,27	310,9	3,3E-11	8E+08	7,803664921	226,8037
Ekovilla-pystyrunko	0,125	(0,039+0,12)	3,053	13,68	5,41	903,2	1,21E-10	1E+09	10,64136126	237,445
Ekovilla+vaakarunko	0,1	(0,039+0,12)	2,441	10,94	16,35	1861,7	1,21E-10	8E+08	8,513089005	245,9581
CLT-levy	0,1	0,011	0,909	-4,07	20,42	2395	2E-12	5E+10	515,0418848	761
Sisäilma (Rsi)			0,13	-0,58	21,00	2484				761
$\Sigma$	0,125		7,054					5E+10	542	

## Kosteuden tiivistyslaskelma YP-rakenne

## Liite 7

Tiivistyslaskelma										
Rakenne						Lämpötilaa	Vesihöyryn			
YP						vastaava	osapaineen			
	Materiaalin					vesihöyryn	kerrosten			
	Rakenteen paksuus	Lämmönjohtavuus	Lämmönvastus	Lämpötilan muutos	Lämpötila	kyllästyspaine	läpäisevyys	vesihöyryn	muutos	kerroksen rajassa
	d	$\lambda n$	R	$\Delta t$	T	pk	$\delta p$	Z	$\Delta p$	p
	[m]	[W/(m*K)]	[(m2K)/W]	[C]	C	[Pa]	[kg/msPA]	[m2sPa/k (Pa)]		[Pa]
Ulkoilma (Rse)			0,04	0,12	-10,60	251,6				219
					-10,48	254				219
Tuulensuojalevy Tuulileijona 12	0,012	0,052	0,231	0,70	-9,78	271,2	2,8E-11	4,29E+08	4,3295117	223,3295
Puhallusvilla(ekovilla) + kattopalkki	0,39	(0,039+0,12)	9,199	27,74	17,96	2064	1,21E-10	3,22E+09	32,5607904	255,8903
CLT-levy	0,1	0,033	0,909	2,74	20,70	2439,9	2E-12	5E+10	505,109698	761
Sisäilma (Rsi)			0,1	0,30	21,00	2484				761
$\Sigma$	0,112	0,085	10,47876923					5,37E+10	542	

## Kosteuden tiivistyslaskelma AP-rakenne

## Liite 8

Tiivistyslaskelma											
Rakenne											
US1	Materiaalin					Lämpötilaa vastaava		Vesihöyryn			
Rakenteen paksuus	Lämmönjohtavuus	Lämmönvastus	Lämpötilan muutos	Lämpötila	Lämpötila	kyllästyspaine	läpäisevyys	vesihöyryn muutos	Kerroste osapaineen	Vesihöyryn osapaine	
d	λn	R	Δt	T	T	pk	δp	Z	Δp	p	
[m]	[W/(m*K)]	[(m2K)/W]	[C]	C	C	[Pa]	[kg/msPA]	[m2sPa/(Pa)]	[Pa]	[Pa]	
Ulkoilma (Rse)			0,04	-0,17	-10,60	251,6				219	
Paroc Cortex One	0,205	0,033	6,212121212	-26,13	-10,43	256,4				219	
CLT-levy	0,12	0,11	1,090909091	-4,59	15,70	1786,4	5E-09	4E+07	0,370113756	219,3701	
Sisäilma (Rsi)			0,17	-0,72	20,28	2381,1	2E-12	6E+10	541,6298862	761	
					21,00	2484				761	
Σ	0,325		7,513030303						6E+10	542	

## Mittausdata US1 sektorit 2, 5 ja 7

## Liite 9

Mitattu data													
US1													
Sektorit 2													
	Outside °C	Outside %	Outside_FMI °C	Outside_F	Layer 4 °C	Layer 3 °C	Layer 2 °C	Layer 1 °C	Layer 4 %	Layer 3 %	Layer 2 %	Layer 1 %	
2014-01-29 12:00:00.000000	-10,7	66,3	-12,5	91	-10,4	-8,9	13,5	20,9	77,4	70,8	19,2	40,6	
2014-01-29 13:00:00.000000	-10,6	66,2	-12,4	90,5	-10,2	-8,6	13,7	21,1	77,3	70,7	19,3	37,3	
2014-01-29 14:00:00.000000	-10,3	66,8	-12,1	91	-10	-8,5	13,8	21,2	77,5	70,8	19,3	35,6	
2014-01-29 16:00:00.000000	-9,6	71,2	-10,8	90,8	-9,5	-8	14,3	20,9	78,4	71,9	19,4	39,1	
2014-01-29 17:00:00.000000	-10,9	78,1	-11,2	88,2	-9,4	-7,8	14,4	20,6	78	71,4	19,5	35,5	
	-10,42	69,72	-11,8	90,3	-9,9	-8,36	13,94	20,94	77,72	71,12	19,34	37,62	
Sektorit 5													
	Outside °C	Outside %	Outside_FMI °C	Outside_F	Layer 4 °C	Layer 3 °C	Layer 2 °C	Layer 1 °C	Layer 4 %	Layer 3 %	Layer 2 %	Layer 1 %	
2014-01-29 11:00:00.000000	-10,9	65,8	-12,7	91	-10,4	-10	13,6	20,5	75,4	73	16,9	29,3	
2014-01-29 16:00:00.000000	-9,6	71,2	-10,8	90,8	-9,4	-9	14,5	21,4	77,1	74,8	17	36,7	
2014-01-29 17:00:00.000000	-10,9	78,1	-11,2	88,2	-9,3	-8,8	14,7	21,2	76,2	73,7	17,2	33,2	
2014-01-29 19:00:00.000000	-11	78	-10,9	86,8	-9,3	-8,8	15	21	75,8	72,9	17	32	
	-10,6	73,275	-11,4	89,2	-9,6	-9,15	14,45	21,025	76,125	73,6	17,025	32,8	
Sektorit 7													
	Outside °C	Outside %	Outside_FMI °C	Outside_F	Layer 4 °C	Layer 3 °C	Layer 2 °C	Layer 1 °C	Layer 4 %	Layer 3 %	Layer 2 %	Layer 1 %	
2014-01-29 12:00:00.000000	-10,7	66,3	-12,5	91	-10,2	-9	14	20,6	77	71,7	17,6	38,7	
2014-01-29 13:00:00.000000	-10,6	66,2	-12,4	90,5	-10	-8,8	14,1	20,7	76,9	71,2	17,7	36,6	
2014-01-29 14:00:00.000000	-10,3	66,8	-12,1	91	-9,9	-8,7	14,4	20,8	77,1	71,7	17,7	35,4	
	-10,533333	66,43333	-12,33333333	90,83333	-10,0333	-8,83333	14,16667	20,7	77	71,53333	17,66667	36,9	
Kaikkien sektoreiden													
Keskiarvot	-10,5	70,1	-11,8	90,1	-9,8	-8,7	14,2	20,9	77,0	72,1	18,2	35,8	
Lasketut kyllästyspaineet ja osapaineet	Ulko p	Ulko pk	Layer 1 p	Layer 1 pk	Layer 2 p	Layer 2 pk	Layer 3 p	Layer 3 pk	Layer 4 p	Layer 4pk			
Laskettu keskiarvoilla	208	271	884	2469	295	1623	216	300	209	271			



## Mittausdata US2 sektorit 1,6 ja 8

## Liite 10

Mitattu data												
US2												
Sektorit	Outside °C	Outside %	Outside_F	Outside_F	Layer 4 °C	Layer 3 °C	Layer 2 °C	Layer 1 °C	Layer 4 %	Layer 3 %	Layer 2 %	Layer 1 %
Sektorit 1												
2014-01-29 12:00:00.000	-10,7	66,3	-12,5	91	-9,9	-7,1	14	20,9	83,6	74,6	22,7	40,6
2014-01-29 13:00:00.000	-10,6	66,2	-12,4	90,5	-9,6	-6,9	14,1	21,1	83,8	74,7	22,7	37,3
2014-01-29 14:00:00.000	-10,3	66,8	-12,1	91	-9,4	-6,8	14,2	21,2	83,8	74,8	22,7	35,6
2014-01-29 16:00:00.000	-9,6	71,2	-10,8	90,8	-9	-6,5	14,6	20,9	84	74,8	22,7	39,1
2014-01-29 17:00:00.000	-10,9	78,1	-11,2	88,2	-8,9	-6,4	14,8	20,7	83,9	74,8	22,7	35,5
	-10,42	69,72	-11,8	90,3	-9,36	-6,74	14,34	20,96	83,82	74,74	22,7	37,62
Sektorit 6												
2014-01-29 11:00:00.000	-10,9	65,8	-12,7	91	-11,3	-9	14,3	20,5	79,5	74,7	21,8	29,3
2014-01-29 16:00:00.000	-9,6	71,2	-10,8	90,8	-10,2	-8,4	14,8	21,4	80,9	74,8	21,5	36,7
2014-01-29 17:00:00.000	-10,9	78,1	-11,2	88,2	-10,1	-8,1	15	21,2	80	74,8	21,5	33,2
2014-01-29 18:00:00.000	-11,1	76,7	-11	86,5	-10,2	-8	15,1	21	79,3	74,8	21,4	32,7
2014-01-29 19:00:00.000	-11	78	-10,9	86,8	-10,2	-8,1	15,2	21	79,5	74,8	21,4	32
	-10,7	73,96	-11,32	88,66	-10,4	-8,32	14,88	21,02	79,84	74,78	21,52	32,78
Sektorit 8												
2014-01-29 12:00:00.000	-10,7	66,3	-12,5	91	-10,5	-8,9	13,2	20,9	78,9	72,2	23,1	38,6
2014-01-29 13:00:00.000	-10,6	66,2	-12,4	90,5	-10,4	-8,7	13,2	21	78,6	72,2	23,1	36,6
2014-01-29 14:00:00.000	-10,3	66,8	-12,1	91	-10,2	-8,6	13,4	21,2	78,6	72,3	23,1	35,3
2014-01-29 15:00:00.000	-9,9	67,1	-11,5	91	-10,1	-8,3	13,5	21,1	78,9	72,4	23,1	40,5
2014-01-29 16:00:00.000	-9,6	71,2	-10,8	90,8	-9,9	-8,2	13,7	20,6	79,4	72,4	23,1	39
	-10,22	67,52	-11,86	90,86	-10,22	-8,54	13,4	20,96	78,88	72,3	23,1	38
Kaikkien sektoreiden keskiarvo	-10,4	70,4	-11,7	89,9	-10,0	-7,9	14,2	21,0	80,8	73,9	22,4	36,1
Lasketut kylästyspainetta ja osapaineet	Ulko p	Ulko pk	Layer 1 p	Layer 1 pk	Layer 2 p	Layer 2 pk	Layer 3 p	Layer 3 pk	Layer 4 p	Layer 4pk		
Laskettu keskiarvoilla	179	256	897	2484	364	1623	238	322	215	266		

## Mittausdata YP sektorit 11 ja 12

## Liite 11

Mitattu data												
Yläpohja												
Sektorit	Outside °C	Outside %	Outside_F	Outside_F	Layer 4 °C	Layer 3 °C	Layer 2 °C	Layer 1 °C	Layer 4 %	Layer 3 %	Layer 2 %	Layer 1 %
Sektorit 11												
2014-01-29 17:00:00.000	-10,9	78,1	-11,2	88,2	-10,6	-9,7	14,8	21,5	81,9	79,8	21,7	35
2014-01-29 18:00:00.000	-11,1	76,7	-11	86,5	-10,6	-9,7	15	21,1	81	79,7	21,5	33,2
2014-01-29 19:00:00.000	-11	78	-10,9	86,8	-10,6	-9,7	15,1	21	81,2	79,7	21,3	32,7
Sektorit 12												
2014-01-29 17:00:00.000	-10,9	78,1	-11,2	88,2	-10,8	-8,1	17,1	21,1	81,1	79,3	22,7	33,5
2014-01-29 18:00:00.000	-11,1	76,7	-11	86,5	-10,8	-8	17,1	20,8	80,1	79,1	22,4	33,2
2014-01-29 19:00:00.000	-11	78	-10,9	86,8	-10,7	-8	17,1	20,8	80,2	79,1	22,2	32,2
Kaikkien sektoreiden keskiarvot	-11,0	77,6	-11,0	87,2	-10,7	-8,9	16,0	21,1	80,9	79,5	22,0	33,3
Lasketut kylästyspainetta ja osapaineet	Ulko p	Ulko pk	Layer 1 p	Layer 1 pk	Layer 2 p	Layer 2 pk	Layer 3 p	Layer 3 pk	Layer 4 p	Layer 4pk		
Laskettu keskiarvoilla	188	242	833	2500	400	1820	235	295	201	249		

## Mittausdata AP sektorit 9 ja 10

## Liite 12

Mitattu data														
Alapohja														
Sektori 9	Outside °C	Outside %	Outside_F	Outside_F	Inside 1.1	Inside 1.1	Layer 4 °C	Layer 3 °C	Layer 2 °C	Layer 1 °C	Layer 4 %	Layer 3 %	Layer 2 %	Layer 1 %
2014-01-29 12:00:00.000	-10,7	66,3	-12,5	91	20,9	40,6	-10	-7,5	11,4	15,3	72,8	66	21,5	51,2
2014-01-29 13:00:00.000	-10,6	66,2	-12,4	90,5	21,1	37,3	-9,9	-7,4	11,5	15	72,7	65,7	21,6	51,1
2014-01-29 14:00:00.000	-10,3	66,8	-12,1	91	21,2	35,6	-9,7	-7,3	11,4	14,9	73,5	66,2	21,6	51
2014-01-29 16:00:00.000	-9,6	71,2	-10,8	90,8	20,9	39,1	-9,1	-6,9	11,3	15,4	75,2	67,3	21,8	51,2
2014-01-29 17:00:00.000	-10,9	78,1	-11,2	88,2	20,7	35,5	-9,2	-6,8	11,3	15,5	73,9	66,6	22	51,2
Sektori 10	Outside °C	Outside %	Outside_F	Outside_F	Inside 1.1	Inside 1.1	Layer 4 °C	Layer 3 °C	Layer 2 °C	Layer 1 °C	Layer 4 %	Layer 3 %	Layer 2 %	Layer 1 %
2014-01-29 12:00:00.000	-10,7	66,3	-12,5	91	20,9	40,6	-10,7	-8,5	12,5	16,5	75,9	69	20,3	51,4
2014-01-29 13:00:00.000	-10,6	66,2	-12,4	90,5	21,1	37,3	-10,6	-8,4	12,5	16,6	75,5	68,9	20,3	51,4
2014-01-29 14:00:00.000	-10,3	66,8	-12,1	91	21,2	35,6	-10,3	-8,3	12,4	16,8	76,4	69,3	20,3	51,5
2014-01-29 16:00:00.000	-9,6	71,2	-10,8	90,8	20,9	39,1	-9,6	-7,7	12,5	17,3	77,8	70	20,5	51,7
2014-01-29 17:00:00.000	-10,9	78,1	-11,2	88,2	20,7	35,5	-9,7	-7,5	12,5	17,3	76,3	69,4	20,7	51,7
Kaikkien sektoreiden Keskiarvot	-10,4	69,7	-11,8	90,3	21,0	37,6	-9,9	-7,6	11,9	16,1	75,0	67,8	21,1	51,3
Lasketut kyllyästyypaine ja osapaineet	Ulko p	Ulko pk	Layer 1 p	Layer 1 pk	Layer 2 p	Layer 2 pk	Layer 3 p	Layer 3 pk	Layer 4 p	Layer 4pk				
Laskettu keskiarvoilla	203	225	940	1832	295	1399	224	331	202	269				