

# **CLT-ulkoseinien toiminta tulevaisuuden ilmastossa**

Juho-Mikko Seppänen

Opinnäytetyö  
Huhtikuu 2020  
Tekniikan ala  
Insinööri (AMK), rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

Tekijä(t) Seppänen, Juho-Mikko	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Huhtikuu 2020
	Sivumäärä 62	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi <b>CLT-ulkoseinien toiminta tulevaisuuden ilmastossa</b>		
Tutkinto-ohjelma Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka		
Työn ohjaaja(t) Viinikainen, Marko; Korpinen, Jussi		
Toimeksiantaja(t) Sitowise Oy / Jyväskylä; Huttunen, Veli-Matti, Rakennetekniikka		
Tiivistelmä <p>Ilmastonmuutos on yksi keskeisimmistä haasteista rakentamisessa tällä hetkellä. Ilmaston on ennustettu muuttuvan tulevien vuosien aikana, ilmakehän kaasujen päästäessä entistä enemmän auringon säteitä lävitseen. Sääolosuhteiden muuttuessa ilmastonmuutoksen vaikutuksia on alettu ottamaan enemmän huomioon rakentamisessa.</p> <p>Tarkasteluissa tutkittiin teoriassa erilaisten CLT-rakenteisten ulkoseinien lämpö- ja kosteus-käyttäytymistä nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. CLT-rakenteisten ulkoseinien kosteus- ja lämpötekniistä toimivuutta vertailtiin perinteiseen rankarunkoiseen ulkoseinä-rakenteeseen. Tutkittavista rakenteista selvitettiin niiden homehtumisalttiutta, lämmönläpäisevyyttä sekä haitallista kosteuden tiivistymistä rakenteisiin.</p> <p>Rakenteille suoritettiin U-arvo- ja kastepistetarkastelut DOF-lämpöohjelmalla. Rakenteita tarkasteltiin säävyöhyke 3:n nykyisissä ja oletetuissa tulevaisuuden sääolosuhteissa. Tulevaisuuden sääolosuhteet valittiin ilmatieteen laitoksen testivuosien perusteella. Lisäksi rakenteiden homehtumisriskiä analysoitiin. Homehtumisriskin analysointiin käytettiin TTY:n ja VTT:n laatimaa suomalaista homemallia.</p> <p>Tarkastelujen perusteella selvisi, että rakenteet toimivat nykyisissä olosuhteissa. Tulevaisuuden ilmastossa ei havaittu tarkastelujen perusteella aiheutuvan kondenssiriskiä tarkasteltaville rakenteille. Toisaalta tulevaisuudessa sään muuttuessa rakenteille voi muodostua suurempi riski erilaisten mikrobin kasvulle. Aiheen tarkastelua pystyttäisiin kehittämään tekemällä tarkasteltaville rakenteille lämpötila- ja kosteusmittauksia käytännössä. Tarkastelussa pystyttäisiin ottamaan huomioon ilmansuunnista, julkisivun väristä ja kosteusolosuhteiden vaihtelusta aiheutuvat tekijät.</p>		
Avainsanat (asiasanat) CLT, rakennusfysiikka, kosteus, lämpö, mikrobikasvusto		
Muut tiedot		

Author(s) Seppänen, Juho-Mikko	Type of publication Bachelor's thesis	Date April 2020 Language of publication: Finnish
	Number of pages 62	Permission for web publication: x
Title of publication <b>Performance of CLT exterior walls in future climate</b>		
Degree programme Construction and Civil Engineering		
Supervisor(s) Viinikainen, Marko and Korpinen, Jussi		
Assigned by Sitowise Oy/ Jyväskylä; Huttunen, Veli-Matti, Structural Engineering		
Abstract  <p>Climate change is one of the most common challenges in today's constructing. The climate will change because more and more sunlight flows through the gases in the atmosphere. As a result of the changing weather conditions, climate change has received more attention in construction design.</p> <p>The thermal and moisture properties of different CLT exterior walls in the present and future climate were studied in theory in the examinations. The thermal and moisture performance of the different CLT exterior walls were compared to more traditional wooden exterior wall. The structures were analyzed from the point of view of their mould risk, their thermal transmittance and harmful condensation.</p> <p>The U-value calculations and dew point examinations were conducted to the structures with the DOF Therm program. Examinations to the structures were performed in the present and hypothetical future climate in weather zone 3. The Future climate was defined by Finnish meteorological institute. The mould risk of the structures was analyzed with the Finnish mould growth model created by Technical Research Center of Finland (VTT) and Tampere University of Technology (TTY).</p> <p>The analyses indicated that the structures function in the present climate. The analyses showed that there is no risk of harmful condense in the future climate. On the other hand, there could be a risk of mold forming due to weather changes in the future. The examinations could be developed by conducting practical thermal and moisture measurements to the structures. The examinations could observe different factors that are caused by cardinal points, the color of the facade and the fluctuation of the moisture conditions.</p>		
Keywords/tags (subjects) CLT, building engineering physics, thermal, moisture, microbe		
Miscellaneous (Confidential information)		

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto .....</b>	<b>10</b>
1.1	Tutkimuksen tausta, tavoite ja rajaus .....	10
1.2	Tutkimusmenetelmä ja toteutus.....	12
1.3	Sitowise Oy .....	12
<b>2</b>	<b>Puu rakennusmateriaalina .....</b>	<b>13</b>
2.1	Puun käyttö asuinrakentamisessa.....	13
2.2	Puurakentamisen kasvava suosio.....	13
2.3	Lämpötekniset ominaisuudet.....	14
2.4	Kosteusominaisuudet.....	14
2.5	CLT .....	16
<b>3</b>	<b>Ilmastonmuutos .....</b>	<b>18</b>
3.1	Yleistä .....	18
3.2	Ilmastonmuutoksen vaikutus rakenteiden suunnitteluun.....	19
3.3	Puurakentamisen vaikutus ilmastonmuutokseen.....	19
<b>4</b>	<b>Kosteus ja lämpö .....</b>	<b>20</b>
4.1	Rakennuksen kosteustekninen suunnittelu .....	20
4.2	Kondensoituminen .....	21
4.3	Diffuusio .....	22
4.4	Vesihöyryn konvektio .....	22
4.5	Rakennekosteus .....	23
4.6	Muu kosteuden siirtyminen .....	24
4.7	Lämmön siirtyminen rakenteissa .....	24
<b>5</b>	<b>Mikrobi- ja homevauriot.....</b>	<b>25</b>
5.1	Homeen ja mikrobien syntymisen edellytykset .....	25
5.2	Homehtumisriskin arviointi eri materiaaleille.....	26
5.3	Puun mikrobivaurioituminen .....	28
<b>6</b>	<b>Lait ja määräykset .....</b>	<b>29</b>
6.1	Ympäristöministeriön asetus 782/2017 .....	29

	2
6.2	Lämmönläpäisykerroin ..... 30
6.2.1	Lämmönläpäisykertoimen laskenta ..... 30
6.2.2	U-arvo vaatimukset ..... 33
6.2.3	Konvektion laskenta ..... 34
<b>7</b>	<b>Rakennejärjestelmät..... 35</b>
7.1	Yleistä ..... 35
7.2	RunkoPES..... 35
7.3	Yleisimpiä rakennejärjestelmiä puurakentamisessa ..... 36
7.3.1	Massiivipuu (CLT)..... 36
7.3.2	Pilari-palkkijärjestelmä ..... 36
7.3.3	Rankarakenteet (avoin puurakennejärjestelmä) ..... 37
7.3.4	Tilaelementti..... 38
<b>8</b>	<b>Puuseinärakenteiden kosteus- ja lämpötekkinen suunnittelu..... 39</b>
8.1	Sadevedet ja vuodot..... 39
8.2	Rakenteiden kuivatus ..... 39
8.3	Ilmantiiveys..... 40
8.4	Julkisivun liitosten suunnittelu ..... 41
8.4.1	Ovi- ja ikkunaliitokset ..... 41
8.4.2	Julkisivun liitokset..... 41
8.4.3	Vaakarakenteiden liitokset ulkoseinärakenteisiin..... 42
8.4.4	Ulkoseinän ja perumuurin liitokset ..... 42
<b>9</b>	<b>Tutkittavien rakenteiden lämpötila ja kastepiste tarkastelut ..... 43</b>
9.1	Sääolosuhteiden määrittäminen ..... 43
9.2	US1 Lämmöneristys ja puuverhous, CLT-rakenne sisäpinnassa + kivivilla ja tuulensuojalevy..... 44
9.2.1	Laskelmat eri ilmastossa US1 ..... 45
9.3	US2 CLT-massiivirakenne..... 46
9.3.1	Laskelmat eri ilmastoissa US2 ..... 47
9.4	US3 Lämmöneristys ja tiiliverhous, CLT-rakenne sisäpinnassa..... 49
9.4.1	Laskelmat eri ilmastoissa US3 ..... 50

9.5	US4 Lämmöneristys ja puuverhous, CLT-rakenne sisäpinnassa + jäykkä mineraalivilla.....	51
9.5.1	Laskelmat eri ilmastoissa US4 .....	52
9.6	US5 Puurakenteinen puurankaseinä .....	54
9.6.1	Laskelmat eri ilmastoissa US5 .....	55
<b>10</b>	<b>Tulosten arviointi .....</b>	<b>56</b>
10.1	Lämpötila- ja kastepistetarkastelu .....	56
10.2	Homehtumisriski .....	57
10.3	Yhteenveto ja johtopäätökset .....	57
<b>11</b>	<b>Pohdinta.....</b>	<b>59</b>
11.1	Tavoitteet ja toteutus.....	59
11.2	Tulosten luotettavuus .....	59
	<b>Lähteet .....</b>	<b>61</b>

## Kuviot

Kuvio 1. US1.....	10
Kuvio 2. US2.....	11
Kuvio 3. US3.....	11
Kuvio 4. US4.....	11
Kuvio 5. US5.....	11
Kuvio 6. Kuivumisen aiheuttamat muodonmuutokset puussa .....	15
Kuvio 7. CLT-levy.....	16
Kuvio 8. Yleisimmät kosteuslähteet.....	21
Kuvio 9. Luonnollinen konvektio. ....	23
Kuvio 10. Pakotettu konvektio. ....	23
Kuvio 11. Homeen muodostuminen eri homehtumisherkkyysluokissa lämpötilan ollessa 20 °C ja ilman suhteellisen kosteuden 90%. ....	28
Kuvio 12. Homeen muodostuminen eri homehtumisherkkyysluokissa lämpötilan ollessa 20 °C ja ilman suhteellisen kosteuden 100%. ....	28
Kuvio 13. Pilari-palkkijärjestelmä. ....	37
Kuvio 14. Rankarakenteet.....	38
Kuvio 15. Tilaelementti .....	38
Kuvio 16. US1 ulkoseinärakenne. ....	44
Kuvio 17. Lämpötilat ja kosteudet US1 (nykyinen).....	45
Kuvio 18. Lämpötilat ja kosteudet US1 (50v). ....	45
Kuvio 19. Lämpötilat ja kosteudet US1 (100v). ....	45
Kuvio 20. US2 ulkoseinärakenne. ....	46
Kuvio 21. Lämpötilat ja kosteudet US2 (nykyinen).....	47
Kuvio 22. Lämpötilat ja kosteudet US2 (50v). ....	47
Kuvio 23. Lämpötilat ja kosteudet US2 (100v). ....	48
Kuvio 24. US3 ulkoseinärakenne. ....	49
Kuvio 25. Lämpötilat ja kosteudet US3 (nykyinen).....	50
Kuvio 26. Lämpötilat ja kosteudet US3 (50v). ....	50
Kuvio 27. Lämpötilat ja kosteudet US3 (100v). ....	51
Kuvio 28. US4 ulkoseinärakenne. ....	51
Kuvio 29. Lämpötilat ja kosteudet US4 (nykyinen).....	52

Kuvio 30. Lämpötilat ja kosteudet US4 (50v). .....	52
Kuvio 31. Lämpötilat ja kosteudet US4 (100v). .....	53
Kuvio 32. US5 ulkoseinärakenne. ....	54
Kuvio 33. Lämpötilat ja kosteudet US5 (nykyinen).....	55
Kuvio 34. Lämpötilat ja kosteudet US5 (50v). .....	55
Kuvio 35. Lämpötilat ja kosteudet US5 (100v). .....	56

**Taulukot**

Taulukko 1. CLT-tekniset tiedot .....	17
Taulukko 2. Homehtumisherkkyyssluokat eri materiaaleille.....	26
Taulukko 3. Homeen taantumaluokat. ....	27
Taulukko 4. Homeindeksi M .....	27

**Käsitteistö**

Suhteellinen kosteus	Suhteellinen kosteus tarkoittaa vesihöyryn määrää ilmassa suhteessa enimmäismäärään tietyssä lämpötilassa. Suhteellinen kosteus ilmoitetaan prosentteina (RH).
Kyllästyskosteus	Ilma pystyy sisältämään tietyn määrän kosteutta tietyssä lämpötilassa. Vesihöyryn kylästymiskosteudeksi kutsutaan sitä tilaa, missä ilma sisältää täyden määrän vesihöyryä ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ). (Siikanen 2016, 158.)
Kastepiste	Lämpötila, jossa ilman suhteellinen kosteus on kylästymiskosteuden suuruinen. Tällöin tapahtuu vesihöyryn kondensoitumista eli tiivistymistä. (Siikanen 2016, 158.)
Kondensoituminen	Ilmassa olevan vesihöyryn tiivistyminen.
Veden kapillaarinen siirtyminen	Vesi imeytyy huokoiseen materiaaliin. Vesi kulkeutuu aineen sisällä sijaitsevilla huokosputkissa kapillaaristen voimien aiheuttaman huokosalipaineen vaikutuksesta. (Ympäristöministeriö 2016, 111.)
Diffuusio	Kaasuseoksessa molekyylit pyrkivät tasaantumaan eroavien pitoisuuksien välillä suuremmasta pitoisuudesta pienempään.
Höyrynsulku	Vesihöyryn haitallista diffuusiota rakenteessa pyritään estämään höyrynsulun avulla.

Lämmönjohtavuus	Lämmönjohtavuudella tarkoitetaan kunkin ainekerroksen ominaisuutta päästää lämpö lävitseen ( $W/mK$ ).
Lämmönvastus	Ainekerroksen tai rakenteen ominaisuus vastustaa lämmön johtumista ( $m^2K/W$ ).
U-arvo	U-arvo kertoo kuinka paljon rakenne päästää lämpöä lävitseen ( $W/m^2K$ ).
Ominaislämpökapasiteetti	Ominaislämpökapasiteetti kuvastaa aineen kykyä luovuttaa ja sitoa lämpöä. Ominaislämpökapasiteetti ilmoitetaan lämpöenergiaa massaa ja lämpötilaeroa kohti ( $J/(kgK)$ ). (RIL 255-1-2014, 27.)
Konduktio	Lämmön siirtymistä molekyylien välillä. Lämpötilaerot pykivät tasaantumaan. Konduktio esiintyy kiinteissä ja nestemäisissä aineissa, lisäksi sitä voi tapahtua kahden erillisen kappaleen välillä. (Siikanen 2016, 143.)
Lämmön konvektio	Lämmön siirtymistä nesteen tai kaasun virtauksen välityksellä. Voi tapahtua luonnollisesti tai pakotetusti.
Vesihöyryn konvektio	Vesihöyryn siirtymistä ilmavirtauksessa. Tapahtuu ilmanpaine-erojen aiheuttamana.
Vesihöyrynläpäisevyys	Aineen ominaisuutta päästää vesihöyryä lävitseen diffuusiolla kutsutaan vesihöyrynläpäisevyydeksi ( $kg/(m^2Pa)$ ).

Vesihöyrynvastus

Vesihöyrynvastus kertoo paljonko aine vastustaa vesihöyryn kulkeutumista lävitseen. ( $m^2sPa/kg$ ). Vesihöyrynvastuksen voi laskea jakamalla ainekerroksen paksuus vesihöyrynläpäisevyydellä.

Hygroskooppinen kosteus

Hygroskooppisella kosteudella tarkoitetaan huokoisen aineen kykyä sitoa ja luovuttaa kosteutta ympäröivään ilmaan, suhteellisen ilman kosteuden muuttuessa. (Siikanen 2016, 159.)

Hengittävä rakenne

Hengittäväksi rakenteeksi kutsutaan rakennetta, joka pystyy sitomaan itseensä hyvin kosteutta hygroskooppisesti ja luovuttaa sitä ympäröivän ilman kuivaessa.

# 1 Johdanto

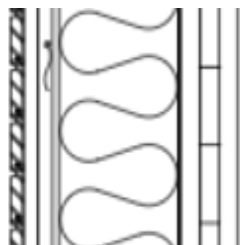
## 1.1 Tutkimuksen tausta, tavoite ja rajaus

Puurakentaminen on ollut kasvavassa suosiossa viimeisten vuosien aikana. (Nordtreat 2019.) Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää nykyisten CLT-rakenteisten ulkoseinien lämpö- ja kosteustekninen toimivuutta tulevaisuudessa ilmaston muuttuessa. Opinnäytetyössä tarkastellaan neljää erilaista CLT-runkoista seinätyyppiä nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Nykyisestä ja tulevaisuuden ilmastosta saatuja tuloksia pyritään vertailemaan keskenään ja muodostamaan käsitys, miten nykyiset CLT-rakenteiset ulkoseinät soveltuvat tulevaisuuden sääolosuhteisiin. Lopuksi CLT-rakenteisten ulkoseinien arvoja verrataan perinteisen rankarunkoisen ulkoseinä-rakenteen arvoihin kyseisissä ilmastoissa.

Kosteuden siirtymistä rakenteessa tarkastellaan nykyhetkenä, 50-vuoden ja 100-vuoden ilmastossa. Kosteustekniseltä kannalta rakenteista tarkastellaan kosteuden siirtymistä rakenteissa. Lämpötekiseltä kannalta tarkastellaan lämpötilaeroja rakenteiden eriosissa ja U-arvoja. Lisäksi rakenteiden homehtumisriskiä pyritään arvioimaan TTY:n ja VTT:n julkaiseman homemallin pohjalta.

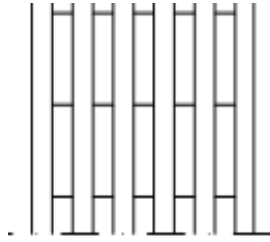
Tutkittavia rakennetyyppejä ovat:

1. US1 Lämmöneristys ja puuverhous, CLT-rakenne sisäpinnassa + kivivilla ja tuulensuojalevy.



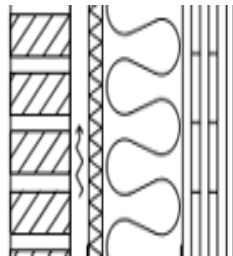
Kuvio 1. US1.

## 2. US2 CLT-massiivirakenne



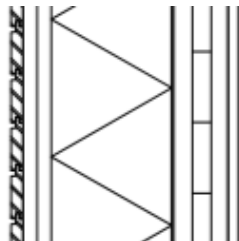
Kuvio 2. US2.

## 3. US3 Lämmöneristys ja tiiliverhous, CLT-rakenne sisäpinnassa



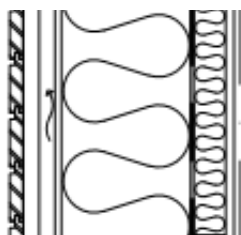
Kuvio 3. US3.

## 4. US4 Lämmöneristys ja puuverhous, CLT-rakenne sisäpinnassa + jäykkä mineraalivilla



Kuvio 4. US4.

## 5. US5 Puurakenteinen puurankaseinä



Kuvio 5. US5.

## 1.2 Tutkimusmenetelmä ja toteutus

Tutkittavien rakenteiden lämpö- ja kosteustekninentarkastelut suoritettiin DOF-LÄMPÖ-ohjelmalla. Ohjelmalla suoritettiin rakenteiden kastepiste- ja U-arvotarkastelut eri ilmasto-olosuhteissa. Lisäksi homehtumisen riskejä analysoidaan TTY:n ja VTT:n kehittämän ”Suomalaisen homemallin” avulla. Aineistonkeruumenetelmänä käytettiin kirjallisuuskatsausta. Aiheesta löytyi paljon kirjallisuutta ja aikaisempia tutkimuksia.

Rakenteita tutkittiin kolmessa eri ilmastossa. Ilmastot jaoteltiin nykyiseen, 50-vuoden päästä oletettuun ja 100-vuoden päästä oletettuun ilmastoon. Tarkasteltavat ajankohdat valittiin kyseisiksi, koska rakennuksien elinkaaret suunnitellaan normaalisti 50- tai 100-vuoden päähän. Rakennukset suunnitellaan normaalisti 50-vuoden käyttöikään ja monumentaaliset rakennukset 100-vuoden käyttöikään. Lisäksi tulevaisuuden ilmastojen ajankohdan määrittämiseen vaikutti aikaisemmat tutkimukset.

## 1.3 Sitowise Oy

Sitowise Oy toimii opinnäytetyön toimeksiantajana. Sitowise Oy on yksi suurimmista suomalaisomisteisista asiantuntijayrityksistä, jonka palveluihin kuuluu rakentamisen suunnittelu-, asiantuntija ja digitaaliset palvelut. Sito Oy ja Wise Group Finland Oy fuusioituivat vuonna 2017, jonka tuloksena syntyi Sitowise Oy. Tällä hetkellä Sitowise Oy:ssä työskentelee yli 1700 asiantuntijaa. Tytäryhtiöitä Sitowise Oy:llä on Ruotsissa, Virossa ja Latviassa. Sitowise Oy toimii 27 paikkakunnalla Suomessa, Ruotsissa, Virossa ja Latviassa. Suomessa Sitowise Oy toimii 21 paikkakunnalla. Sitowise Oy:n liikevaihto oli 135 miljoonaa euroa vuonna 2018. (Sitowise Oy N.d.)

Opinnäytetyö tilattiin Jyväskylän rakennustekniikan toimipisteen puolesta. Toimipisteellä työskentelee yli 60 asiantuntijaa. Opinnäytetyön tarkoituksena on muodostaa vankka käsitys ulkoseinärakenteiden kosteus- ja lämpöteknisestä käyttäytymisestä sekä tutkia CLT-rakenteiden toimivuutta kyseisillä osa-alueilla.

## 2 Puu rakennusmateriaalina

### 2.1 Puun käyttö asuinrakentamisessa

Puuta on käytetty rakennusmateriaalina läpi historian. Puun käyttö rakennusmateriaalina alkoi kasvamaan huomattavasti 1990-luvulla Suomessa. Tähän syynä oli valtiollan suhtautuminen puurakentamiseen, puun ekologisuus, myönteinen suhtautuminen puun käyttöön ja puuteollisuuden herääminen. Puun käytön suosio arkkitehtuurin kannalta edisti myös puurakentamista. (Siikanen 2016, 15-16.)

Puu on monipuolinen rakennusmateriaali, mitä voidaan käyttää moniin eri osa-alueisiin rakentamisessa. Puun tyypillisiä ominaisuuksia:

- kevyt materiaali verrattuna betoniin ja teräkseen
- helposti työstettävä
- helppo käyttöinen
- taloudellinen
- ekologinen
- hyvä lämmöneristävyys
- luja materiaali suhteessa painoon
- uusiutuva luonnontuote
- helposti saatavilla
- esteettinen materiaali.

Puun käytöllä on myös tiettyjä rajoitteita. Puun palavuus, kosteuskäyttäytyminen, lahoaminen ja anisotrooppisuus tuovat omat haasteensa puurakenteiden suunnittelulle ja käytölle. (Siikanen 2016, 8.)

### 2.2 Puurakentamisen kasvava suosio

Ilmastonmuutoksen estäminen, energia- ja resurssitehokkuuden kehittäminen, sekä kestävä kehityksen ja kiertotalouden edistäminen ovat painavimpia syitä puurakentamisen räjähtäneelle suosiolle. Puu on ekologinen valinta, sillä Suomen metsissä kasvatettu puu on ekologisesti kasvatettua ja hoidettua. (Nordtreat 2019.) Puun hakkuu ja tuotteiden valmistus tulee toteuttaa oikeita tapoja ja kestävästä kehitystä noudattaen, jotta puurakentamisen ekologiset hyödyt säilyisivät. (Robbins 2019.)

Puu on ympäristöystävällisyytensä lisäksi kierrätettävä, kevyt ja ilmassa olevaa hiilidioksidia sitova materiaali. Puurakenteinen rakennus auttaa torjumaan ilmastonmuutosta. Rakennuksen elinkaarensa aikana kuutiometri puuta sitoo noin 250kg hiiltä. Puurakentamisella pyritään vaikuttamaan elin- ja työympäristöjen turvallisuuteen, viihtyvyyteen ja terveellisyteen. Puu on myös rauhoittava ja kodikas materiaali. Puu on rakennusmateriaalina esteettinen ja samalla hyvin käyttöä kestävä. (Nordtreat 2019). Rakennus- ja kiinteistösektorin hiilidioksidipäästöt ovat noin 40% maailman hiilidioksidipäästöistä. Betonin ja teräksen valmistus tuottavat kumpikin noin 5% maailman hiilidioksidipäästöistä. (Robbins 2019.)

### 2.3 Lämpötekniset ominaisuudet

Puu johtaa heikosti lämpöä huokoisuutensa takia. Puun lämmönjohtavuus on noin kaksinkertainen syiden suunnassa verrattuna syitä vastaan kohtisuorassa. Puun tiheys ja kosteus vaikuttavat sen lämmönjohtavuuteen. Puun lämpölaajeneminen on vähäistä syiden suunnassa. Lämpöliikkeet ovat huomattavasti suurempia säteen ja tangentin suunnassa. Lämpötilan vaihdellessa jatkuvasti puun lujuusominaisuudet heikkenevät. Puussa voi esiintyä pakkashalkeamia lämpötilan tippuessa alle +0°C, jolloin puun soluonteloissa sijaitseva vesi jäätyy ja laajenee. Kosteuden aiheuttamiin muodonmuutoksiin verrattuna puun lämpölaajeneminen on suhteellisen pientä. (Puuinfo Oy N.d.)

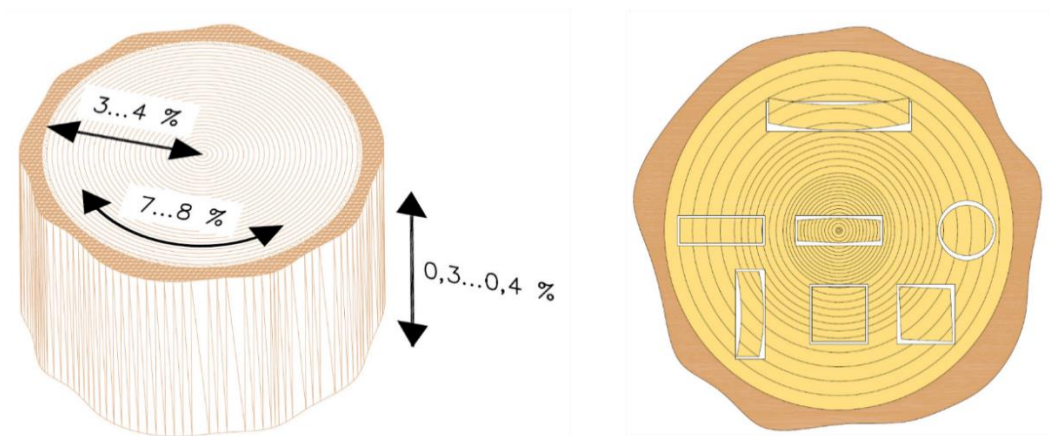
Puun lämpökapasiteetti riippuu puun kosteudesta, tiheydestä, lämpötilasta ja syiden suunnasta. Mitä kosteampi puu sitä parempi lämmönjohtavuus, sillä veden ominaislämpökapasiteetti on puuta suurempi. Puun lämpökapasiteettinsa ansiosta suuret hirret toimivat hyvin ulkoseinärakenteena. (Mts.)

### 2.4 Kosteusominaisuudet

Puu pystyy sitomaan itseensä hyvin vettä, joten puusta voidaan käyttää termiä hygroskoopinen materiaali. Normaalioloissa puussa on aina vettä. Vesi kulkeutuu puuhun joko soluonteloiden kautta kapillaarisesti nesteinä, höyrynä tai diffuusiona solu-

seinämän välityksellä. Puussa olevalla kosteudella tarkoitetaan veden massan ja vedettömän puuaineksen massan välistä suhdetta. Ilman suhteellisen kosteuden takia puun kosteus normaalikäytössä vaihtelee 8-25 painoprosentin välillä. (Puuinfo Oy N.d.)

Kuivatessaan puusta haihtuu ensiksi vapaana oleva soluonteloiden vesi, jonka jälkeen soluseinämiin sitoutunut vesi. Kosteuden laskiessa alle puun syiden kyllästyspisteen, puu alkaa kutistua veden poistuessa soluseinämistä. Puun kutistuessa sen lujuusominaisuudet paranevat. Puu kutistuu ja turpoaa vaihtelevasti, eli se on anisotrooppinen materiaali. (Siikanen 2017, 43). Märästä kuivaksi kuivuaessaan puu kutistuu suhteellisen vähän syiden suunnassa (noin 0,2-0,4%). Säteen suunnassa kutistuminen on noin 4% ja tangentin suunnassa noin 8%. Puun kosteuseläminen on huomioitava rakenteiden suunnittelu- ja toteutusvaiheessa. (Puuinfo Oy N.d.)



Kuvio 6. Kuivumisen aiheuttamat muodonmuutokset puussa (Puuinfo 2011.)

Tilaa, jossa puun kosteus pysyy vakiona, kutsutaan puun tasapainokosteudeksi. Tasapainokosteudessa puun kosteus ja lämpötila mukautuu ilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mukaan (Puuinfo Oy N.d.). Puu tulee kuivattua mahdollisimman lähelle käyttökosteutta ennen sen käyttöönottoa, sillä se aiheuttaa haittaa rakenteelle. Puun käyttötarkoitus määrää sen tarvittavan kuivuuasteen. Puun säilyminen ja lujuus rakentamisen eri vaiheissa varmistetaan oikeaoppisella puun kuivatuksella ja säilytyksellä. (Siikanen 2017, 43.)

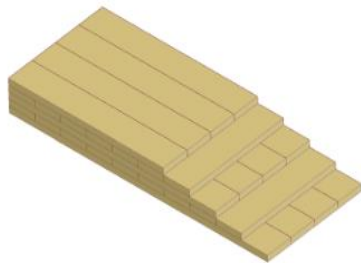
Tiheän puun kosteuden aiheuttamat muodonmuutokset ovat suurempia verrattuna harvaan puuhun. Kuivaessaan puun lujuusominaisuudet paranevat. Puun kosteusprosentin ollessa 12-15% sen puristus- ja taivutuslujuus on kaksinkertainen tuoreeseen puuhun verrattuna. Vetolujuus on suurin 6-12% kosteusprosentissa. Puun syiden kylästyspisteen alituttua kuivan puun lujuusominaisuudet kasvavat merkittävästi.

(Puuinfo Oy N.d.)

## 2.5 CLT

CLT-levyt koostuvat useista ristikkäin laminoituista rimoista tai laudoista. Mänty tai kuusi toimii normaalisti CLT-levyn raaka-aineena. Kokonaisuudessaan CLT-levyt ovat lujia, jäykkiä ja ristikkäin laminoitujen lautakerrosten ansiosta hyvin kosteuselämistä tasaavia rakennusmateriaaleja. CLT-levyt ovat kevyitä ja helposti käsiteltäviä rakenteita verrattuna painaviin betonielementteihin, mutta ne eristävät ääntä heikosti.

Massiivipuulevyt työstetään tehtaalla tarvittavaan muotoon liimauksen jälkeen. Pintakäsittely toteutetaan kohde kohtaisesti. (Puuinfo Oy N.d.)



Kuvio 7. CLT-levy (Puuinfo N.d.)

CLT-levyillä voidaan toteuttaa kantavia ja jäykistäviä rakenteita, tai tarvittaessa ei-kantavia rakenteita. (Puuinfo Oy N.d.) CLT-levytekniikalla on mahdollista toteuttaa monenlaisia kantavia ja ei-kantavia rakenteita. CLT:tä voidaan käyttää ulkoseinissä, väliseinissä, terasseissa, parvekkeissa, kaiteissa sekä ala- väli- ja yläpohjarakenteissa. (Celt Oy N.d.) Levyihin tulevat aukot ja erilaiset muotoilut on helppo toteuttaa levyjen jäykkyyden ansiosta. CLT-levyjä käytettäessä ulkoseinärakenteissa, ne eristetään

normaalisti ulkopuolelta. Levyt tulee pinnoittaa ja höyryn- ja ilmansulku sijoittaa tarvittaessa eristeen ja levyn väliin. CLT-levyjä voidaan käyttää myös liitosrakenteena betoni- ja kipsivaluissa, sekä puupalkiston kanssa. (Puuinfo Oy N.d.)

Taulukko 1. CLT-tekniset tiedot (Stora Enso Oyj 2014.)

Tekniset tiedot	
Käyttötarkoitus	seinien, kattojen ja välipohjien runkorakennusmateriaali
Vakioleveydet	2,95 / 2,75 / 2,95 m
Enimmäispituus	16,00 m
Enimmäispaksuus	400 mm
Kerrosrakenne	3, 5, 7 tai 8 kerrosta
Työstö	Arkkitehtikuvien mukaan
Puulaji	kuusi, mänty
Kosteuspitoisuus	12 % ± 2 %
Pintalaadut	näkyvä ja rakennelaatu (ei-näkyvä), pinnat ovat aina tehdashiottuja
Paino	n. 470 kg/m <sup>3</sup> CLT / 5,0 kN/m <sup>3</sup> (rakennelaskelmiin)
Vesihöyrynvastus	20–50 μ, EN 12524 standardin mukaan
Lämmönjohtavuus	0,11 W/(mK), EN 12524 standardin mukaan
Ominaislämpökapasiteetti c <sub>p</sub>	1,600 J/(kgK), EN 12524 standardin mukaan
Käyttöluokka	1 ja 2, EN 1995-1-1 koodin mukaan

CLT:n lämmönjohtavuuden ja lämpökapasiteetin ansiosta se soveltuu hyvin rakentamiseen. CLT:n lämmönjohtavuus on heikko, joten sillä on mahdollista toteuttaa ohuita ulkoseinärakenteita. (Stora Enso Oyj N.d). CLT on myös ilmantiiveydeltään hyvä rakenne, joten se ei tarvitse höyrynsulkua erikseen. Kosteustekniseltä kannalta CLT sitoo ja luovuttaa puun tapaan hyvin kosteutta, joten se toimii hyvin sisäilman kosteuden tasaajana. (Celt Oy. N.d). Muita CLT:n etuja on nopea ja helppo käyttö, ympäristöystävällisyys, tiiveys, energiatehokkuus, työstötarkkuus, ulkonäkö ja soveltuvuus maanjäristysalueille. (Stora Enso Oyj 2014.)

## 3 Ilmastonmuutos

### 3.1 Yleistä

Ilmastonmuutoksella tarkoitetaan maailmanlaajuista ilmaston lämpenemistä ihmisten toiminnan seurauksena. Ilmastonmuutos koskee jokaista, eikä sen vakavuutta tulisi vähätellä. Ilmastonmuutoksen vaikuttaa kielteisesti maailman ihmisiin ja luontoon. Ilmastonmuutosta vastaan on taisteltu vuosia ja sen merkitys kasvaa kovaa vauhtia. (WWF Suomi N.d.)

Ilmakehässä olevat erilaiset kaasut päästävät auringon säteilyn lävitseen, mutta estävät osan lämmön pääsemisestä takaisin avaruuteen. Lämpöä lävitseen päästävien kaasujen määrä on noussut runsaasti ihmisten toiminnan tuloksena. Fossiiliset polttoaineet aiheuttavat suurimman osan kasvihuonepäästöistä. Keskimääräinen ilmaston lämpötila on noussut noin yhden asteen esiteollisesta ajasta. Ennusteiden mukaan keskilämpötila tulisi nousemaan ainakin kolmeen asteeseen tai yli. Katastrofaalisia seurauksia syntyisi jo 1,5 asteen keskilämpötilan noususta. Ilmastonmuutoksen seuraamuksia ovat:

- jäätikön sulaminen
- vesistöjen nousu ja tulvat
- meriveden happamoituminen
- eläinten elinolojen heikkeneminen
- kasvitautien, tuholaishyönteisten ja vieraslajien lisääntyminen
- tuulisuuden, sateiden, myrskyjen ja kuivuuden lisääntyminen. (Mts)

Vuoteen 2050 mennessä maailman tulisi olla hiilineutraali Pariisin ilmastopöytäkirjan mukaan. Suomi ja muut EU-maat ovat sopimuksen myötä sitoutuneet vähentämään kasvihuonepäästöjään 40 prosentilla vuoteen 2030 mennessä. (Metsä Group N.d.)

### 3.2 Ilmastonmuutoksen vaikutus rakenteiden suunnitteluun

Ilmasto tulee muuttumaan vuosien mittaan. Nykyisen keskimääräisen lämpötilan ennustetaan nousevan noin 4 astetta seuraavan 100 vuoden aikana. Rakennukset tulevat olemaan enemmän alttiita voimakkaille säätilojen vaihteluille verrattuna nykyhetkeen. Keskilämpötilan nousu, myrskysateiden ja tuulisuuden lisääntyminen sekä pohjaveden vaihtelut tulevat rasittamaan rakenteita jatkossa entistä enemmän. Ilmastonmuutoksen ei oteta tällä hetkellä muuten huomioon kuin, tulvakorkeuksia määrittäessä kaavoituksessa. (Lappalainen 2010, 90-91.)

Pohjavedenpinta tulee nousemaan sateiden lisääntyessä. Tämä voi aiheuttaa maaperän lujuuden alenemista vesipitoisuuden kohotessa. Perustusten kuivatusrakenteiden toiminta voi estyä pohjaveden nousun aiheuttamana. Lisäksi putki-, rakenne- ja korroosioaurioita voi syntyä suhteellisen kosteuden kohotessa korkeaksi pitkiksi ajanjaksoiksi. Kattojen rakenteisiin tulee kiinnittää erityistä huomioita tuulisuuden lisääntyessä. Ulkoilmalle alttiina olevat rakenteet tulevat olemaan entistä enemmän kosteusrasitettuja viistosateiden vuoksi. (Lappalainen 2010, 91-95.)

### 3.3 Puurakentamisen vaikutus ilmastonmuutokseen

Kotimainen puu on ympäristöystävällinen rakennusmateriaali, jolla pyritään torjumaan ilmastonmuutosta. Suomen kasvihuonepäästöistä noin kolmasosa johtuu rakentamisesta ja energiasta, jota rakennukset kuluttavat. Rakentamisesta syntyviä päästöjä pystytään vähentämään rakentamalla puusta ja suosimalla muita ympäristöystävällisiä materiaaleja. Suomen metsistä saatava puu on tuotettu läpi oikeaoppisen kasvatusprosessin. (Suomen metsäkeskus 2016). Puun jalostaminen kuluttaa vähän energiaa. Puunkuori, sahanpuru ja muut prosessissa syntyvät sivutuotteet toimivat yleensä tarvittavan energian tuottamisessa, mitä tarvitaan puun jalostamiseen. (Metsä Group N.d.)

Puu sitoo elinaikanaan itseensä ilman hiilidioksidia. Puu toimii siis hyvänä hiilivarastona, eikä puurakentamisesta synny suhteessa paljoka haittaa ympäristölle. Puurakentamista pystyttäisiin lisäämään huomattavasti, vaikka nykyisen suosionsa vuoksi

puusta rakennetaan jo paljon esim. kerrostaloja ja julkisia rakennuksia. (Suomen metsäkeskus 2016.)

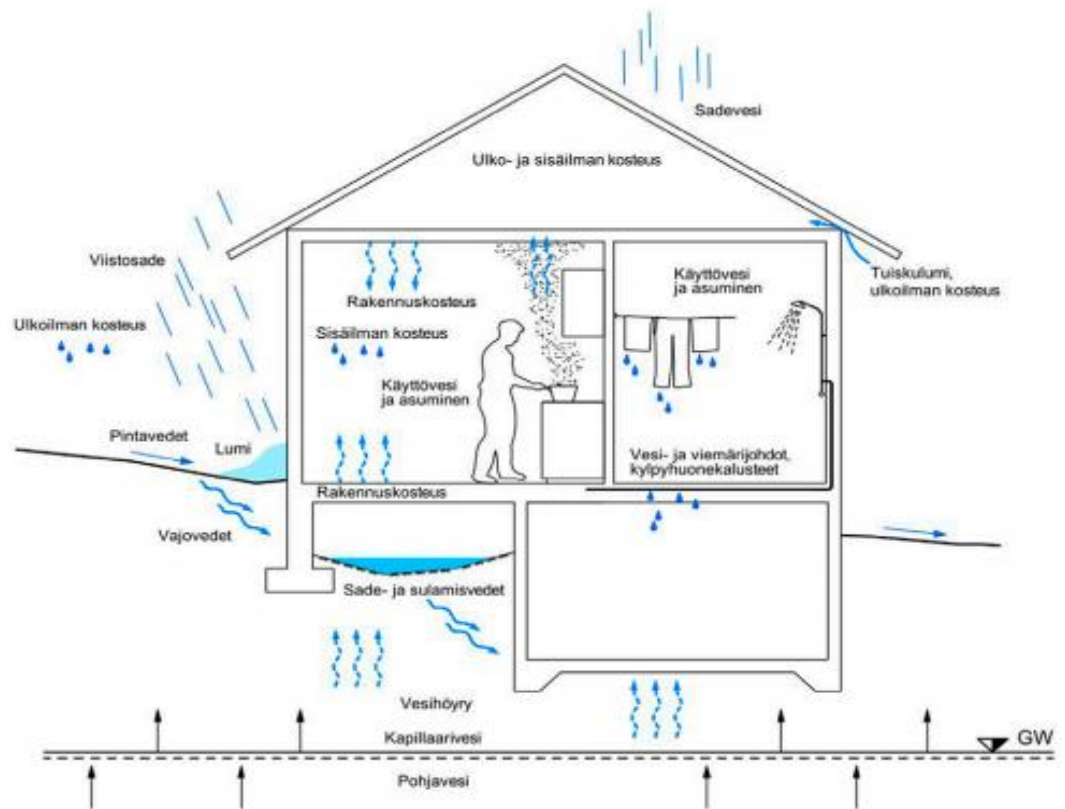
## 4 Kosteus ja lämpö

### 4.1 Rakennuksen kosteustekninen suunnittelu

Kosteus esiintyy rakenteissa höyrynä, vetenä tai rakennuskosteutena. Vesihöyry siirtyy rakenteisiin konvektiolla tai diffuusiolla. Lyhytaikainen rakenteiden kostuminen ei aiheuta rakenteille haittaa, mutta pitkittynyt kostuminen voi aiheuttaa erilaisten mikrobin kasvua. Kosteusvauriot johtuvat normaalisti:

- Suunnitteluvirheistä tai puutteista
- rakentamisen aikana tehdyistä virheistä
- laadunhallinnan puutteista
- Vanhentuneista rakennusosista
- puuttellisesta huollosta
- rakennuksen virheellisestä käytöstä.

Kosteusvauriot tulisi korjata mahdollisimman nopeasti ja samalla poistaa vaurioiden aiheuttajat. (RT 05-10710 1999, 1.)



Kuvio 8. Yleisimmät kosteuslähteet (Ympäristöministeriö 2016, 107.)

Rakennusfysikaalisessa suunnittelussa tulee ottaa huomioon:

- höyry- ja ilmansulun tarkka suunnittelu,
- ulospäin harvenevien vaipparakenteiden suunnittelu,
- rakenteiden kuivumisen varmistaminen,
- ulkopintojen vedenpitävyyden varmistus,
- tuuletusrakenteiden oikeanlainen suunnittelu,
- rakenteiden mahdollisuuden mukainen yksinkertaistaminen,
- Veden kapillaarisen nousun estäminen alapohjarakenteissa,
- Riittävä kosteuden- ja vedeneristys sekä tiiveyden varmistus kellarirakenteissa,
- Ryömintätilan tuulettavuuden ja lämmöneristyksen määräysten mukainen toteutus,
- kylmäsiltojen välttäminen,
- työmaatoteutuksen huomiominen suunnittelussa. (RIL 250-2011, 57.)

## 4.2 Kondensoituminen

Vesihöyryn tiivistymistä vedeksi kutsutaan kondensoitumiseksi. Normaalisti rakenteissa tiivistyminen tapahtuu rakenteiden pinnassa tai sisällä. Kondensoituminen

edellytyksenä suhteellisen ilmankosteuden tulee olla 100%. Vesi tiivistyy rakenteissa kovalle pinnalle, mikä on kylmempi kuin ympäröivä ilma. Tämä edellyttää vesihöyryn kyllästymiskosteuden ylittymistä. Yleisimpiä kosteuden tiivistymisen syitä on esim. Kylmäsillat, höyrynsulkujen puutteet ja kylmän rakenteen sijainti lämpimässä tilassa. (Siikanen 2016, 167-168.)

### 4.3 Diffuusio

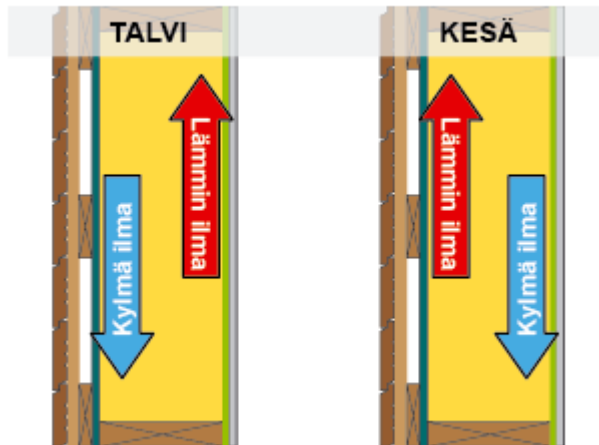
Diffuusiolla tarkoitetaan epätasaisen kaasuseoksen kaasumolekyylien pyrkimistä liikkumaan ja tasoittumaan. Veden liikkumista höyrynä rakenteen läpi kutsutaan diffuusioiksi. Vesihöyryn osapaineen ollessa poikkeava seinän eri puolilla, vesihöyry pyrkii diffuusioitumaan seinän läpi sitä pintaa päin, jolla osapaine on alhaisin. Diffuusion suunta on suurimmasta absoluuttisesta ilmankosteudesta pienimpään eli normaalisti lämpimästä kylmään. Talvisin vesihöyry pyrkii kulkeutumaan sisältä ulos ja kesällä taas päinvastoin. (Siikanen 2016, 163). Vaikka normaalisti diffuusion suunta on rakennuksen sisältä ulospäin, voi diffuusiota tapahtua myös esimerkiksi alapohjarakenteissa kylmästä lämpimään. Tämä ilmiö johtuu maaperän huokosissa olevasta ilmankosteudesta, minkä takia ilmankosteus on suurempi rakennuksen alla kuin sisällä. (Sisäilmayhdistys ry 2008.)

Diffusiovirran suuruus riippuu vesihöyrypitoisuuksien eroista aineen eri puolilla. Eri materiaaleilla on suuria eroja vesihöyrynläpäisevyyden suhteen. Normaalisti diffuusion kanssa tulee ongelmia, kun vesihöyryä pääsee enemmän rakenteen sisään kuin pois rakenteesta. (Sisäilmayhdistys ry 2008.)

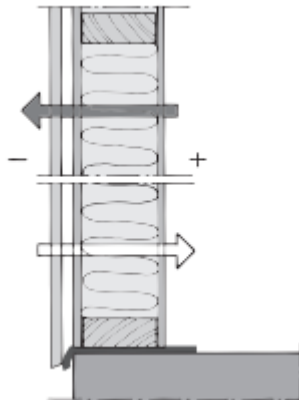
### 4.4 Vesihöyryn konvektio

Ilmavirtauksen mukana kulkeutuvaa vesihöyryä kutsutaan vesihöyryn konvektioksi. Ilmanpaine-erot saavat aikaan ilmavirtaukset. Virtaus tapahtuu aina pienemmän ilmanpaineen suuntaan (Mts). Kylmänä vuodenaikana konvektion haittavaikutukset ovat suurimmillaan, sillä kostea sisäilma pyrkii virtaamaan ulospäin ja tiivistymään rakenteisiin. Yleisimpiä ongelmakohtia on yläpohjarakenteet, sillä usein siellä vallitsee ylipaine. (Sisäilmayhdistys ry, 2008.)

Luonnolliseksi konvektioksi kutsutaan ilmiötä missä ilmavirtaus tapahtuu ilman tiheyseroista aiheutuneena. Kun konvektiovirtaus tapahtuu rakenteissa sijaitsevien aukkojen tai rakojen välityksellä ilmanpaine erojen seurauksena, sitä kutsutaan pakotetuksi konvektioksi. Rakenteiden ilmantiiveys tulee varmistaa, sillä kylmänä vuodenaikana läpivientien, halkeamien, reikien yms. läpi kulkevan ilmavirtauksen mukana kosteus pääsee vaikuttamaan rakenteisiin. (Siikanen 2016, 140-141.)



Kuvio 9. Luonnollinen konvektio (Tiivistalo N.d.)



Kuvio 10. Pakotettu konvektio (Siikanen 2008, 141.)

#### 4.5 Rakennekosteus

Rakennusosiin ja tarvikkeisiin voi kertyä kosteutta rakentamisen tai varastoinnin aikana. Rakennusosien oikeaoppiseen varastointiin tulisi kiinnittää erityistä

huomiota. Rakennusosiin jäänyt kosteus rakentamisen jälkeen luo perustan homeiden ja lahovaurioiden synnylle. Laho- ja homevaurioiden lisäksi puu kutistuu kuivuessaan, mikä aiheuttaa epätiiveyttä puurakenteille. Puumateriaalit tulisi varastoida katettuun ja tuuletettuun tilaan. Rakennusosien ja materiaalien rakennekosteus tulisi olla pienempi kuin rakennuksen käytönaikainen tasapainokosteus (Siikanen 2016, 164-165.)

#### 4.6 Muu kosteuden siirtyminen

Kosteutta voi siirtyä rakenteisiin myös tuulenpaineen, painovoiman ja kapilaaristen huokoisten aineiden välityksellä. Ulkoseinällä sijaitseva lumi ja vesi voi nousta ilmanpaineen aiheuttamana ylöspäin. Painovoiman aiheuttamana vesi pyrkii valumaan alaspäin, minkä takia ulkopinnat ja rakennuksiin kuuluvat varusteet tulee viettää pois päin rakennuksesta. Valuva vesi voi päästä rakenteisiin epätiiveyskohdista. Lisäksi huokoisen rakennusmateriaalin esim. puun ollessa kosketuksissa veden kanssa voi tapahtua veden kapilaarista nousua (RT 05-10710 1999,3-4.)

#### 4.7 Lämmön siirtyminen rakenteissa

Rakenteissa lämpö siirtyy joko johtumalla (konduktio), säteilemällä tai konvektion välityksellä. Lämpö on molekyylien tai atomien värehtelyliikettä.

Johtumisella eli konduktiolla tarkoitetaan lämmön virtaamista, jolloin liike-energia siirtyy molekyylien välillä. Lämpö virtaa aina kylmästä lämpimään, eli se pyrkii tasoittumaan väliaineessa. Kiinteissä ja nestemäisissä aineissa esiintyy lämmön johtumista (Siikanen 2016, 15-16.)

Lämpösäteilyssä (emissio) tarkoittaa lämpöenergian siirtymistä sähkömagneettisen aaltoliikkeen välityksellä. Absoluuttisen nollapisteen yläpuolella lämpötilaltaan olevat kappaleet emittoivat eli lähettävät säteilyä. Kappaleiden säteilemä lämpö on pitkäaaltoista, kun taas auringon aiheuttama lämmön säteily on lyhytaaltoista (Mts.)

Konvektio tarkoittaa lämmön siirtymistäväliaineena toimivan nesteen tai kaasun virtauksen mukana. On olemassa pakotettuja ja luonnollisia konvektioita. Luonnollinen konvektio aiheutuu lämpötilaerojen vaikutuksesta, mikä saa aikaan virtauksen. Pakotetussa konvektiossa ulkopuolinen tekijä saa nesteen tai kaasun virtaamaan esim. koneellinen ilmanvaihto (Mts.)

## 5 Mikrobi- ja homevauriot

Rakenteisiin voi muodostua bakteeri, lahottaja- tai homesienikasvustoa. Näitä eläviä organismeja kutsutaan mikrobeiksi. Riittävä vesi, lämmön, ravinteiden, ilman ja ajan määrä mahdollistaa mikrobeille hyvät kasvuolosuhteet. Näistä tärkeimpinä esiin nousee lämpötila ja kosteus (RIL 205-2011, 152.)

### 5.1 Homeen ja mikrobien syntymisen edellytykset

Mikrobikasvuston muodostuminen on mahdollista, kun suhteellinen ilman kosteus ja ympäröivän ilman kosteus ylittää pitkiksi ajoiksi 75-80% rajan. Rasituksen ollessa yhtäjaksoista ja lämpötilan ollessa korkea, mikrobikasvustoa voi muodostua ilman suhteellisen kosteuden ollessa 70-75%. (RIL250-211, 154). Mikrobit ovat terveydelle haitallisia, sillä ne saattavat aiheuttaa ihmisissä erilaisia allergisia reaktioita tai pahoinvointia. (Puuinfo Oy N.d). Lahottajasieni taas puolestaan hajottaa puuta heikentäen sen lujuusominaisuuksia. Yleisimmät lahottajat Suomessa ovat runkolahottajia (Ympäristöministeriö 2016, 128.)

Lämpötilalla on suuri vaikutus homeen kehittymiseen. Ilman suhteellisen kosteuden ollessa alle 90% homeen kasvu on hidasta. Lämpötilan ollessa 20-40 °C ja ilman suhteellisen kosteuden ollessa yli 95% homesienillä on hyvät kasvuolosuhteet. Hometta pystyy muodostumaan myös alle 5 °C lämpötilassa, jos ilman suhteellinen kosteus pysyy pitkiä aikoja yli 90-95%. Materiaalien valinnalla on suuri merkitys homeen muo-

dostumiseen. Monille eri pinnoille pystyy muodostumaan homeetta riittävän lämpötila, kosteuden ja ajan aiheuttamana. Lyhyet kosteuskuormat eivät aiheuta homeen kasvua, jos rakenteet pääsevät välillä kuivamaan. (RIL 250-2011, 155-157.)

Lämpötilan ollessa yli 5 °C ja ilman suhteellisen kosteuden yli 95% pitkiä ajanjaksoja, voi rakenteeseen muodostua lahoa. Lahon kehittyminen edellyttää samat olosuhteet kuin homeen kehittyminen. Homeen kehittyminen ei vaadi niin pitkää ajanjaksoa kuin lahon kehittyminen. Yleensä lahon kehittyminen vaatii viikkoja tai jopa kuukausia kestävän olosuhteiltaan suotuisan ajanjakson. Alle 90% suhteellisessa ilmastokosteudessa ei muodostu lahoa. Yleisimmin lahoa kehittyy vasta silloin, kun materiaalit ovat kokonaan märkiä eli 100% suhteellinen ilmankosteus on ylittynyt. (RIL 250-2011, 159.)

## 5.2 Homehtumisriskin arviointi eri materiaaleille

Materiaalit on jaettu taulukon 2 mukaisesti homehtumisherkkyyssuokkiin. VTT ja TTY on kehittänyt Suomalaisen homemallin, jonka avulla voidaan tutkia homeen kasvua. Homeen muodostumista lämpötilan ja kosteusolosuhteiden vaikutuksella pystytään arvioimaan homemallin avulla (Tampereen yliopisto N.d.)

Taulukko 2. Homehtumisherkkyyssuokat eri materiaaleille (Tampereen yliopisto N.d.)

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

Ilman suhteellisen kosteuden pudotessa alle 80-85% tai lämpötilan pudotessa alle 0 °C homeen muodostuminen loppuu. Homeen muodostumisen pysähtyessä alkaa taantuminen. Jokaiselle homehtumisherkkyyssuokalle on määritelty taantumaluokat taulukon 4 mukaan (Mts.)

Taulukko 3. Homeen taantumaluokat (Tampereen yliopisto N.d.)

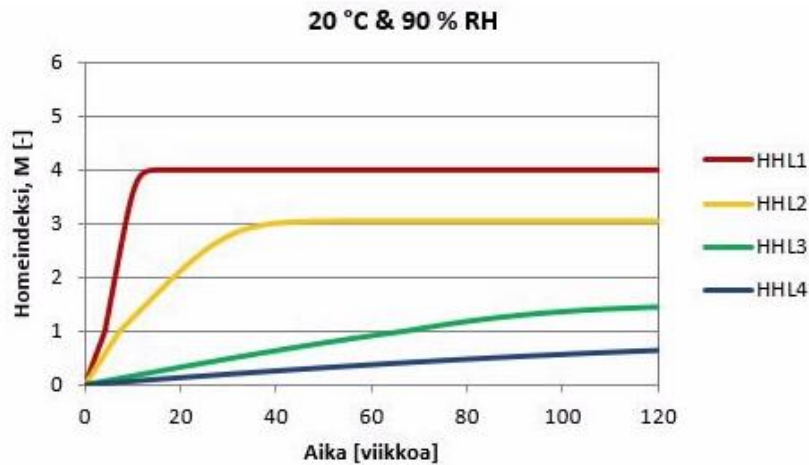
Homehtumis-herkkyyssluokka	Homeen taantumaluokka
HHL1	HTL2 Merkittävä taantuma
HHL2	HTL3 Kohtalainen taantuma
HHL3	HTL4 Vähäinen taantuma
HHL4	HTL4 Vähäinen taantuma

Homeen kasvua kuvaillaan homeindeksin avulla, jossa on homeen suuruus vaihtelee 0-6 välillä. Homeindeksi kertoo vain homeen kasvuedellytyksistä materiaalissa, eikä millaisia homeita voi mahdollisesti muodostua (Mts.)

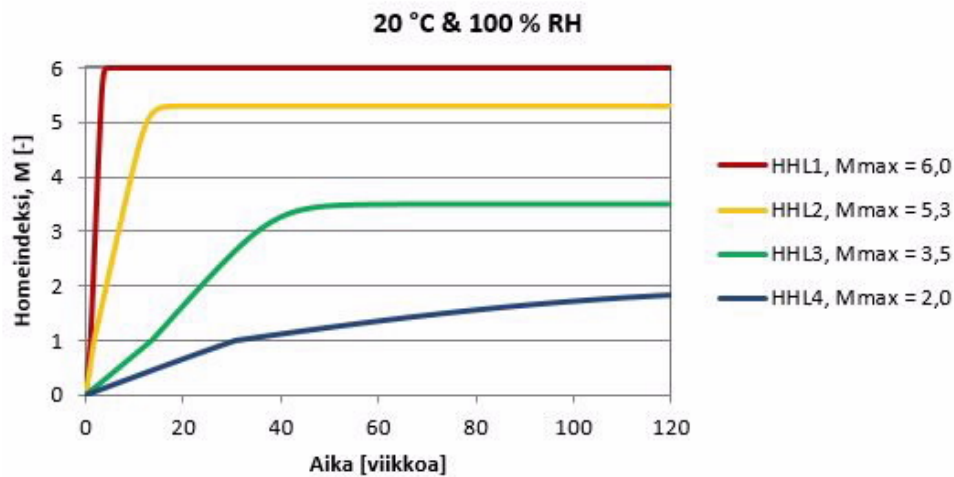
Taulukko 4. Homeindeksi M (Tampereen yliopisto N.d)

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

TTY:n sivuilla on annettu havainnollistavia kuvia homeen kasvunopeudesta eri homehtumisherkkyyssluokissa (kuviot 14 ja 15).



Kuvio 11. Homeen muodostuminen eri homehtumisherkkyyssuokissa lämpötilan ollessa 20 °C ja ilman suhteellisen kosteuden 90% (Tampereen yliopisto N.d.)



Kuvio 12. Homeen muodostuminen eri homehtumisherkkyyssuokissa lämpötilan ollessa 20 °C ja ilman suhteellisen kosteuden 100% (Tampereen yliopisto N.d.)

### 5.3 Puun mikrobivaurioituminen

Puun kosteuden ollessa pitkään yli 20% puu alkaa vaurioitumaan. Tämän tyyppisessä tilanteessa ympärillä olevan ilman suhteellinen kosteus on yli 80-90%. Ilman suhteellisen kosteuden pysyessä yli 80% korkoisena, muutamassa kuukaudessa puu alkaa homehtumaan. Kriittisenä arvona voidaan pitää jo 70% suhteellista ilmankosteutta. Puu alkaa lahoamaan suhteellisen ilmankosteuden ollessa yli 90%. Puun lahoaminen ja homehtuminen vaatii 0 - 40 °C lämpötilan, joten kovilla pakkasilla puu ei pääsee vaurioitumaan, vaikka ilman suhteellinen kosteus olisi pitkiä aikoja korkealla. Lämpötilan lisäksi homeitiöt ja lahosienet tarvitsevat happea ja ravinteita, mitä on riittävästi

ympäröivässä ilmassa ja puussa. Puun lujuuden kannalta home ei ole haitallista, sillä se ei pääse tunkeutumaan pintaa syvemmälle. (Puuinfo Oy N.d.)

## 6 Lait ja määräykset

### 6.1 Ympäristöministeriön asetus 782/2017

Ympäristöministeriön asetus 782/2017 määrittää perustan rakennusten kosteustekniselle suunnittelulle. Asetus on tullut voimaan 1.1.2018. Asetus koskee kaikkea rakentamista, mikä toteutetaan asetuksen voimaantulon jälkeen. Asetuksessa 782/2017 on määritetty rakennuksen kosteusteknisestä toimivuutta koskevat vaatimukset. Alla keskeisimmät määräykset rakennuksen kosteusteknisestä suunnittelusta. (A 782/2017.)

*Pääsuunnittelijan, rakennussuunnittelijan ja erityissuunnittelijan on tehtäviensä mukaisesti huolehdittava rakennuksen suunnittelusta siten, että rakennus käyttötarkoituksensa mukaisesti täyttää sen kosteustekniselle toimivuudelle asetetut olennaiset tekniset vaatimukset. Suunnittelijan on rakennuksen korjaus- ja muutostyössä tai käyttötarkoituksen muutoksessa selvitettävä rakennuksen rakennusaikainen rakentamistapa ja rakenteen kosteustekninen toimivuus (A 782/2017, 3 §.)*

*Rakennuksen, rakenteiden ja rakennusosien on oltava sisäiset ja ulkoiset kosteusrasitukset huomioon ottaen kosteusteknisesti toimiva niiden suunnitellun teknisen käyttöiän ajan. Rakennuksen liian suuri kosteuspi-toisuus tai kosteuden kertyminen rakennuksen osiin tai sisäpinnoille ei saa vaurioittaa rakennusta eikä aiheuttaa rakennuksessa oleskeleville terveyshaittaa (Mts.)*

*Sisäisistä ja ulkoisista kosteuslähteistä peräisin oleva vesihöyry, vesi, lumi tai jää ei saa haittaa aiheuttaen kulkeutua rakenteisiin. Sadevesi tai lumi ei saa kulkeutua eikä kosteus saa kerääntyä vaipparakentee-*

*seen myöskään ikkunoiden, ovien tai muiden vaippaan liittyvien rakenteiden, rakennusosien ja laitteiden kautta. Rakennuksen vaipan ja sen rakennekerrosten ja liitosten on muodostettava kokonaisuus, joka estää tuulta, viistosadetta ja tuulenpainetta kuljettamasta vettä vaipan pintaa pitkin rakenteisiin (A 782/2017, 5 §.)*

*Rakennuskosteuden ja rakenteisiin ulko- tai sisäpuolelta satunnaisesti kulkeutuvan kosteuden on voitava poistua haittaa aiheuttamatta. Pinnoiltaan kastuvien rakenteiden on kestävä veden vaikutus (Mts.)*

## 6.2 Lämmönläpäisykerroin

Kappaleessa käydään läpi RIL255-2004 mukainen laskenta U-arvolle ja konvektiolle. Teoksessa on määritetty ohjeet U-arvon ja konvektion laskentaan EN-ISO-10456-standardin mukaisesti.

### 6.2.1 Lämmönläpäisykerroin laskenta

EN ISO-10456-standardin mukaan lämmönläpäisykerroin lasketaan seuraavien kaavojen avulla. Lisäksi standardi sisältää kaavat korjatun lämmönläpäisykerroin laskentaan. Kohdassa 1 lasketaan lämmönvastus ( $R$ ) yksittäiselle ainekerrokselle kaavalla:

$$R = \frac{d}{\lambda_U} \quad (1)$$

Jossa

$R$	Ainekerroksen lämmönvastus,	[W/(m <sup>2</sup> K)]
$d$	ainekerroksen paksuus,	[m <sup>2</sup> K/W]
$\lambda_U$	ainekerroksen lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvo,	[W/(mK)].

Kohdassa 2 lasketaan rakennusosan kokonaislämmönvastus ( $R_T$ ) rakennusaineiden ollessa rinnan tai peräkkäin lämpövirran suunnasta katsottuna kaavalla:

$$R_T + R_{si} + R_1 + R_2 + \dots R_n + R_{se} \quad (2)$$

Jossa

$R_T$	rakennusosan kokonaislämmönvastus,	[m <sup>2</sup> K/W]
$R_{si}$	sisäpuolen pintavastus,	[m <sup>2</sup> K/W]
$R_1 + R_2 + \dots R_n$	rakennusosan ainekerrosten 1, 2, ...,n lämmönvastukset,	[m <sup>2</sup> K/W]
$R_{se}$	ulkopuolen pintavastus,	[m <sup>2</sup> K/W].

Lämmönvastus yksittäiselle ainekerrokselle lasketaan kohdan 3 mukaisesti.

Kohdassa 3 lasketaan rakenteen kokonaislämmönvastus ( $R_T$ ) keskiarvona rakennuksen yläikiarvosta ( $R'_T$ ) ja alalikiarvosta ( $R''_T$ ), jos rakenteessa on erilaisia lämmönjoh-  
tavuudeltaan olevia rinnakkaisia kerroksia lämpövirran suuntaan nähden kaavalla:

$$R_T = \frac{R'_T + R''_T}{2} \quad (3)$$

Jossa

$R'_T$	rakennusosan kokonaislämmönvastuksen yläikiarvo,	[m <sup>2</sup> K/W]
$R''_T$	rakennusosan kokonaislämmönvastuksen alalikiarvo,	[m <sup>2</sup> K/W].

Kohdassa 4 lasketaan kokonaislämmönvastuksen yläikiarvo ( $R'_T$ ). Laskenta toteutetaan jakamalla rinnakkaiset ainekerrokset peräkkäisiin yksittäisiin lohkoihin, jotka ovat lämpövirran suunnassa peräkkäin. Lohkoille lasketaan kohdan 3 mukaan kokonaislämmönvastukset ja ne sijoitetaan kohdan 5 kaavaan:

$$\frac{1}{R'_T} = \frac{f_a}{R_{Ta}} + \frac{f_b}{R_{Tb}} + \dots + \frac{f_q}{R_{Tq}} \quad (4)$$

Jossa

$R'_T$	rakennusosan kokonaislämmönvastuksen yläikiarvo, [m <sup>2</sup> K/W]
$f_a, f_b, f_q$	lohkojen a, b, ..., n osuudet rakennusosan lämpövirran suuntaan nähden kohtisuorasta pinta-alasta, -
$R_{Ta}, R_{Tb}, R_{Tn}$	lohkojen a, b, ..., n kokonaislämmönvastukset, [m <sup>2</sup> K/W].

Kohdassa 5 lasketaan yhteen kerrokseen jaetun rakenneosan eri kerrosten erilaiset lämmönvastukset. Kerrokset ovat koko rakennusosan pituisia ja kohtisuorassa lämpövirtaan nähden. Lämmönvastukset rinnakkaisille lohkoille lasketaan kohdan 2 mukaan.

$$\frac{1}{R''_j} = \frac{f_a}{R_{aj}} + \frac{f_b}{R_{bj}} + \dots + \frac{f_q}{R_{qj}} \quad (5)$$

Jossa

$R''_j$	rakennusosan kerroksessa j yhdistettävien rinnakkaisten lohkojen a, b, n yhteenlaskettu lämmönvastus, [m <sup>2</sup> K/W]
$f_{ja}, f_{jb}, \dots, f_{jc}$	yhdistettävien rinnakkaisten lohkojen a, b, ..., n osuudet
$R_{ja}, R_{jb}, \dots, R_{jn}$	rakennusosan lämpövirran suuntaan nähden kohtisuorasta pinta-alasta, - rakennusosan kerroksessa j yhdistettävien rinnakkaisten lohkojen a, b, ..., n lämmönvastukset, [m <sup>2</sup> K/W].

Kohdassa 6 lasketaan kokonaislämmönvastuksen alalikiarvo ( $R''_T$ ) rakenneosalla, kun rinnakkaisten lohkojen lämmönvastukset on yhdistetty kaavalla:

$$R''_T = R_{si} + (R''_1 + R''_2 + \dots + R''_j) + (R_1 + R_2 + \dots + R_k) + R_{se} \quad (6)$$

Jossa

$R''_T$	rakennusosan kokonaislämmönvastuksen alalikiarvo, [m <sup>2</sup> K/W]
$R_{si}$	sisäpuolen pintavastus, [m <sup>2</sup> K/W]
$R_{se}$	ulkopuolen pintavastus, [m <sup>2</sup> K/W]
$R''_1, R''_2, \dots, R''_j$	rakennusosan kerroksissa a, b, ..., j olevien rinnakkaisten lohkojen yhdistetyt lämmönvastukset, [m <sup>2</sup> K/W]

$R_1 + R_2 + \dots + R_k$  rakennusosan kerroksissa a, b, ..., k lämmönvastukset.

Kohdassa 7 määritetään lämmönläpäisykerroin (U) kaavalla:

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (7)$$

Jossa

$U$  rakennusosan lämmönläpäisykerroin, [W/(m<sup>2</sup>K)]  
 $R_T$  rakennusosan kokonaislämmönvastus, [m<sup>2</sup>K/W].

### 6.2.2 U-arvo vaatimukset

Ympäristöministeriön asetuksessa 1010/2017 on annettu eri rakenteiden U-arvojen vertailuarvoja. Vaipan lämpöhäviö lämpimällä tai jäähdytettävällä kylmällä tilalla ei saa alittaa vertailuarvoja:

- Seinä, 0,17 W/(m<sup>2</sup>K)
- Massiivipuuseinä, keskimääräinen paksuus vähintään 180mm, 0,40 W/(m<sup>2</sup>K)
- Ulkoilmaan rajoittuva alapohja ja yläpohja, 0,09 W/(m<sup>2</sup>K)
- maata vasten oleva rakennusosa, 0,16 W/(m<sup>2</sup>K)
- ryömintätilaan rajoittuva alapohja, 0,17 W/(m<sup>2</sup>K)
- Ovi, ikkuna, kattovalokupu, kattoikkuna, uloskäynti- ja savunpoistoluukku, 1,0 W/(m<sup>2</sup>K).  
(A 1010/2017, 24§.)

Puolilämpimälle ja siirtokelpoiselle rakennukselle laskettava lämpöhäviö ei saa olla alle:

- Seinä, 0,26 W/(m<sup>2</sup>K)
- Massiivipuuseinä, keskimääräinen paksuus vähintään 180mm, 0,60 W/(m<sup>2</sup>K)
- Ulkoilmaan rajoittuva alapohja ja yläpohja, 0,14 W/(m<sup>2</sup>K)
- maata vasten oleva rakennusosa, 0,24 W/(m<sup>2</sup>K)
- ryömintätilaan rajoittuva alapohja, 0,26 W/(m<sup>2</sup>K)
- Ovi, ikkuna, kattovalokupu, kattoikkuna, uloskäynti- ja savunpoistoluukku, 1,4 W/(m<sup>2</sup>K).  
(A 1010/2017, 24§.)

Loma-asunnon rakenteiden lämpöhäviö ei saa alittaa arvoja:

- Seinä, 0,24 W/(m<sup>2</sup>K)
- Massiivipuuseinä, keskimääräinen paksuus vähintään 180mm, 0,80 W/(m<sup>2</sup>K)
- Ulkoilmaan rajoittuva alapohja ja yläpohja, 0,15 W/(m<sup>2</sup>K)
- maata vasten oleva rakennusosa 0,24 W/(m<sup>2</sup>K)
- ryömintätilaan rajoittuva alapohja 0,19 W/(m<sup>2</sup>K),
- Ovi, ikkuna, kattovalokupu, kattoikkuna, uloskäynti- ja savunpoistoluukku, 1,4 W/(m<sup>2</sup>K).  
(A 1010/2017, 24§.)

### 6.2.3 Konvektion laskenta

RIL 255-2004 sisältää ohjeet luonnollisen konvektion laskennalle. Luonnollista konvektiota tulee vähentää siten, ettei siitä tapahdu haittaa yläpohja- ja ulkoseinärakenteille. Luonnollisen konvektion määrittämiseen on kehitetty Rayleighin luku ( $Ra_m$ ), jonka laskettua arvoa verrataan ennalta määrättyihin raja-arvoihin. Raja-arvon ylittyessä lämmöneriste tulee vaihtaa, tai rakeenteellisin toimenpitein tulee estää luonnollinen konvektio. Laskenta muunnetulle Rayleighin luvulle tapahtuu kaavalla:

$$Ra_m = k \frac{d \kappa \Delta T}{\lambda} \quad (7)$$

Jossa

$Ra_m$	muunnettu Rayleighin luku,	-
$d$	lämmöneristeen paksuus,	[m]
$\kappa$	lämmöneristeen ilmanläpäisevyys,	[m <sup>3</sup> /(m s Pa)]
$\eta$	ilman dynaaminen viskositeetti 10 °C lämpötilassa (0,0175x10 <sup>-3</sup> Pa s),	[Pa s]
$\Delta T$	lämmöneristekerroksen sisÄ- ja ulkopinnan välinen lämpötilaero,	[K]
$\lambda$	lämmöneristeen johtavuuden suunnitteluarvo,	[W/(m K)]
$k$	kerroin, jonka arvo on 3x10 <sup>6</sup> ,	[kg/(m <sup>2</sup> s <sup>3</sup> K <sup>2</sup> )].

EN ISO 10456-standardissa muunnetulle rayleighin luvulle on annettu raja-arvot ulkoseinien ja yläpohjien osalta. Yläpohjat ei saa ylittää arvoa ( $Ra_m$ ) 15, kun lämpövirran suunta on ylöspäin ja lämmöneristeen yläpinta on avoin. Lämmöneristeen yläpinnassa käytettäessä tuulensuojaa, arvo saa olla jopa 30. Ulkoseinillä arvo saa olla vain 2,5 lämpövirran siirtyessä vaakasuunnassa.

## 7 Rakennejärjestelmät

### 7.1 Yleistä

Puu on hyvä rakennusmateriaali. Se on helposti saatavilla, se tuottaa noin 70% uusiutuvasta energiasta Suomessa ja puuteollisuus työllistää jopa 200 000 suomalaista.

Suomen metsissä kasvaa vuosittain runsaasti puuta. Puun käyttö on kasvanut rakentamisessa, mutta sitä voitaisiin lisätä entisestään. Suurimpia puurakentamisen kasvumahdollisuuksia ovat julkiset rakennukset, hallit, kerrostalot, sillat, pihat ja muu ympäristön rakentaminen. Noin 80% Suomen sahatavaran kulutuksesta käytetään rakentamiseen. (puuinfo Oy 2020.)

Puurakentaminen alkoi kehittymään voimakkaasti 90-luvun aikana. Palomääräyksien muututtua vuonna 1997 mahdollistui puun käyttö 4-kerroksisten rakennusten rungoissa ja julkisivuissa. 5-8-kerroksisten rakennusten rakentaminen mahdollistui 15.4.2011 uuden lainsäädännön myötä. Nykyisten palomääräysten mukaan voi suunnitella 8-kerroksisia puurakennuksia (Mts.)

Suomeen rakennettiin 87 yli kaksikerroksista puista asuinkerrostaloa vuonna 2019. Eripuolilla Suomea tullaan rakentamaan puukerrostaloja tulevina vuosina reilusti lisää. Terveellisen ja viihtyisän sisäilmaston tavoitteellisuuden takia uusia kouluja, päiväkotia, työpaikkarakennuksia ja muita yleisiä rakennuksia halutaan rakentaa puusta. (Mts.)

### 7.2 RunkoPES

Runko-PES on järjestelmä, mikä on luotu helpottamaan puurakenteisten kerrostalojen suunnittelua. Runko-PES perustuu puuelementtirakentamisen vakiointiin asuntotuotannossa. Se mahdollistaa rakennuksen suunnittelun ja samalla mahdollistaa eri tuotteiden ja ratkaisuvaihtoehtojen käytön ja yhdistelyn. Jännemittojen, kerroskorkeuksien ja rakennepakuuksien suositukset kerrotaan RunkoPES:issä. Lisäksi RunkoPES sisältää erilaisia esimerkkejä rakennevaihtoehdoista. Suunnittelun ensimmäiset

vaiheet helpottuvat huomattavasti, sillä ainoastaan tilanvaraukset tarvitaan. Seuraavissa vaiheissa voidaan vertailla eri vaihtoehtoja ja valita niistä tilanteeseen sopivimmat.

Pilari-palkki-järjestelmä tai kantavat seinät voivat toimia runkojärjestelmänä. Ranka- ja massiivipuurakenteet toimivat välipohja- ja seinärakenteina. Elementtien liitoskohtien pysyessään ennallaan energiatehokkuutta voidaan säädellä ulkovaipassa. Tila- ja tasoelementeissä voidaan muokata liittymäperiaatteita. Elementtien geometrian, tiivistys- ja kiinnitysperiaatteiden sekä moduuliviivojen tulee pysyä vakiona. (Puuinfo Oy N.d.)

### 7.3 Yleisimpiä rakennejärjestelmiä puurakentamisessa

#### 7.3.1 Massiivipuu (CLT)

CLT-levyillä on mahdollista toteuttaa kantavia seiniä. CLT-levyn jäykistävän ominaisuuden ansiosta ne toimivat jäykistävän sekä kantavana rakenteena välipohjissa ja seinissä. Massiivipuiset CLT-elementit valmistetaan tehdasoloissa, missä tarvittavat liitokset ja aukot tehdään elementteihin. Massiivipuisilla CLT-elementeillä on mahdollista toteuttaa jopa 12-kerroksisia rakennuksia. CLT-levyjä valmistetaan eri vahvuksina ja niitä on mahdollista toteuttaa 3x16 metrin kokoisina. (Puuinfo Oy N.d.)

#### 7.3.2 Pilari-palkkijärjestelmä

Pilari-palkkijärjestelmässä käytetään joko kertopuuta (LVL) tai liimapuuta (GLT) rakennuksen runkona. Runko koostuu pilareista ja palkeista, jotka kannattelevat ulkoseinät sekä väli- ja yläpohjarakenteet. Mastopilarit ja vinositeet hoitavat normaalisti rungon jäykistyksen. Tarvittaessa jäykistyksen apuna voidaan käyttää levyjäykistystä. Pilari-palkkijärjestelmä mahdollistaa avoimen muuntojoustavan pohjaratkaisun ja julkisivujen suuret aukotukset. (Mts.)

Työvaiheeltaan rakentaminen on nopeaa. Pilareista ja palkeista koostuvan rungon valmistuttua asennetaan vesikatto, jotta rakennus on sääsuojattu. Ulkoseinien ulkoverhousmateriaali ja eristepaksuus voidaan valita kohteen tarpeiden mukaan. Ulkoseinät asennetaan suurelementteinä. (Mts.)



Kuvio 13. Pilari-palkkijärjestelmä (Puuinfo Oy N.d.)

### 7.3.3 Rankarakenteet (avoin puurakennejärjestelmä)

Rankarakenne on tavanomaisin rakennejärjestelmä puurakentamisessa. Rankarakenteet pohjautuvat kerroksittaiseen rakentamiseen ja kantaviin seiniin. Rakennus on kätevä toteuttaa rankarakenteilla jännevälillä ollessa 4-6m. Rakennuksen ulkoseinät ja osa väliseinistä toimivat normaalisti kantavina linjoina. (Puuinfo Oy N.d.)

Vakiomittaiset viilu - tai liimapuut, runkotolpat, ala- ja yläjuoksut sekä ovi- ja ikkunaukkojen kehäpuut muodostavat kevytrakenteisen suurelementin rungon. Elementit voivat olla kantavia tai ei-kantavia. Rakenne levytetään lopuksi eristämisen jälkeen. Kotelo-, ripalaatta tai palkkivälipohja muodostaa tavanomaisesti rankarakenteisen välipohjarakenteen. (Mts.)

Rankarakenteilla on mahdollista toteuttaa 6 kerroksinen rakennus. Rankarakenteiden käytöstä on paljon aiempaa kokemusta. Elementit ovat nopeita asentaa. Asentaminen tulee toteuttaa kuivissa ja suojaisissa olosuhteissa, jotta seuraavat vaiheet voidaan aloittaa mahdollisimman nopeasti elementtien asennuksen päätyttyä. (Mts.)



Kuvio 14. Rankarakenteet (Puuinfo Oy N.d.)

#### 7.3.4 Tilaelementti

Tilaelementtirakenteinen rakennus valmistetaan erilaisista ennalta tehtaalla valmistetuista tilayksiköistä. Kantava runko, seinät, katto ja lattia muodostavat tilaelementtikokonaisuuden. Tilaelementtien oikea valmistus onnistuu vain tehdasoloissa. Kalusteet, ikkunat ja LVIS-varusteet asennetaan elementteihin sekä pinnoitus viimeistellään tehtaalla enne toimitusta. Tilaelementtien kantavat rakenteet voidaan toteuttaa monella eri tavalla. Yleisimpiä niistä ovat pilari-palkki, kehä tai laattamaiset suurelementit. Laattamaiset suurelementit toteutetaan joko massiivipuulevyillä tai rankarakenteilla. Tilaelementtien asennus on todella nopeaa. (Puuinfo Oy N.d.)



Kuvio 15. Tilaelementti (Puuinfo N.d.)

## 8 Puuseinärakenteiden kosteus- ja lämpötekkinen suunnittelu

### 8.1 Sadevedet ja vuodot

Puurakenteisten seinien erilaisten saumojen ja liitosten vedenpitävyys tulee aina varmistaa. Puurakenteiden suuret kosteudesta aiheutuvat liikkeet tulee myös huomioida suunnittelussa. Vaakapinnat tulee aina kallistaa ulospäin rakenteesta, tai varmistaa sadeveden johtaminen pois päin rakenteesta jollain muulla ratkaisulla. Tarvittaessa rakenteen vaakapinnat tulee suojata. Puu-ulkoverhouksen suunnittelu tulee toteuttaa siten, että veden imeytyminen liitoksiin ei aiheuta suurta haittaa. Puuverhoilun suojaksi suositellaan vähintään 400mm pitkiä räystäitä. (RIL 107-2012, 75.)

### 8.2 Rakenteiden kuivatus

Vuotovesien johdattaminen tulee järjestää pois rakenteesta vaakasuuntaisten rakenneliitosten välityksellä, joihin lukeutuvat esimerkiksi ovi- ja ikkunaliitokset, eri materiaalien liitokset sekä perusmuurin ja seinärakenteen liitoskohta. Tuuletusvälin käyttö on pakollista kevyiden ulkoverhosten, kuten puu-ulkoverhouksen yhteydessä. Tuuletusvälin minimi leveys on 20mm ja sen olisi hyvä olla yhteydessä ulkoilmaan eri kerrosten kohdalta. Tuuletusväli tulisi toteuttaa siten, että tuuletus tapahtuu alhaalta ylöspäin, eikä mikään tuki tuuletusväliä. Tuuletusvälin tulee olla avoin ylä- ja alapäästä sekä ovi- ja ikkuna-aukkojen kohdalta. Vaakalaudoituksen taakse tulee asentaa pystykoolaus, jotta rakenne pääsee tuulettumaan ja kuivamaan. Käytettäessä rappattua julkisivua puurakennuksessa, tulee julkisivurappaus toteuttaa tuuletetulle levyrakenteelle. (RIL 107-2012, 75.)

Eristeen valinnalla on suuri merkitys seinän kosteus- ja lämpötekkiniseen toimintaan. Seinän ulkopinnassa sijaitsevan tuulensuojalevyn tulee olla vesihöyryä läpäisevää, jos käytetään avohuokoisia lämmöneristeitä. Lisäksi tuulensuojalevyn suositellaan eristävän hyvin lämpöä, jotta rakenteen kosteustekniset ominaisuudet parantuisivat. (Mts. 75-76.)

Seinän alapäässä sijaitsevan tuuletusraon toimivuus tulee aina suunnitella siten, että mikään ei estä rakenteen tuulettuvuutta. Lisäksi seinän aluspuu erotetaan kivirakenteesta esimerkiksi kumibitumikermillä, jotta kosteus ei pääse nousemaan rakenteessa. Ulkoseinän aluspuun kuivuminen tulee varmistaa rakenteen ulkopuoliseen tuuletusväliin. Lisäksi ulkoseinän alaohjauspuu ei saa sijaita perusmuurin ulkokuoren alapuolella, sillä rakenteen kuivuminen hidastuu ja vuotovedet aiheuttavat lisää rasi- tusta rakenteille. Rakennetta ympäröivän maanpinnan ollessa lattiatason lähellä, tulee puurakenteet nostaa maanpinnan yläpuolelle vähintään perusmuurin yläpintaan ja samalla tehdä perusmuurin ulkopintaan vedeneristys. (Mts. 76.)

### 8.3 Ilmantiiveys

Höyrynsulku ja ilmansulku tulee sijoittaa avohuokoisten lämmöneristysten sisäpintaan rankarakenteisissa ulkoseinissä. Tuulensuoja tulee sijoittaa lämmöneristykseen ulkopintaan, jotta haitallisen ilmavirtaukset estyvät. Kalvomaiset ilman- tai höyrynsulut tulee asentaa, että lämmöneristeestä yli 75% on höyrynsulun ulkopuolella. Sisäpuolinen lämmöneriste höyrynsulusta katsottuna tulee asentaa vasta sitten, kun rakenne on pääosin kuivunut. Rankojen kohdalle tiivistyvä kosteus aiheuttaa eniten vaurioita. Höyrynsulun sijoittaminen lämmöneristykseen ulkopuolelle tuottaa vähiten ongelmia kosteuden kannalta. Hyvän vesihöyrynvastuksen omaavat levyt tai umpisoluiset solumuovieristeet voivat toimia sisäpinnassa ilman- tai höyrynsulkuna, kun kyseessä on rankaseinät avohuokoisella eristyksellä. (RIL 107-2012, 76-77.)

Välipohjan ja ulkoseinänä liitoskohtaan syntyy helposti ilmavuotoja. Höyrynsulun jatkuvuus tulee varmistaa asentamalla välipohja siten, että höyrynsulkua pystytään jatkamaan yhtenäisenä välipohjan yli. Esimerkiksi välipohjaa kannattelevat palkit päättyvät höyrynsulun sisäpintaan, jotta höyrynsulku ei katkea missään kohdassa. (RIL 107-2012, 77.)

Sisäinen konvektio tulee estää asentamalla avohuokoiset eristeet tiivistii rajoittuviin pintoihin nähden. Eristekerrokset tulee limittää, jos käytetään montaa eri kerrosta. Sisäistä konvektiota voidaan estää myös asentamalla eristeiden väliin ilmansulku, joka läpäisee riittävästi vesihöyryä. Ajanmittainen painuma tulee ottaa huomioon

suunnittelussa. Tuulensuoja ulkopinnassa ja höyrynsulku sisäpinnassa voidaan jättää pois seinärakenteesta, jos käytetään umpisoluisia solumuovieristeitä. Tämä edellyttää levyjen välisten saumojen vaahdottamisen elastisella polyuretaanivaahdolla. Rakenteet tulee suunnitella siten, että niihin ei muodostu kylmäsiltoja. (RIL 107-2012, 77.)

## 8.4 Julkisivun liitosten suunnittelu

Kappaleessa tarkastellaan RIL 107-2012-teoksen ohjeistuksia ulkoseinärakenteiden veden- ja kosteuden eristykseen liittyen. Opinnäytetyön kannalta selvitettiin vain ulkoseiniä koskevia ohjeistuksia.

### 8.4.1 Ovi- ja ikkunaliitokset

Ikkunoiden karmit tulee asentaa siten, että niiden tiivisteet kiinnittyvät tasaisesti. Ikkunan liitoskohdat tulee suunnitella ilmatiiviiksi ja sadevettä kestäväksi. Karmi ja seinärakenteen ilmatiiviskerros tulee liittää ilmatiiviisti. Seinän ja ikkunan välisen liitoksen kautta tulee mahdollistaa vuoto- ja kondenssiveden poistuminen rakenteesta, esim. pelti- tai bitumikaistan avulla. Ikkuna- ja oviliitosten saumat tulee tiivistää. Saumojen ulkopinnat tulee suojata sadevedeltä esimerkiksi puulistalla. Ikkunan alaosassa sijaitsevan vesitiiviin materiaalin (esim. pelti) avulla tulee johdattaa kaikki kosteus pois ikkunarakenteesta. Pellityksen vähimmäiskaltevuus on 1:3 ja se tulee ulottaa 30mm rakenteesta sekä varustaa tippanokalla. Peltien lämpöliikkeet tulee huomioida suunnittelussa (RIL 107-2012, 83-83.)

### 8.4.2 Julkisivun liitokset

Julkisivuliitokset tulee aina suunnitella siten, että vuotovedet ei aiheuta haittaa rakenteelle. Mikäli ulkoverhouksen läpi pääsee vuotovesiä, ne tulee aina johdattaa pois rakenteesta. Saumojen mahdolliset liikkeet tulee aina huomioida suunnittelussa. Pellityksellä tai muulla vesitiiviillä materiaalilla tulee suojata viisto- ja vaakapinnat. Pellityksiin pätee samat ohjeistukset kuin ovi- ja ikkunaliitoksiin. Lisäksi pellityksiin tehdään ylösnostot vähintään 300mm, kun kyseessä on pystypintoihin kohdistuva liitos.

Ulkoseinään kiinnitettävät laitteet tulee suunnitella siten, että niistä ei aiheudu ylimääräistä kosteusrasitusta rakenteelle (RIL 107-2012, 85.)

Seinärakenteen liittyessä johonkin vaakarakenteeseen esimerkiksi parvekkeeseen tai katokseen, tulee varmistaa kummankin rakenteen vedeneristyksen toimivuus. Vuoto-vesien poisjohtamisen kannalta on tärkeää, että vaakarakenteen vedeneristys nostetaan riittävän ylös seinärakenteeseen tai seinäverhouksen taakse. (Mts.)

#### 8.4.3 Vaakarakenteiden liitokset ulkoseinärakenteisiin

Vesi ei saa päästä seinän kautta valumaan ulkoseinään liitettyjen vaakarakenteiden (esim. parveke tai katos) vedeneristyksen alle. Myös veden kulkeutuminen vaakarakenteesta seinärakenteen vedeneristyksen alle tulee estää. Vaakarakenteen yläpuolella sijaitsevaan seinärakenteeseen päässyt vesi tulee ohjata pois rakenteesta. Vaakarakenteen vedeneristys asennetaan seinäverhouksen taakse tai riittävän ylös seinärakennetta vasten, jotta yläpuolisesta rakenteesta valuva vesi valuu pois rakenteesta. Lumi ja roiskevedet eivät saa aiheuttaa vaurioita rakenteelle, joten puujulkisivujen alareunan olisi hyvä sijaita vähintään 300mm:n päässä vaakapinnoista. (RIL 107-2012, 85-86.)

#### 8.4.4 Ulkoseinän ja perusmuurin liitokset

Perustuksen ja ulkoseinän välinen liitos tulee suunnitella mahdollisimman ilma- ja höyrytiiviksi. Kosteuden kapillaarinen nousu alapuolisesta maasta on estettävä. Lisäksi kylmäsiltojen muodostuminen on estettävä. Seinän tuulettuvuus tulee varmistaa sekä vuoto- ja roiskevedet tulee ohjata ulos rakenteesta. Yleisesti ulkoseinän tulisi olla 300mm ylempänä maanpintaan nähden tai ylempänä. Mikäli edellä mainittu ei toteudu, täytyy ulkoseinän kosteusrasitusta pienentää esimerkiksi maanpinnan muotoilulla tai perusmuurin ulkopinnan vedeneristyksellä (RIL 107-2012, 86.)

## 9 Tutkittavien rakenteiden lämpötila- ja kastepistetarkastelut

### 9.1 Sääolosuhteiden määrittäminen

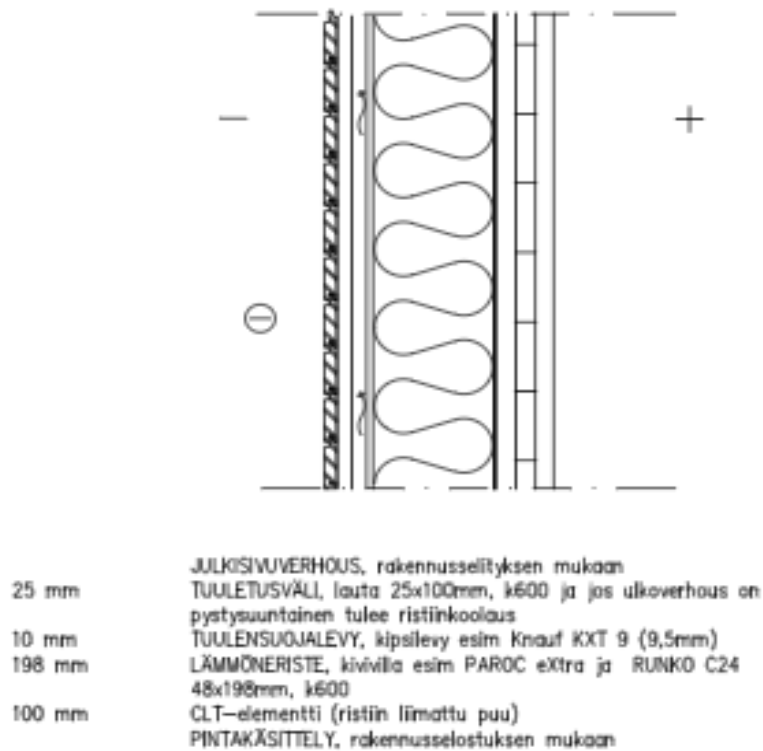
Opinnäytetyön toteutukseen valittiin viisi erilaista seinärakennetta, joiden kosteus- ja lämpötekniikka käyttäytymistä tutkittiin kosteuden ja lämmön siirtymisen osalta. Rakenteita tutkittiin laskemalla DOF-Lämpö-ohjelmalla rakenteiden U-arvot- ja kastepisteet. Rakenteita tarkasteltiin nykyilmastossa ja oletetussa ilmastossa 50- ja 100-vuoden päästä. Lopuksi tuloksia vertailtiin keskenään. Tulokset laskettiin säävyöhyke 3 arvoilla. Nykyisessä ilmastossa mitoittavalla hetkellä sisälämpötila on +21 °C ja ulkolämpötila -32 °C. Suhteellinen kosteus nykyisessä ilmastossa on rakennuksen sisällä 50% ja ulkona 90% (A 1010/2017.)

Mitoitustilanteessa 50 vuoden päästä mitoittavana ulkolämpötilana käytettiin -28 °C ja sisälämpötilana +21 °C. Ulkopuolisena suhteellisena kosteutena käytettiin 90% ja rakennuksen sisällä 50%.

Mitoitustilanteessa 100 vuoden kuluttua käytettiin mitoittavana ulkolämpötilana -25 °C ja sisälämpötilana +21 °C. Ulkopuolisena suhteellisena kosteutena käytettiin 95% ja sisäpuolisena 50%.

Tulevaisuuden lämpötilat ja suhteelliset kosteudet valittiin tarkastelemalla ilmatieteen laitoksen testivuosiaineistoja. Testivuosiaineistojen tulosten perusteella valittiin tulevaisuuden lämpötilat ja suhteelliset kosteudet, joita käytettiin mitoittavina tilanteina laskelmissa. Testivuodet pohjautuvat 1980-2009 vuosina kerättyyn ilmasto-dataan. Laskelmissa käytetyt arvot valittiin suuntaa antavasti ilmatieteenlaitoksen testivuosiaineistojen perusteella. Tulevaisuuden sääaineistot eivät ole täysin luotettavia, sillä tulevaa ilmastoa on mahdoton ennustaa erilaisten muuttujien takia täysin varmaksi. (Ilmatieteen laitos 2013.)

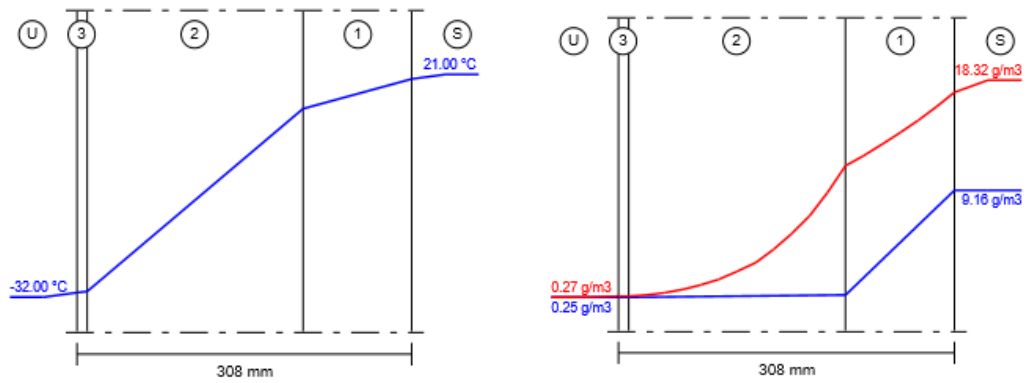
## 9.2 US1 Lämmöneristys ja puuverhous, CLT-rakenne sisäpinnassa + kivivilla ja tuulensuojalevy



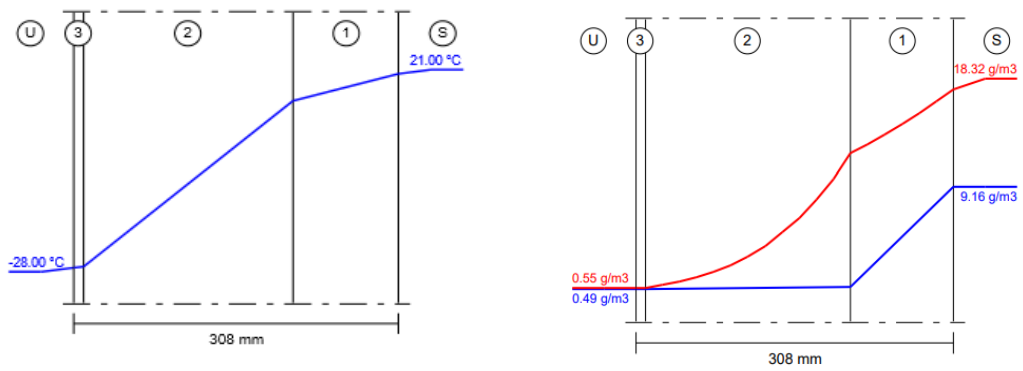
Kuvio 16. US1 ulkoseinärakenne.

- Knauf KXT 9(kerros 3)
  - paksuus: 9,5mm
  - lämmönjohtavuus: 0,230 W/mK
  - vesihöyryn läpäisevyys:  $2,00 \times 10^{-9}$  kg/msPa
- PAROC eXtra (kerros 2)
  - paksuus: 198mm
  - lämmönjohtavuus: 0,036 W/mK
  - vesihöyryn läpäisevyys:  $2,00 \times 10^{-10}$  kg/msPa
- CLT-elementti (kerros 1)
  - paksuus: 100mm
  - lämmönjohtavuus: 0,11 W/mK
  - vesihöyryn läpäisevyys  $2.000 \times 10^{-12}$  kg/msPa

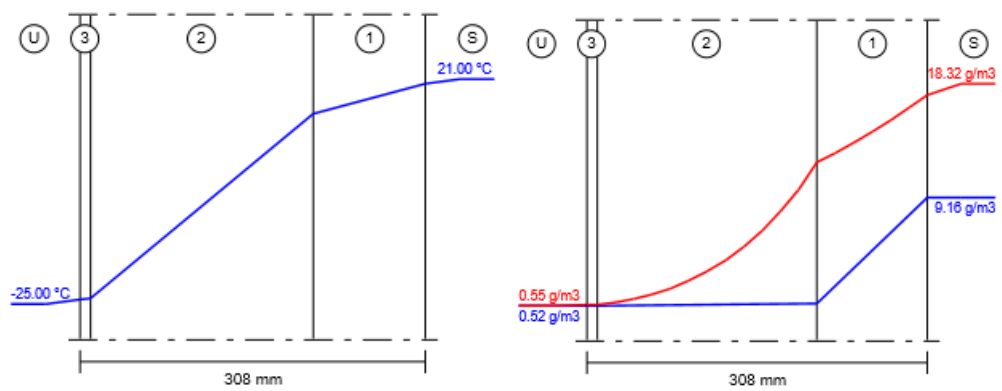
## 9.2.1 Laskelmat eri ilmastossa US1



Kuvio 17. Lämpötilat ja kosteudet US1 (nykyinen).



Kuvio 18. Lämpötilat ja kosteudet US1 (50v).



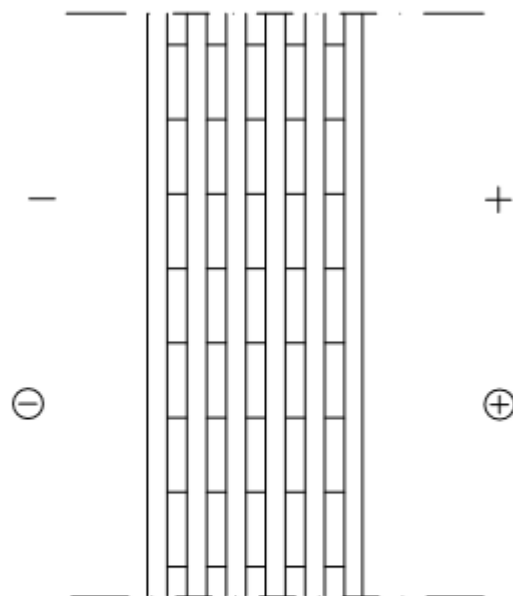
Kuvio 19. Lämpötilat ja kosteudet US1 (100v).

Kuviossa 17, 18 ja 19 vasemmalla puolella on esitetty lämpötilan vaihtelua rakenteen eri kerroksissa. Oikealla puolella on esitetty kyllästymiskosteutta ja kosteusmäärää kuvaavat kuvaajat. Kyllästymiskosteutta kuvataan punaisella viivalla ja kosteusmäärää sinisellä. Kuvaajien leikkauskohdassa rakenteeseen alkaisi kondensoitumaan kosteutta. Kuvaajista voidaan päätellä, että rakenteeseen ei pääse muodostumaan kastepistettä.

Tulokseksi saatiin:

- U-arvo: 0,17W/m<sup>2</sup>K
- Kondensaation määrä: 0,0 g/m<sup>2</sup>

### 9.3 US2 CLT-massiivirakenne



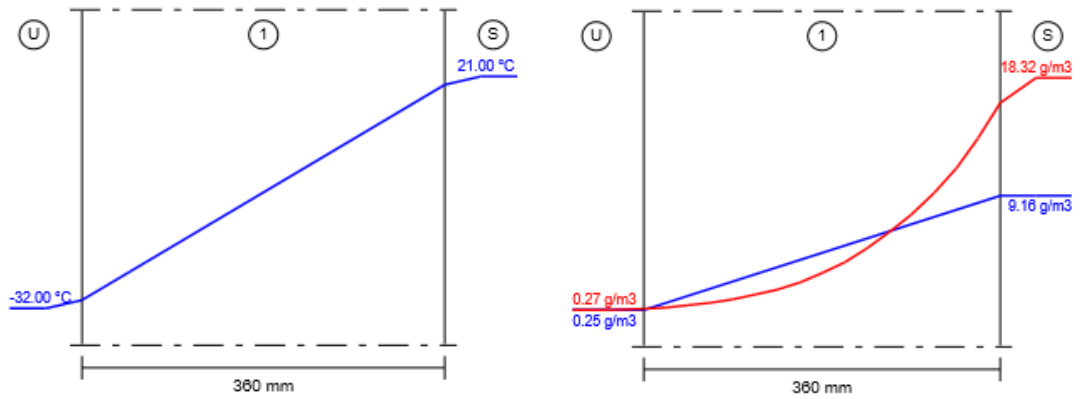
- Pintakäsittely rakennuslaseen mukaan
- 360mm CLT-elementti (ristiin liimattu puu)
- Pintakäsittely rakennuslaseen mukaan

Kuvio 20. US2 ulkoseinärakenne.

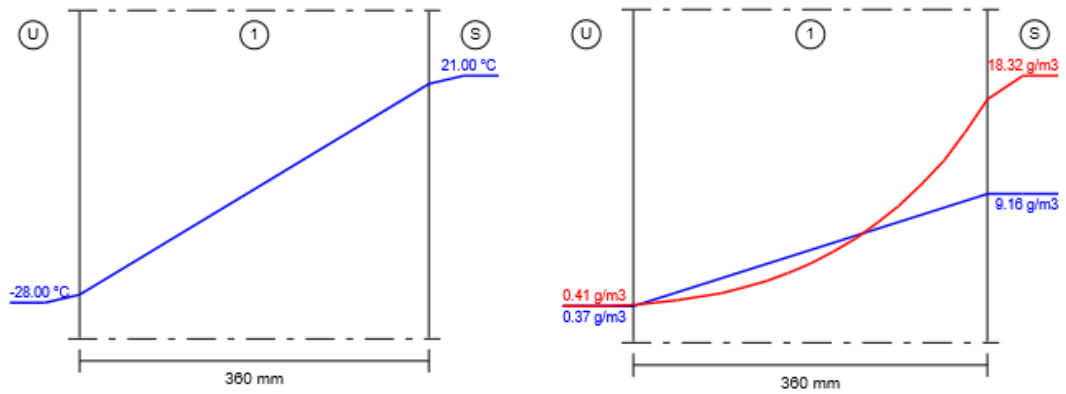
- CLT-elementti
  - paksuus: 360mm
  - lämmönjohtavuus: 0,11 W/mK

- o vesihöyryn läpäisevyys  $2.000 \times 10^{-12}$  kg/msPa

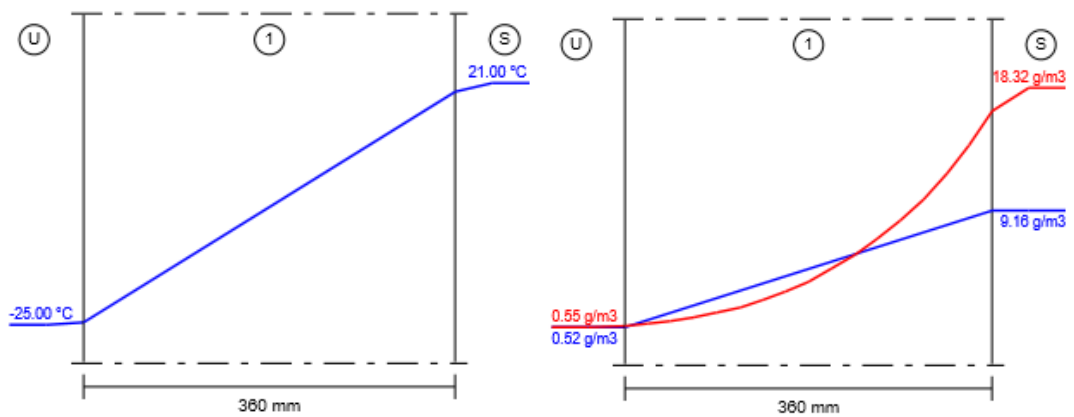
### 9.3.1 Laskelmat eri ilmastoissa US2



Kuvio 21. Lämpötilat ja kosteudet US2 (nykyinen).



Kuvio 22. Lämpötilat ja kosteudet US2 (50v).



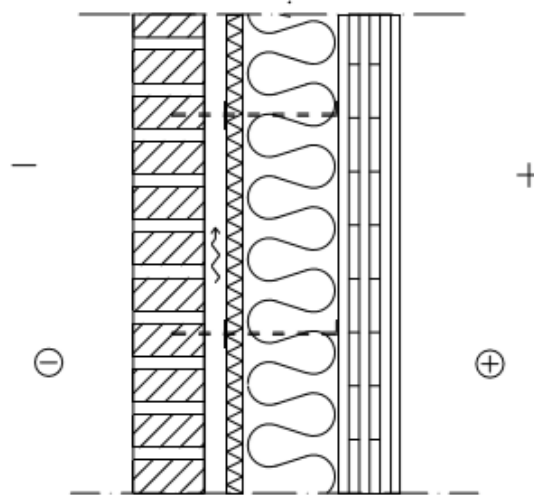
Kuvio 23. Lämpötilat ja kosteudet US2 (100v).

Kuviossa 21, 22 ja 23 vasemmalla puolella on esitetty lämpötilan vaihtelua rakenteen eri kerroksissa ja ilmastoissa. Oikealla puolella on esitetty kyllästymiskosteutta ja kosteusmäärää kuvaavat kuvaajat. Kyllästymiskosteutta kuvataan punaisella viivalla ja kosteusmäärää sinisellä. Massiivi CLT on hengittävä rakenne, eli rakenteella on korkea tehollinen kosteuskapasiteetti. Rakenne siis sitoo itseensä vesihöyryä hygroskooppisena kosteutena. Ilmanvaihto kuivaa rakenteen kosteuden laskiessa. (Siikainen 2016, 166). Kuvaajien perusteella voidaan päätellä, että rakenteeseen ei muodostu kastepistettä, vaikka kosteusmäärä ylittää kyllästymiskosteuden.

Tulokseksi saatiin:

- U-arvo: 0.30 W/m<sup>2</sup>K
- Kondensaation määrä: 0,00 g/m<sup>2</sup>

## 9.4 US3 Lämmöneristys ja tiiliverhous, CLT-rakenne sisäpinnassa

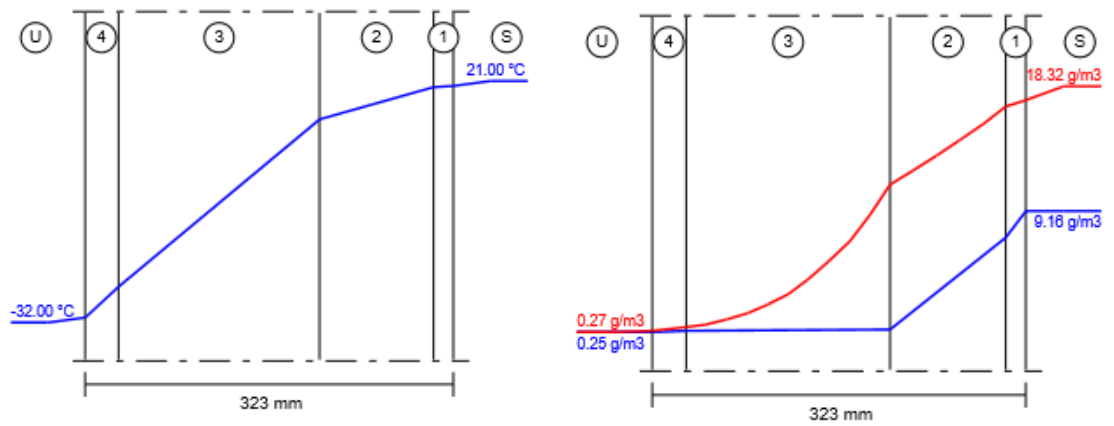


130 mm	Tiilimuuraus 130 mm ark. mukaan, muurauslaasti M100/600, muuraussiteet ruostumatonta terästä, vähintään 4 kpl/m <sup>2</sup> , aukkojen pielet, nurkat ja liikuntasaumot 6 kpl/m <sup>2</sup> Rauditus 2E7 (RST) aukkojen ylä- ja alapuoleisessa saumassa sekä ylimässä ja alimassa saumassa. Tiilimuurauksen joka kolmas sauma jätetään tuuletukseen varmistamiseksi auki alimassa sekä kolmanneksi alimassa tiilimuurausvarvissa.
40 mm	Tuuletettu ilmarako
30 mm	Tuulensuoja, Mineraalivilla Paroc Cortex (lambda design 0,033), saumat tiivistetään saumausteipillä tuotetoimittajan ohjeen mukaan. Mekaaniset syöpyrättömät kiinnikkeet alustaan (4...6 kpl/m <sup>2</sup> ).
175 mm	LÄMMÖNERISTE, kivivilla esim PAROC eXtra
100 mm	CLT-elementti (ristiin liimattu puu)
18 mm	Kuitukipsilevy, Fermacell kuitukipsilevy 18 (lambda design 0,316) PINTAKÄSITTELY, rakennusselostuksen mukaan

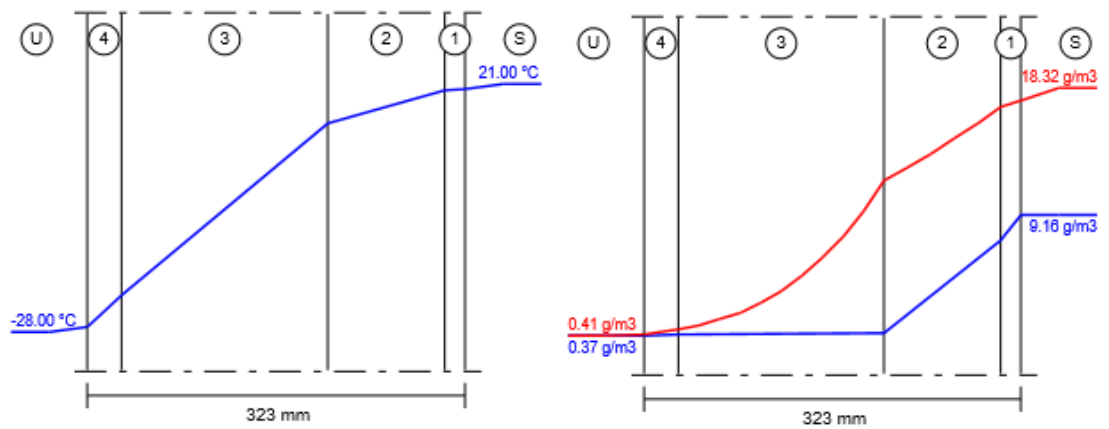
Kuvio 24. US3 ulkoseinärakenne.

- Paroc Cortex
  - paksuus: 30mm
  - lämmönjohtavuus: 0,033 W/mK
  - vesihöyrynläpäisevyys:  $4,902 \times 10^{-11}$  kg/msPa
- PAROC eXtra
  - paksuus: 175mm
  - lämmönjohtavuus: 0,036 W/mK
  - vesihöyrynläpäisevyys:  $2,00 \times 10^{-10}$
- CLT-elementti
  - paksuus: 100mm
  - lämmönjohtavuus: 0,11W/mK
  - vesihöyrynläpäisevyys:  $2,00 \times 10^{-12}$ kg/msPa
- Fermacell kuitukipsilevy 18
  - paksuus: 18mm
  - lämmönjohtavuus: 0,316W/mk
  - vesihöyrynläpäisevyys:  $1,25 \times 10^{-12}$ kg/msPa

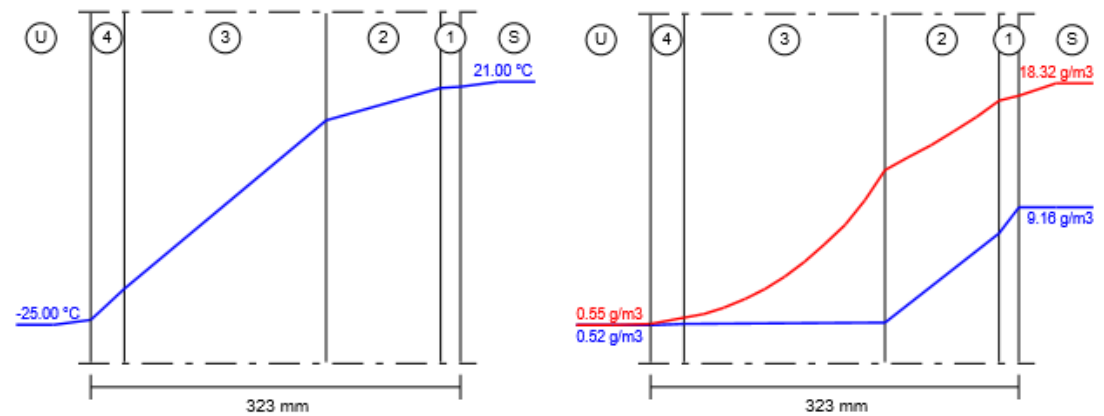
## 9.4.1 Laskelmat eri ilmastoissa US3



Kuvio 25. Lämpötilat ja kosteudet US3 (nykyinen).



Kuvio 26. Lämpötilat ja kosteudet US3 (50v).



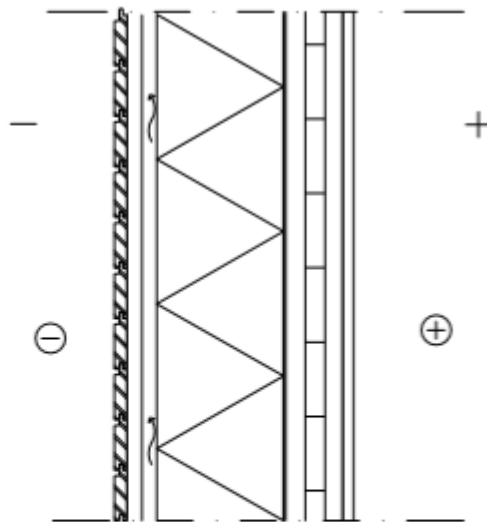
Kuvio 27. Lämpötilat ja kosteudet US3 (100v).

Kuviossa 25, 26 ja 27 vasemmalla puolella on esitetty lämpötilan vaihtelua rakenteen eri kerroksissa. Oikealla puolella on esitetty kyllästymiskosteutta ja kosteusmäärää kuvaavat kuvaajat. Kyllästymiskosteutta kuvataan punaisella viivalla ja kosteusmäärää sinisellä. Kuvaajien leikkauskohdassa rakenteeseen alkaisi kondensoitumaan kosteutta. Kuvaajista voidaan päätellä, että rakenteeseen ei muodostu kastepistettä.

Tulokseksi saatiin:

- U-arvo: 0.15 W/m<sup>2</sup>K
- Kondensaation määrä: 0,00 g/m<sup>2</sup>

## 9.5 US4 Lämmöneristys ja puuverhous, CLT-rakenne sisäpinnassa + jäykkä mineraalivilla

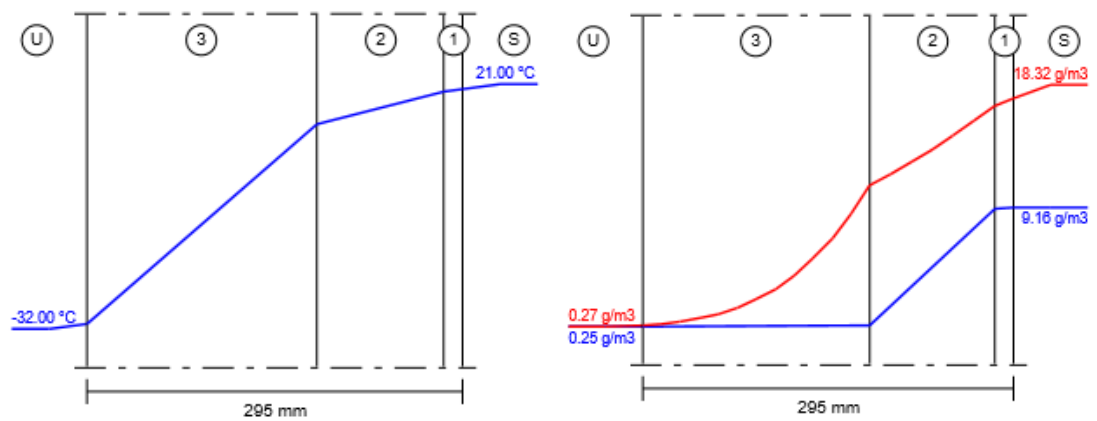


25 mm	JULKISIVUVERHOUS, rakennusselityksen mukaan
180 mm	TUULETUSVÄLI, Pystykoolaus 2x25x50
100 mm	TS-eriste, Paroc Cortex One 180mm (lambda design 0,033W/mk)
15 mm	CLT-elementti (ristiin liimattu puu)
	Gyproc GFE 15 palokipsilevy
	PINTAKÄSITTELY, rakennusselostuksen mukaan

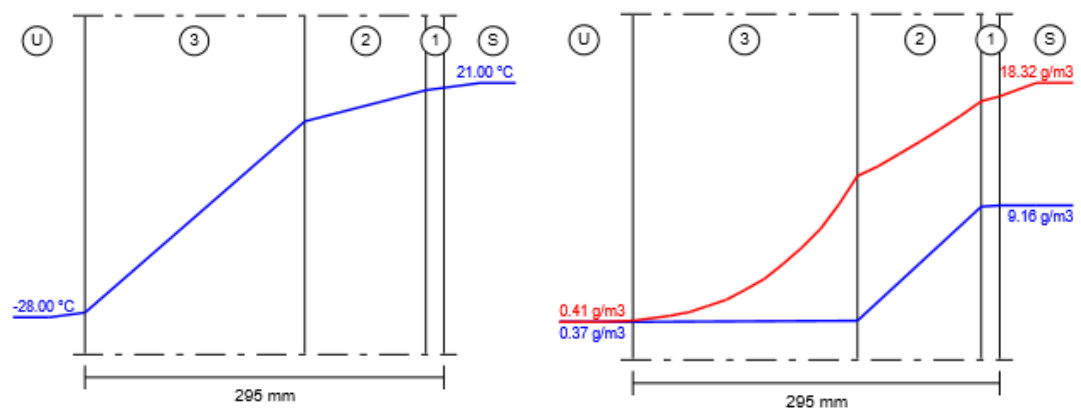
Kuvio 28. US4 ulkoseinärakenne.

- Paroc Cortex One 180mm
  - paksuus: 180mm
  - lämmönjohtavuus: 0,033W/mK
  - vesihöyrynläpäisevyys:  $5,00 \times 10^{-10}$  kg/msPa
- CLT-elementti
  - paksuus: 100mm
  - lämmönjohtavuus: 0,11W/mK
  - vesihöyrynläpäisevyys:  $2,00 \times 10^{-12}$  kg/msPa
- Gyproc GFE 15
  - paksuus: 15mm
  - lämmönjohtavuus: 0,250W/mk
  - vesihöyrynläpäisevyys:  $2,00 \times 10^{-11}$  kg/msPa

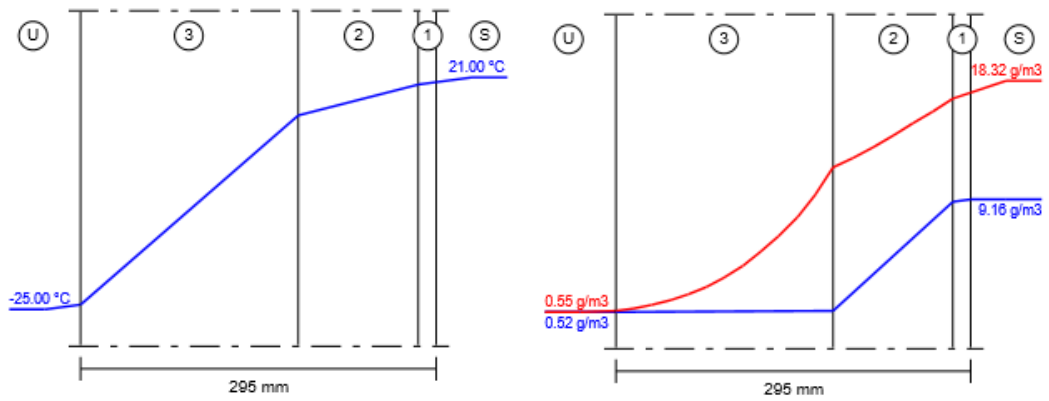
### 9.5.1 Laskelmat eri ilmastoissa US4



Kuvio 29. Lämpötilat ja kosteudet US4 (nykyinen).



Kuvio 30. Lämpötilat ja kosteudet US4 (50v).



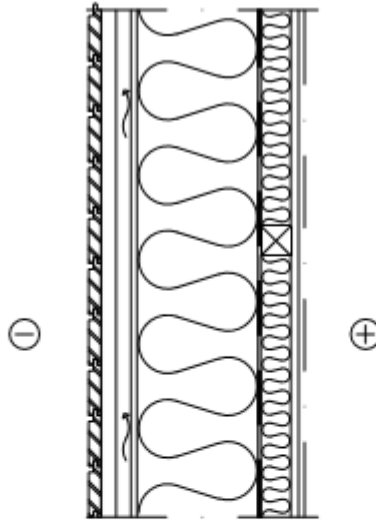
Kuvio 31. Lämpötilat ja kosteudet US4 (100v).

Kuviossa 29, 30 ja 31 vasemmalla puolella on esitetty lämpötilan vaihtelua rakenteen eri kerroksissa. Oikealla puolella on esitetty kyllästymiskosteutta ja kosteusmäärää kuvaavat kuvaajat. Kyllästymiskosteutta kuvataan punaisella viivalla ja kosteusmäärää sinisellä. Kuvaajien leikkauskohdassa rakenteeseen alkaisi kondensoitumaan kosteutta. Kuvaajista voidaan päätellä, että rakenteeseen ei muodostu kastepistettä.

Tulokseksi saatiin:

- U-arvo: 0.16 W/m<sup>2</sup>K
- Kondensaation määrä: 0,00 g/m<sup>2</sup>

## 9.6 US5 Puurakenteinen puurankaseinä



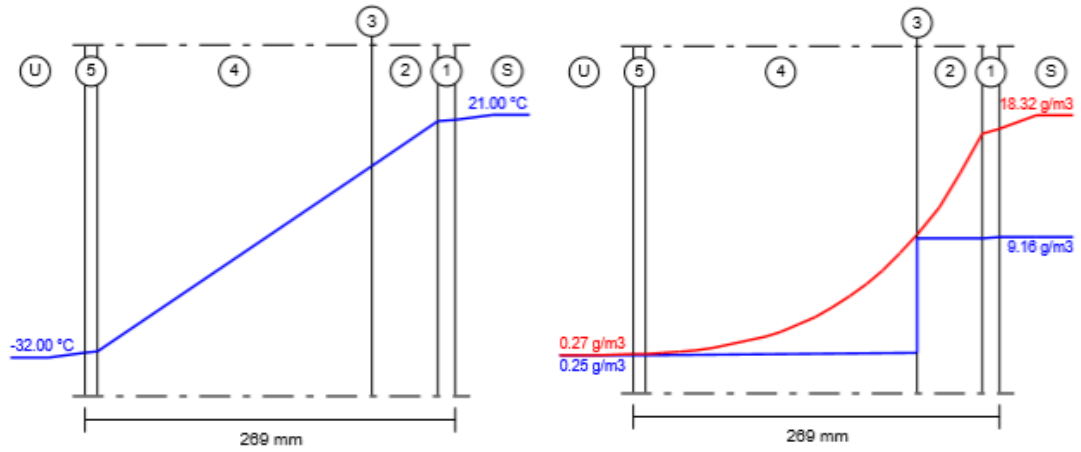
25 mm	JULKISIVUVERHOUS, rakennusselityksen mukaan
	TUULETUSVÄLI, lauta 25x100mm, k600 ja jos ulkoverho on pystysuuntainen tulee ristiinkoolaus
10 mm	TUULENSUOJALEVY, kipsilevy esim Knauf KXT 9 (9,5mm)
198 mm	LÄMMÖNERISTE, kivivilla esim PAROC eXtra ja KANTAVA RUNKO C24 48x198mm, k600
0,2 mm	ILMAN- TAI HÖYRYNSULKU, höyrynsulkumuovi (PEL, luokka E/SFS 4225), saumat 300 mm limittäin ja teipaten koolauksen kohdalla. Asennus rungon ja koolauksen väliin
48 mm	LÄMMÖNERISTE, kivivilla PAROC eXtra ja koolaus 48x48mm, k600
13 mm	RAKENNUSLEVY, kipsilevy
	TASOITE, ylitasoitus, vähäalkainen ja kaseiiniton
	PINTAMATERIAALI TAI -KÄSITTELY, huoneselityksen mukaan

Kuvio 32. US5 ulkoseinärakenne.

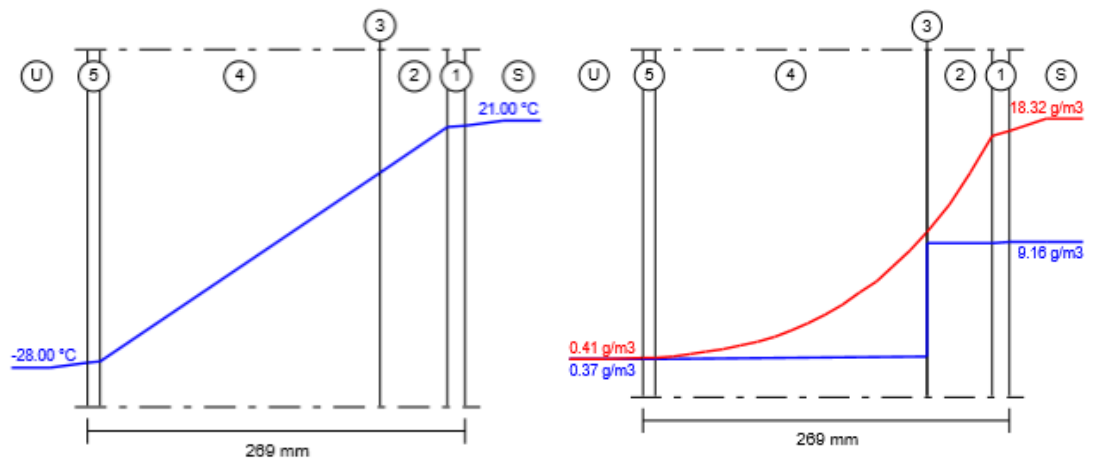
- Knauf KXT 9
  - paksuus: 9,5mm
  - lämmönjohtavuus: 0,23W/mK
  - vesihöyrynläpäisevyys:  $2,00 \times 10^{-9}$  kg/msPa
- PAROC eXtra
  - paksuus: 198mm
  - lämmönjohtavuus: 0,036W/mK
  - vesihöyrynläpäisevyys:  $2,00 \times 10^{-10}$  kg/msPa
- PE-kalvo
  - paksuus: 0,15mm
  - lämmönjohtavuus: 10,0W/mk
  - vesihöyrynläpäisevyys:  $3,75 \times 10^{-15}$  kg/msPa
- PAROC eXtra
  - paksuus: 48mm
  - lämmönjohtavuus: 0,036W/mK
  - vesihöyrynläpäisevyys:  $2,00 \times 10^{-9}$  kg/msPa
- Gyproc GN 13

- paksuus: 13mm
- lämmönjohtavuus: 0,250 W/mK
- vesihöyrynläpäisevyys:  $2,00 \times 10^{-11}$

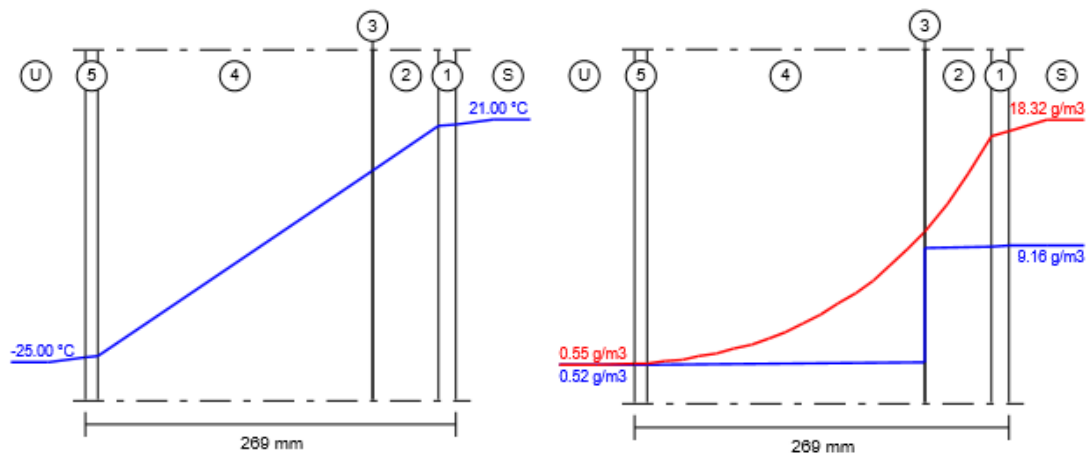
### 9.6.1 Laskelmat eri ilmastoissa US5



Kuvio 33. Lämpötilat ja kosteudet US5 (nykyinen).



Kuvio 34. Lämpötilat ja kosteudet US5 (50v).



Kuvio 35. Lämpötilat ja kosteudet US5 (100v).

Kuviossa 33, 34 ja 35 vasemmalla puolella on esitetty lämpötilan vaihtelua rakenteen eri kerroksissa. Oikealla puolella on esitetty kyllästymiskosteutta ja kosteusmäärää kuvaavat kuvaajat. Kyllästymiskosteutta kuvataan punaisella viivalla ja kosteusmäärää sinisellä. Kuvaajien leikkauskohdassa rakenteeseen alkaisi kondensoitumaan kosteutta. Kuvaajista voidaan päätellä, että rakenteeseen ei muodostu kastepistettä.

Tulokseksi saatiin:

- U-arvo: 0.15 W/m<sup>2</sup>K
- Kondensaation määrä: 0,00 g/m<sup>2</sup>

## 10 Tulosten arviointi

### 10.1 Lämpötila- ja kastepistetarkastelu

Laskelmista todettiin tutkittavien ulkoseinärakenteiden toimivan oletetuissa ilmastossa. Mihinäkään ulkoseinärakenteeseen ei todettu kondensoituvan kosteutta nykyisessä tai tulevaisuuden ilmastossa. CLT-rakenteet estävät hyvin kosteuden siirtymistä diffuusion välityksellä. Tämä on huomattavista kosteus eroista CLT-kerrosten ulko- ja sisäpuolella. CLT-rakenteet eivät siis tarvitse erillistä höyrynsulkua, kuten esimerkiksi

perinteinen rankarunkoinen ulkoseinä US5. CLT toimii hyvin rakenteessa höyrynsulkuna.

Ulkoseinissä 1-3 ja 4 CLT sitoo itseensä kosteutta ja tasaa kosteuspitoisuuksia rakenteessa. Lisäksi seinissä käytettävien mineraalivillojen hygroskooppisuuden voidaan havaita olevan vähäistä, sillä lämpötila ja kosteus laskevat nopeasti eristekerroksen kohdalla. US2 rakenteessa massiivi CLT sitoo itseensä kosteutta, joka pyrkii kuivamaan esimerkiksi ilmanvaihdon ansiosta.

## 10.2 Homehtumisriski

Tutkimuksessa käytettyjen ulkoseinärakenteiden homehtumisriskiä tarkasteltiin TTY:n ja VTT:n laatiman ”Suomalaisen homemallin” tuloksien avulla. Ulkoseinärakenteissa 1-4 ei ole yhtään HHL1-luokkaan (taulukko 4) kuuluvia materiaaleja. Kaikki ulkoseinissä 1-4 olevat materiaalit kuuluvat joko HHL2 tai HHL3. Kuvioiden 11 ja 12 perusteella voidaan päätellä, että nykyisessä ilmastossa rakenteet voivat saavuttaa homehtumisindeksin mukaisen arvon 1-3. Tämä edellyttää kuitenkin viikkojen tai kuukausien kestoista korkeaa ilman suhteellista kosteutta ja lämpötilaa. Oletetuissa tulevaisuuden ilmastoissa homeindeksin arvo voisi nousta jopa 3-5 välille.

Perinteinen rankarunkoinen ulkoseinä (US5) sisältää puurungon, joka kuuluu luokkaan HHL1 (taulukko 4). Kuviosta 11 ja 12 voidaan päätellä, että US5 voi saavuttaa homeindeksin mukaan arvon 4, mikäli olosuhteet pysyvät homeen kannalta suotuisina. Tutkimuksessa käytetyillä tulevaisuuden ilmastoilla US5 voisi saavuttaa homeindeksin mukaisen arvon 6. Tämä edellyttää kuitenkin pitkäaikaiset olosuhteet, jotka ovat suotuisat homeen kasvulle.

## 10.3 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tutkittavissa ilmastoissa ei todettu syntyvän kondenssiriskiä tutkittaville rakenteille. Rakenteisiin ei muodostu kastepistettä lämpötilojen ja ilmankosteuksien muutoksista huolimatta tulevaisuudessa. CLT-rakennetta voidaan pitää varmempana vaihtoehtona vesihöyrynläpäisevyyden kannalta. CLT-rakenne ei tarvitse erillistä höyrynsulkua

kuten rankarunkoinen seinä. Erillisen höyrynsulun asennuksessa voi mahdollisesti tapahtua virheitä, jotka aiheuttavat haitallisen kosteuden pääsyä rakenteeseen.

Rakenteita tutkittiin myös TTY:n ja VTT:n kehittämän Suomalaisen homemallin avulla. Yleisellä tasolla voidaan todeta, että ilmastonmuutos tulee lisäämään homehtumisriskiä ulkoseinissä. CLT-rakenteisilla ulkoseinillä on kuitenkin pienempi riski homeenkasvulle kuin perinteisellä rankarunkoisella (US5) ulkoseinällä.

Kosteus- ja lämpötarkastelun sekä homeriskianalyysin lisäksi rakenteiden kosteus- ja lämpötekniinen toimivuus tulee varmistaa oikeinlaisella kokonaisuuden suunnittelulla ja toteutuksella. Rakenteiden ilmantiiveys, kuivatus sekä sade- ja vuotovesien poistuminen tulee toteutua oikein, jotta rakenteisiin ei muodostu kosteudesta tai lämmöstä erilaisia vaurioita. Lisäksi rakenteisiin ei saa muodostua haitallisia kylmäsiltoja.

Ulkoseinien tai ylipäätään rakennuksien kosteus- ja lämpötekniistä toimivuutta tarkastellessa tulee huomioida, että rakenteet koostuvat rakennetyyppien lisäksi muiden tekijöistä. Rakenteissa on paljon eri yksityiskohtia ja detaljeja, jotka ovat tärkeänä osana toimivaa kokonaisuutta. Jokainen yksityiskohta tulee suunnitella ohjeiden ja määräysten mukaan, jotta rakennuksen toimivuus varmistuu. Yksittäinenkin virhe (esim. LVI-tekniikassa, liitosten tiiveydessä tai rakenteiden kuivatuksessa) voi heikentää rakenteen ja rakennuksen toimintaa huomattavasti. Rakenteita suunniteltaessa tulee siis kiinnittää myös huomioita kokonaisuuteen, jotta rakennus palvelee sille tarkoitettua käyttötarkoitusta. Rakennuksen kokonaisuuden suunnittelulla varmistetaan rakennuksen kestävyys, viihtyvyys (esim. sisäilman laatu, lämpötila ja kosteus) ja turvallisuus.

## 11 Pohdinta

### 11.1 Tavoitteet ja toteutus

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia erilaisten CLT-ulkoseinärakenteiden kosteus- ja lämpötekniistä toimivuutta nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Tutkiminen perustui rakenteiden kastepiste- ja lämpötarkasteluihin sekä rakenteiden homeriskien analysointiin. CLT-rakenteiden toimivuutta vertailtiin perinteisen rankarunkoisen ulkoseinän(US5) toimivuuteen. Vertailujen tuloksena voidaan todeta, että CLT-rakenteinen ulkoseinä on kosteus- ja lämpötekniisiltä ominaisuuksiltaan vähintään yhtä toimiva ratkaisu kuin rankarunkoinen ulkoseinä.

Opinnäytetyön tutkimusmenetelmänä toimi kirjallisuuskatsaus sekä kosteus- ja lämpölaskennat DOF-lämpö-ohjelmalla. Lisäksi homeutumisriskin analysointiin käytettiin VTT:n ja TTY:n laatimaa ”Suomalaista homemallia”. Viitekehyksenä toimi aiemmat tutkimukset sekä muu aiheeseen liittyvä kirjallinen materiaali. Tutkimuksessa oli paljon kvalitatiivisen tutkimuksen piirteitä. Laskennallisesti toteutettu rakenteiden kosteus- ja lämpötekniinen tarkastelu on nopea tapa muodostaa oikeansuuntainen käsitys tarkasteltavan rakenteen teoreettiselle toiminnalle. Toimivuus tulisi kuitenkin varmistaa myös käytännössä.

### 11.2 Tulosten luotettavuus

Tutkimuksessa saatujen tulosten perusteella voidaan päätellä, että nykyisissä Suomen olosuhteissa tutkitut rakenteet toimivat tarkastelujen osalta. Tulevaisuuden olosuhteita ei voida pitää täysin luotettavina, sillä on mahdoton ennustaa millaisia olosuhteita on oikeasti luvassa.

DOF-lämpöohjelman tuloksia voidaan pitää suuntaa-antavina. Ohjelma tarkastelee kosteuden ja lämmön käyttäytymistä rakenteessa stationääri-tilassa. Ohjelmalla tehdyt tarkastelut ovat teoreettisia. Todellisuudessa kosteustekniseen toimivuuteen vaikuttaa paljon eri tekijöitä, joita ei huomioida ohjelmalle tehdyillä tarkasteluilla.

Tällaisia tekijöitä ovat esimerkiksi ympäristöstä, julkisivun väristä ja ilmansuunnista aiheutuvat tekijät. Lisäksi ohjelma ei huomioi tarkastelun ajanjakson aikana tapahtuvia lämpötilan ja kosteuden vaihteluita. Ohjelma antaa kuitenkin suuntaa-antavan tiedon rakenteen toimivuudesta. Tulosten kannalta luotettavana voidaan pitää rakenteen eri kerrosten vesihöyrynvastusten riittävyttä. CLT ei siis tarvitse erillistä höyrynsulkua. Rakenteiden toimivuutta tulevaisuudessa on siis mahdotonta ennustaa täysin luotettaviksi sääolosuhteiden ääripäiden vaihtelujen vuoksi, mutta tarkastelujen tuloksia voidaan pitää oikeansuuntaisina.

## Lähteet

A 782/2017. 2017. Ympäristöministeriön asetus rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta. Julkaistu 24.11.2017. Viitattu 11.2.2020. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170782>.

A1010/2017. 2017. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. Julkaisu 20.12.2017. Viitattu 26.2.2020. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171010>.

CLT. N.d. Celt Oy:n verkkosivut. Viitattu 3.2.2020. <https://celt.fi/clt/>.

Ilmastonmuutos. N.d. WWF:n verkkosivut. Viitattu 6.2.2020. <https://wwf.fi/uhat/ilmastonmuutos/>.

Karjalainen, M. 2020. Puurakentamisen asema ja mahdollisuudet Suomessa. Puuinfo Oy:n verkkosivut. Viitattu 4.3.2020. <https://www.puuinfo.fi/puutieto/puurakentamisen/puurakentamisen-asema-ja-mahdollisuudet-suomessa>.

Kosteuden siirtyminen. 2008. Sisäilmayhdistys ry:n verkkosivut. Viitattu 24.2.2020. <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kosteusvauriot/Kosteustekninen-toiminta/Kosteuden-siirtyminen>.

Kosteusteknisiä ominaisuuksia. N.d.b. Puuinfo Oy:n verkkosivut. Viitattu 20.1.2020. <https://www.puuinfo.fi/puutieto/puu-materiaalina/kosteusteknisi%C3%A4-ominaisuuksia>

Lappalainen. 2010. Rakennustieto Oy:n verkkosivut. Viitattu 15.2.2020. <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK120402.pdf>.

Lämpötekniisiä ominaisuuksia. N.d. Puuinfo Oy:n verkkosivut. Viitattu 20.1.2020. <https://www.puuinfo.fi/puutieto/puusta-rakentaminen/yleisimm%C3%A4t-rakenej%C3%A4rjestelm%C3%A4t>.

Metsien kestävä käyttö kannattaa. N.d. Metsä Group:n verkkosivut. Viitattu 5.3.2020. <https://www.metsagroup.com/fi/Campaigns/AlykasMetsa/urbancarbon/metsien-kestava-kaytto-kannattaa/Pages/default.aspx#>.

Monikerroslevy (CLT). N.d. Puuinfo Oy:n verkkosivut. Viitattu 23.1.2020. <https://www.puuinfo.fi/puutieto/insinööripuutuotteet/monikerroslevy>.

Puukerrostalon rakenteet N.d. Puuinfo Oy:n verkkosivut. Viitattu 4.2.2020. <https://www.puuinfo.fi/puutieto/puurakenteet/puukerrostalon-suunnittelu/puukerrostalon-rakenteet>.

Puurakentamisen kasvu perustuu ekologisuuteen, osaamiseen ja kilpailukykyyn. 2019. Nordtreat:n verkkosivut. Viitattu 29.1.2020. <https://www.nordtreat.com/fi/insights/puurakentamisen-kasvu-perustuu-ekologisuuteen-osaamiseen-ja-kilpailukykyyn-varmistamiseen>.

Rakennusfysiikan testivuodet tulevaisuuden ilmastossa. 2013. Ilmatieteen laitoksen verkkosivut. Viitattu. 14.3.2020. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/rakennusfysiikan-testivuodet-tulevaisuuden-ilmastossa>.

RIL 107-2012. 2013. 3. painos. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL R.Y.

RIL 250-2011. 2011. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL R.Y.

RIL 225-2004. 2005. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL R.Y.

Robbins, J. 2019. As mass timber takes off, how green is this new building material? Verkkojulkaisu. The Yale school of forestry & environmental studies. Viitattu 12.2.2020. <https://e360.yale.edu/features/as-mass-timber-takes-off-how-green-is-this-new-building-material>.

RT 05-10710, kosteus rakennuksissa. 1999. Helsinki: Rakennustieto Oy.

Siikanen, U. 2008. Puurakentaminen. Rakennustieto Oy:n verkkosivut. Viitattu 26.2.2020. <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK120401.pdf>.

Siikanen, U. 2016. Puurakentaminen. 2. uud. p. Helsinki: Rakennustieto Oy.

Sitowise. N.d. Sitowise Oy:n verkkosivut. Viitattu 20.2.2020. <https://www.sitowise.com/fi/sitowise/yritys>.

Stora Enso CLT. N.d. Artikkelit Puuinfon sivustolla. Viitattu 2.2.2020. <https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/CLT%20image%20brochure%20FI.pdf>.

Suomalainen homemalli. N.d. Tampereen yliopiston verkkosivut. Viitattu. 27.3.2020. <https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/suomalainen-homemalli/>.

Tiivistalo wiki, asiaa kosteudesta ja sen liikkumisesta. N.d. Tiivistalon verkkosivut. Viitattu 24.2.2020. [https://www.tiivistalo.fi/tiivistalo\\_wiki/](https://www.tiivistalo.fi/tiivistalo_wiki/).

Ympäristöministeriö. 2016. Ympäristöopas 2016. Helsinki: Rakennustieto Oy. Viitattu: 1.2.2020. [http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/75517/YO\\_2016\\_Kuntotutkimusopas.pdf](http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/75517/YO_2016_Kuntotutkimusopas.pdf).

