

Antti Kärkäs

CLT-PUUKERROSTALON HÖYRYNSULKUTOIMINTA VERTAILTUNA LVL-RATKAISUIHIN

Seinärakenteet

Opinnäytetyö

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

2021



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tekijä/Tekijät	Tutkintonimike	Aika
Antti Kärkäs	Insinööri (AMK)	Tammikuu 2021
Opinnäytetyön nimi		
CLT-puukerrostalojen höyrinsulkutoiminta vertailtuna LVL-ratkaisuihin Seinärakenteet		75 sivua 5 liitesivua
Toimeksiantaja		
Sitowise Oy		
Ohjaaja		
Jani Pitkänen, Valtteri Perälähti ja Jarkko Kautonen		
Tiivistelmä		
<p>Opinnäytetyössä selvitetään CLT-seinärakenteiden rakennusfysikaalista toimivuutta vertailtuna LVL-ratkaisuihin nyky- sekä tulevaisuuden ilmastossa. Työssä yhteensovitetään aiempia markkinoilla olleita rakennusmateriaaleja uusiin rakennusmateriaaleihin. Taustalla on puurakentamiseen kasvanut kysyntä rakennusalalla. Tiedonhankinta perustuu tuotevalmistajien haastatteluihin sekä kirjallisuuskatsaukseen.</p> <p>Tutkimuksessa käsiteltäviä rakennetyyppejä tutkittiin DOF-lämpö nimisellä ohjelmalla sekä WUFI-laskentaohjelmalla. Kaikille rakennetyypeille tehtiin homeindeksitarkastelu, jotta selviäisi, miten rakenne toimii eri ilmastoissa. Homeindeksi tarkastelulla on pyritty saamaan vastauksia siihen, onko rakenteessa mahdollisuutta ilmentyä mikrobikasvustoa pidemmällä aikajaksolla ideaalitapauksissa.</p> <p>Valituilla rakennetyypeillä on pyritty mahdollisimman erilaisiin rakenneratkaisuihin, jotta vertailua rakenteille pystytään tekemään. Valitut rakennetyypit ja tulokset on esitetty myöhemmin tässä opinnäytetyössä. Rakennetyyppejä tarkasteltiin vakio-olosuhteissa DOF-lämmöllä ja muuttuvissa olosuhteissa WUFI-laskentaohjelmalla. WUFI-laskentaohjelmasta saatu laskentadata vietiin homeindeksitarkasteluihin.</p> <p>Laskelmissa käytetyt arvot perustuvat Tampereen yliopiston laboratoriotutkimuksissa mitattuihin tuloksiin ja valmistajien ilmoittamiin tuloksiin. Laskentaa tehtiin ilmatieteenlaitoksen rakennusfysikaalisten testivuosiin mitattuun sekä ennustettuun sääaineistoon perustuen. Testivuosiin valitut paikkakunnat olivat Jokioinen ja Vantaa.</p> <p>Opinnäytetyön kautta Sitowise Oy saa tietoa tulevaisuuden kohteissa käytettävistä rakenneratkaisuihin ja niiden toimivuudesta pidemmällä aikajaksolla. Materiaalitietämyksen kasvassa pystytään huomioimaan rakenteen toimivuutta uusimmilla simulaatiomenetelmillä muuttuvissa olosuhteissa. Laskennallisen tarkastelun uskotaan yleistyvän, kun tietoa eri rakennusmateriaalien toimivuudesta erilaisissa ympäristön kuormituksissa saadaan lisää.</p>		
Asiasanat		
rakennusfysiikka, puurakentaminen, homeindeksi		

Author (authors)	Degree	Time
Antti Kärkäs	Bachelor of Engineering	January 2021
Thesis title Vapour shut-off operations of CLT wooden apartment buildings compared to LVL solutions Wall structures		75 pages 5 pages of appendices
Commissioned by Sitowise Oy		
Supervisor Jani Pitkänen, Valteri Perälähti and Jarkko Kautonen		
Abstract <p>The thesis examined the physical functionality of CLT wall structures compared to LVL solutions in the current and future climates. The work coordinated previous building materials on the market with new building materials. The background is the increased demand for wood construction in the construction industry. The information gathering is based on interviews with product manufacturers and a literature review.</p> <p>The types of structures to be studied in the study were examined by programmes called DOF heat and the WUFI calculation programme. A mould index review was carried out for all structural types to see how the structure works in different climates. The aim of the mould index review has been to obtain answers whether the structure has the possibility of manifesting microbial growth over a longer period in ideal cases.</p> <p>The selected structural types have aimed at the most different structural solutions possible in order to make comparisons with the structures. The selected structural types and results are presented later in this thesis. The construction types were examined under standard conditions with DOF heat and under changing conditions using the WUFI calculation programme. The calculation data from the WUFI calculation programme was taken to the mould index review.</p> <p>The values used in the calculations are based on the results measured in laboratory studies at the University of Tampere and the results reported by the manufacturers. The calculation was carried out on the basis of the statistically measured and predicted weather data of the meteorological institute gathered during the test years. The selected locations for the test years were Jokioinen and Vantaa.</p> <p>Through the thesis, Sitowise company will receive information on the structural solutions used in future sites and their functionality over a longer period.</p>		
Keywords building physics, wood construction, mould Index		

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	8
2	LÄMMÖN- SEKÄ KOSTEUDEN SIIRTYMISEN MUODOT	9
2.1	Lämmön johtuminen	9
2.2	Säteily.....	12
2.3	Diffuusio.....	14
2.4	Konvektio.....	17
2.5	Kosteus.....	19
2.6	Hygroskooppisuus	23
2.7	Kapillaarinen tasapainokosteus	26
3	RAKENNUSFYSIKAALISET LASKENTAOHJELMAT	28
3.1	Lämpö- ja kosteussimulointi WUFI-laskentaohjelmalla.....	30
3.2	Laskennan kulku.....	33
4	HOMEINDEKSIN LASKENTA	35
5	TUTKITTAVAT SEINÄRAKENTEET	38
5.1	Liiman vaikuttavuus CLT-levyssä	45
5.2	Tuotevalmistajien kyselyt.....	46
5.3	Syrjäliimauksen merkitys rakenteessa	50
6	RAKENTEIDEN TUTKIMINEN	51
6.1	Matalaenergia CLT-rakenne	52
6.2	CLT-rakenne.....	59
6.3	Höyrynsulullinen LVL-ratkaisu	63
6.4	Höyrynsuluton LVL-rakenne	66
7	TULOKSIEN YHTEENVETO	69
8	JATKOTUTKIMUKSEN TARVE.....	71
	LÄHTEET.....	73

LIITTEET

Liite 1. WUFI-laskennassa käytetyt materiaalien perusarvot

Liite 2. WUFI-laskennassa käytettyjen eri materiaalien lämmönjohtavuuksien muutoksia materiaalissa kasvaneen kosteuden suhteen

Liite 3. WUFI-laskennassa käytetyt eri rakennusmateriaalien kosteusdiffusiviteetit

Liite 4. WUFI-laskennassa käytetyt eri rakennusmateriaalien tasapainokosteuskäyrät

Liite 5. Tuotevalmistajille tehty kysely

Terminologia

diffuusio	vesihöyryn virtausta suuremmasta ilman vesihöyrypitoisuudesta matalampaan
CLT	levy, joka koostuu ristiin liimatuista lautakerroksista. Lyhenne tulee sanoista Cross-Laminated Timber.
LVL	levy, joka koostuu yhteenliimatuista 3mm viiluista. Lyhenne tulee sanoista Laminated Veneer Lumber
homogeeninen	rakennusmateriaalista puhuttaessa tarkoitetaan tasa-laatuista ainetta
konvektio	Ilmanvirtausta suuremmasta tiheydestä pienempään johtuen ilman tiheyseroista
suhteellinen kosteus	RH, prosentuaalinen määrä kyllästyskosteudesta, jonka ilma sisältää
homeindeksi	VTT:n ja TTY:n yhteistyössä kehittämä laskentamenetelmä homeenkehittymisen arviointia varten
hygroσκοoppisuus	Mitattava ominaisuus aineen kyvystä sitoa kosteutta ilmasta itseensä ja vapauttaa takaisin ilmaan, ilman suhteellisen kosteuden laskettua
kastepiste	Kohta, johon tiivistyy ilmasta kosteutta, kun ilman suhteellinen kosteus on 100%
stationääritila	Tarkoitetaan rakenteen tai ainekerroksen olemista ympäristössä, jossa on vakio-olosuhteet. Aine tai rakenne on jatkuvuustilassa, jolloin se johtaa vakiomäärän kosteutta ja vakiomäärän lämpöä.
epästationäärinen tila	Tarkoitetaan rakenteen tai ainekerroksen olemista ympäristössä, jossa on ajan suhteen muuttuvat olosuhteet. Aineen tai rakenteen kyky johtaa lämpöä ja läpäistä vesihöyryä muuttuu ajan sekä ympärillä vallitsevan olosuhteen mukaisesti.
DOF-lämpö	Rakennusfysikaalinen laskentaohjelma, joka huomioi rakenteen ja materiaalit stationääritilassa
WUFI	Rakennusfysikaalinen laskentaohjelma, joka huomioi rakenteen ja materiaalit epästationäärisessä tilassa. Lyhenne tulee sanoista Wärme- und Feuchtetransport instationär, joka tarkoittaa lämmön- ja kosteuden kulkeutumista

tuulensuojakerros	Rakennekerros, joka tuulettaa rakenteeseen muodostuneen kosteuden pois, mutta estää ulkoilmavirtausten pääsyn rakenteeseen
tasapainokosteus	Tasapainokosteus muodostuu materiaalille ja sen ympäröivälle ilmalle, kun sen huokosissa oleva ilma saavuttaa tasapainon ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden kanssa
kondensoituminen	Vesihöyryn tiivistymistä ilmasta kylmemmälle ja kovemmalle pinnalle, kun ilman suhteellinen kosteus on 100%
ilmansulkukerros	Rakennekerros, joka estää konvektiolla kuljettuvan ilmavirtausten sekoittumista rakenteessa
höyrynsulkukerros	Rakennekerros, joka estää konvektiolla ja diffuusiolla etenevän kosteuden kulkeutumisen rakenteessa lämpimästä kylmempään
kyllästyskosteus	Tietty lämpötila voi sisältää maksimissaan tietyn määrän vesihöyryä.
kapillaarinen tasapainokosteus	Kapillaarinen tasapainokosteus saavutetaan, kun materiaali on kosketuksissa vapaaseen vedinpintaan. Se on tasapainokosteuden alue, jossa vesi liikkuu materiaalissa nesteinä sekä höyrynä
rakennetyyppi	kuvaus rakenteesta ja sen sisältämistä ainekerroksista sekä ainekerrosten dimensioista

1 JOHDANTO

Rakentamisen hiilijalanjäljen ohjaus vähäpäästöisempiin menetelmiin on käynnissä. Uusia innovatiivisia puupohjaisia rakennustuotteita kehitetään markkinoille koko ajan lisää. Uudisrakentamisen sektorilla kysyntä on kasvanut puurakentamisen suuntaan. Rakennusmateriaalien soveltuvuutta Suomen olosuhteisiin on alettu tutkimaan erilaisilla rakennusfysiikan laskentaohjelmilla.

Laskentatarkastelujen määrä on kasvanut, koska rakenteita voidaan optimoida esimerkiksi energiakulutuksen, U-arvon, menekin, paksuuden tai kuivumisajan suhteen. Sisäilmalle ja rakenteille tiukentuvat kriteerit edellyttävät tarkempaa tarkastelua. Laskentaohjelmilla pystytään arvioimaan nopeasti rakenteen toiminta, kun laskentaohjelmien toiminta perustuu kenttäkokeisiin ja materiaali-kohtaisiin tutkimuksiin. (Heljo & Vinha 2014, 54.)

Edellytyksinä kattavalle rakennusfysikaaliselle tarkastelulle ovat materiaalitietämys rakennusfysikaalisista ominaisuuksista ja sekä tietokoneiden kasvanut laskentakapasiteetin kehitys (Vinha 2011, 25). Laskentatarkasteluilla on ennakoitavissa ilmastonmuutoksen vaikutus rakenteiden kosteustekniseen toimivuuteen (Heljo & Vinha 2014, 54).

Opinnäytetyön on toimeksi antanut Sitowise Oy. Yritys tarjoaa konsultointipalveluja rakennuttamisessa, uudis-, korjaus- ja sekä infrastruktuurin suunnittelussa. Sitowise on perustettu vuonna 2018, kun Wise Group Oy sekä Sito Oy fuusioituivat. Sitowise työllistää lähes 1800 asiantuntijaa 21 paikkakunnalla Suomessa. Sitowisellä on tytäryhtiöt Ruotsissa, Latviassa ja Virossa.

2 LÄMMÖN– SEKÄ KOSTEUDEN SIIRTYMISEN MUODOT

2.1 Lämmön johtuminen

Lämmön johtuminen eli konduktio on lämpötilaeroista johtuvaa virtaamista kiinteissä aineissa tai nesteissä korkeammasta lämpötilasta matalampaan lämpötilaan. Lämmönjohtumista pyritään ehkäisemään lämmöneristämällä. Rakennustekniikassa rakenteen lämmönläpäisyyttä käytetään termiä *U-arvo*. U-arvo kuvaa 1m²:n alueen lämmönläpäisyyttä lämpötilaeron ollessa 1 °C. (Vinha 2011, 98.)

Homogeenisen materiaalin lämmönvastuksen voidaan laskea yhtälöstä 1.

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

jossa	R	lämmönvastus	[m ² K/W]
	d	materiaalin paksuus	[m]
	λ	lämmönjohtavuus	[W/mK]

Lämpövastus kuvaa homogeenisen rakennusaineen kykyä vastustaa sen läpi kulkevaa lämpövirtaa, kun lämpötilaero on 1 °C. Ohuille materiaaleille, kuten höyrynsulkumuovi, on määritelty suoraan lämmönvastusarvo materiaalin ohuuden vuoksi. (Vinha 2011, 110.)

Rakenteiden eri ainekerrosten lämmönvastukset summataan yhdeksi kokonaislämmönvastukseksi, jota tarvitaan U-arvon laskennassa. U-arvo, joka on kokonaislämmönvastuksen käänteisluku, lasketaan seinärakenteelle kaavalla 2.

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (2)$$

jossa	U	rakenteen korjaamaton U-arvo	[W/mK]
	R _T	rakennusosan kokonaislämmönvastus	[m ² K/W]

Rakenteen lämpövirran tiheys rakennekerrosten välillä voidaan laskea yhtälöllä 3.

$$q = \frac{T_1 - T_2}{R} \quad (3)$$

jossa	q	lämpövirran tiheys	[m ² /W]
	T_1	rakenteen sisälämpötila	[K]
	T_2	rakenteen ulkolämpötila	[K]
	R	aineen lämmönvastus	[m ² K/W]

Lämpövirran tiheys on lämpöenergiaa, jota virtaa rakenteen lävitse johtumalla, eli käytännössä se on lämpöhukkaa. Lämpövirran tiheyteen voidaan vaikuttaa rakennekerrosten lämmönjohtavuus arvoilla sekä niiden käytettävillä paksuuksilla.

Vinhan (2011, 110) mukaan laskennassa käytettävien pintavastusten arvot vaihtelevat riippuen pinnan suunnasta, ilmapirtauksista pinnan lähellä sekä lämpösäteilyn tulo- ja poistumissuunnasta. Pintavastuksella tarkoitetaan sisä- tai ulkoseinän pinnalla tapahtuvaa lämmönsiirtymisen vastusta.

Sisä- ja ulkopinnan pintavastuksia voidaan laskea, mutta usein käytetään lämmönsiirtymisen laskennassa kertoimina karkeita arvoja (ks. taulukko 1). Pintavastukset huomioidaan rakenteen kokonaislämmönvastuksessa (SFS-EN 6946: 2017, 20).

Taulukko 1. U-arvo laskennassa käytettävistä pintavastuksista (SFS-EN 6946: 2017, 20)

R_{si} vaakasuunnassa	0,13
R_{si} ylöspäin	0,10
R_{si} alaspäin	0,17
R_{se} ulkopinnassa	0,04

jossa	R_{si}	sisäpinnan lämpövastus
	R_{se}	ulkopinnan lämpövastus

Lämmönläpäisykertoimen laskennassa on huomioitava lämpöhäviöt korjaustermillä kylmäsiltojen, mekaanisten kiinnikkeiden sekä käännettyjen kattojen kautta. Mikäli korjaustermi on vähemmän kuin 3 % rakenteen U-arvosta, ei korjaustermiä tarvitse huomioida U-arvon laskennassa (Siikanen 2014, 52 & 53). Rakenteen lämmönläpäisykertoimeen lasketaan korjaustermi seuraavasti (kaava 4). Se ottaa huomioon lämmöneristävyyttä heikentäviä tekijöitä (SFS-EN 6946: 2017, 42–44).

$$\Delta U = \Delta U_f + \Delta U_g + \Delta U_r + \Delta U_\psi \quad (4)$$

jossa	ΔU	lämmönläpäisykertoimen korjaustermi	[W/m ² K]
	ΔU_f	mekaanisista kiinnikkeistä korjaustekijä	[W/m ² K]
	ΔU_g	ilmarakojen korjaustekijä	[W/m ² K]
	ΔU_r	käännettyjen kattojen korjaustekijä	[W/m ² K]
	ΔU_ψ	viivamaisten kylmäsiltojen korjaustekijä	[W/m ² K]

Rakenteen lopullinen lämmönläpäisykerroin lasketaan kaavalla 5.

$$U_c = U + \Delta U \quad (5)$$

jossa	U_c	lopullinen U-arvo
	U	korjaamaton lämmönläpäisykerroin
	ΔU	lämmönläpäisykertoimen korjaustermi

Seuraavat U-arvo vaatimukset ovat voimassa asuinrakennusten ulkoseinille (ks. taulukko 2). Rakennuksen lämmittämiseen käytetty energianmäärä yhdessä U-arvon kanssa määrittää, onko kyseessä matalaenerginen rakenne vai passiivirakenne. Arvot matalaenergisille rakenteille ovat ohjeellisia ja suuntaa antavia.

Taulukko 2. Suomen lämmöneristävyys määräyksistä sekä ohjeellisista arvoista (Suomen RakMk 2010 & Energiatehokaskoti s.a).

Lämmin, erityisen lämmin tai jäädytettävä kylmä tila	0,17 W/m ² K
Hirsiseinä, jonka keskimääräinen paksuus on vähintään 180 mm	0,40 W/m ² K
Matalaenergiatalo	0,12 W/m ² K
Passiivitalo	0,08-0,10 W/m ² K

Seinärakenteiden lämpötiloja voidaan määrittää missä tahansa pisteessä seuraavasti (Björkholtz 1997, 66) kaavan 6 mukaan:

$$t_x = t_s - \frac{\sum m_x}{\sum m} \cdot (t_s - t_u) \quad (6)$$

jossa	t_x	lämpötila kohdassa x	[°C]
	t_s	sisäilman lämpötila	[°C]
	$\sum m_x$	lämmönvastusten summa kohtaan x	[m ² °C/W]
	$\sum m$	koko rakenteen lämmönvastus	[m ² °C/W]
	t_u	Ulkoilman lämpötila	[°C]

Seinärakenteiden lämpötilojen määrittäminen missä tahansa pisteessä on oleellista lämpötilan kehittymisen kannalta sekä ilman suhteellisen kosteuden kannalta. Kuten kaavasta 19 on huomattavissa, ilman suhteellinen kosteus on riippuvainen lämpötilasta.

2.2 Säteily

Säteily on energian siirtymistä sähkömagneettisina aaltoina valon nopeudella. Kappaleet, joiden lämpötila on absoluuttisen nollapisteen yläpuolella, säteilee eli ne emittoivat säteilyä ympäristöönsä (Vinha 2011, 315.) Lämpösäteily ei erik-

seen tarvitse välittäjäainetta kuljettamaan energiaa, kuten konvektiossa ja johtumisessa vaan osuessaan se imeytyy tai heijastuu takaisin ympäristöönsä (Siikanen 2014, 40). Pinnan säteilytehon suhdetta mustan pinnan säteilytehoon kutsutaan emissiviteetiksi, joka voidaan laskea kaavalla 7.

$$\varepsilon = \frac{Q_s}{Q_m} \quad (7)$$

jossa	ε	emissiviteetti	[W/m ²]
	Q_s	pinnan säteilyteho	[-]
	Q_m	mustan pinnan säteilyteho	[-]

Lyhytaaltoinen lämpösäteily on rakennustekniikassa auringonsäteilyä ja pitkäaaltoinen on peräisin toisista kappaleista. Esimerkiksi ikkunarakenteita tarkasteltaessa aurinko säteilee lyhytaaltoista lämpösäteilyä ulkopuolelta sisälle. Vastaavasti lämpösäteily rakenteesta ulospäin on pidempi aaltoisempaa eli tässä tapauksessa heikompaa. Lämpösäteily kulkeutuu suoraan ikkunalasin lävitse rakennuksen sisälle. (Siikanen 2014, 40 & 41.)

Lämpösäteilyn energia siirtyy myös konvektiolla ja johtumalla lämpösäteilyn osuessa ikkunarakenteisiin. Tällöin on mahdollista, että välittäjäaine voi hidastaa säteilyn etenemistä kappaleiden välillä. Kun säteilyä osuu materiaalin pintaan, se imeytyy lämpönä rakenteeseen (absorboituu) tai heijastuu takaisin ympäristöönsä (desorptoituu). Säteilyn merkitys on suurinta osuessaan tummaan pintaan ja etenemällä rakenteeseen johtumalla. (Siikanen 2014, 40 & 41.)

Auringon säteily on rakenteiden kannalta ilmaista lämpöhyötyä. Lämpösäteily pienentää lämmitykseen käytettävän energian tarvetta, mutta vastaavasti saattavat lisätä jäähdytystarvetta kesäisin. Auringon säteily tehostaa uloimpien rakennekerrosten kuivaamista nostamalla rakennekerrosten lämpötiloja ja alentamalla niiden ympärillä vallitsevaa ilman suhteellisen kosteuden määrää. (Hens 2016, 12.)

2.3 Diffuusio

Diffuusio on ilman vesihöyrypitoisuuksien tasaantumista rakenteiden läpi sisä- ja ulkoilman välillä. Diffuusiossa kaasun virtaus tapahtuu aina korkeammasta pitoisuudesta matalampaan pitoisuuteen. Asumisesta syntyvä kosteus rakennuksen sisäilmassa pyrkii tasoittumaan ulkoilman kosteuden kanssa diffuusion avulla. Diffuusiossa vesihöyry kulkeutuu ilman sitoman kosteuden avulla. Vesihöyryn kuljettuminen diffuusion muodossa lausutaan kosteuseroina Δv (kg/m³) tai osapaine-eroina Δp (Pa). (Björkholtz 1997, 55.) Mikäli rakennuksen sisäilmaa paineistetaan koneellisesti ylipaineeseen, voi konvektiolla siirtyä paljon suurempia määriä kosteutta kuin diffuusion avulla. Ilma tietyssä lämpötilassa voi sisältää tietyn määrän vesihöyryä maksimissaan, ja tätä kutsutaan kyllästyskosteudeksi. (Björkholtz 1997, 44.)

Kastepisteessä kosteusmääriä tarkasteltavassa lämpötilassa voidaan laskea likimääräiskaavalla, jossa ei ole lämpötilarajoituksia (Björkholtz 1987, 45). Tähän käy kaava 8.

$$v_k = 101,325 \cdot 10^3 \cdot e^{(70,4347 - \frac{7362,7}{T} + 6,95208 \times 10^{-3} \cdot T - 9 \cdot \ln T)} \quad (8)$$

jossa	v_k	vesihöyryn tiheys	[g/m ³]
	T	tarkasteltava lämpötila	[°C]

Kyllästyskosteudella on suora yhteys kastepisteeseen. Kastepiste voi muodostua mihin tahansa seinärakenteen sisään, kun ilman suhteellinen kosteus on tarkasteltavassa lämpötilassa 100%. Kastepiste aiheuttaa veden kondensoitumisen rakenteeseen. Kondensoituminen tapahtuu yleensä kylmälle ja kiinteämmälle pinnalle.

Kerroksellisissa seinärakenteissa tulee olla tästä syystä tiivis höyrynsulku tai ilmansulku. Käytännössä höyrynsulku estää ilman kosteuspitoisuuksien tasaantumiset diffuusion sekä ilmavirtaukset konvektion avulla toimien katkona sisä- sekä ulkoilmastolle. Ilmansulkukerros estää konvektion aiheuttamat virtaukset, mutta läpäisee diffuusiolla kuljettuvaa vesihöyryä rakenteessa. (Vinha 2007, 400.)

Lämpö- ja kosteustekninen tarkastelu tulisi ottaa huomioon stationääritapauksissa talven ja syksyn olosuhteissa. Tällöin ilman vesihöyrypitoisuuksien erot ovat suurimmillaan ulkoilman sekä sisäilman välillä. (Vinha 2007, 400.)

Rakennekerroksen vesihöyrynvastusta pystytään laskemaan kaavalla 9.

$$Z_p = \frac{d}{\delta_p} \quad (9)$$

jossa	Z_p	vesihöyryn vastus	[kg/m ² sPa]
	d	homogeenisen aineen paksuus	[m]
	δ_p	vesihöyryn läpäisevyys	[kg/msPa]

Vesihöyrynvastus on arvo, joka kuvaa homogeenisen aineen kykyä vastustaa höyrymäisen veden siirtymistä ainekerroksen lävitse diffuusiolla (Vinha 2011, 47). Vesihöyrynläpäisevyys on vesihöyrynvastuksen käänteisluku.

Tuotevalmistajat usein ilmoittavat materiaalien lämpö- sekä kosteustekniset ominaisuudet stationääritilassa. Diffuusiovastuskerroin on ilman sekä materiaalin vesihöyrynläpäisevyydestä riippuvainen kerroin, joka ei ole suhteessa materiaalin paksuuteen. Ohuemmilla materiaaleilla, kuten höyrynsulkumuovi, käytetään tätä ilmaisua.

Diffuusiovastus on eräs tapa ilmaista rakennusmateriaalin vesihöyrynvastus, joka on suhteessa ainekerrokseen paksuuteen. Diffuusiovastus-käsitettä käytetään usein pintakäsittelymateriaalien, kuten maalien, vesihöyrynvastuksen ilmaisuna.

Materiaalin diffuusiovastuskerrointa voidaan laskea kaavalla 10.

$$\mu = \frac{\delta_{p,ilma}}{\delta_p} \quad (10)$$

jossa	μ	diffuusiovastuskerroin	[-]
	$\delta_{p,ilma}$	ilman vesihöyryn- läpäisevyys	[kg/msPa]
	δ_p	materiaalin vesihöyrynläpäisevyys	[kg/msPa]

Diffuusiovastusta materiaalin paksuuden suhteen määritetään kaavalla 11.

$$S_d = \mu \cdot d \quad (11)$$

jossa	S_d	diffuusiovastus	[-]
	μ	diffuusiovastuskerroin	[-]
	d	homogeenisen aineen paksuus	[m]

Homogeenisille materiaaleille kosteuden kulkeutumista diffuusiolla rakennekerrosten välillä 1-dimensionaalisessa tarkastelussa määritetään kaavalla 12 (Petersson 2018, 320).

$$g = \delta \cdot \frac{v_1 - v_2}{d} \quad (12)$$

jossa	g	kosteusvirran tiheys	[kg/m ² s]
	δ	materiaalin vesihöyrynläpäisevyys	[kg/msPa]
	$v_1 - v_2$	vesihöyrynpitoisuuksien ero molemmin puolin kerrosta	[kg/m ³]
	d	kerroksen paksuus	[m]

2.4 Konvektio

Konvektiolla tarkoitetaan lämmön sekä kosteuden siirtymistä kaasun tai nesteen virtaamisen mukana. Rakennustekniikassa konvektio on joko pakotettua tai luonnollista. Konvektiolla voi siirtyä suuria lämpö- sekä kosteusmääriä rakenteiden epäkohdista tai sen lävitse (Björkholtz 1987, 13.)

Pakotetulla konvektiolla tarkoitetaan ulkoisen voiman vaikutuksesta aiheutunutta ilmavirtausta rakenteen läpi. Epätiivis rakenne tai ylipaineinen ilmanvaihto toimii edellytyksenä pakotetulle konvektiolle (Björkholtz 1987, 13.)

Luonnollisella konvektiolla tarkoitetaan ilmantiheyseroista johtuvaa pystysuoraa ilmavirtausta rakenteen sisällä. Luonnollista konvektiota rakennustekniikassa esiintyy harvemmin rakenteiden tiiveyden vuoksi, useimmiten on kyse luonnollisen sekä pakotetun konvektion yhdistelmästä. Ilman tiheyserot pyrkivät tasaantumaan rakenteen sisällä ja ilma alkaa rakenteen sisällä kiertämään. (Björkholtz 1987, 13.) Kuvassa 1 on kuvattu konvektiotapauksia seinärakenteissa.



Kuva 1. Konvektiotapaukset seinärakenteissa (Vinha 2011, 69)

Konvektiovirran β - kertoimelle voidaan käyttää likimääräisarvoja paremman tiedon puutteessa tarkasteltaessa seinärakenteiden kosteudensiirtymisiä konvektion avulla. Luonnollisen konvektion tarkastelulle käytetään sisäpinnoilla likimääräisarvoa ($\beta = 0,003 \text{ m/s}$) ja pakotetulle konvektiolle ulkopinnoilla likimääräisarvoa ($\beta = 0,017 \text{ m/s}$). (Petersson 2018, 328.)

Seinärakenteen sisälle konvektion avulla virtaavaa kosteutta voidaan määrittää seuraavasti kaavalla 13 (Petersson 2018, 328).

$$g = \beta \cdot [v_s - v_{sp}] \quad (13)$$

jossa	g	konvektiovirta	[kg/m ² s]
	β	konvektiovirran nopeus	[m/s]
	v_s	vesihöyryn määrä ympäröivässä ilmassa sisäilmassa	[kg/m ³]
	v_{sp}	vesihöyryn määrä materiaalinpinnassa	[kg/m ³]

Vesihöyryn osapaine on suorassa suhteessa rakennusmateriaalien vesihöyryvastukseen. Vesihöyryn osapaineen laskeminen edellyttää, että tarkasteltavan pisteen lämpötila ja suhteellinen kosteus ovat jo tiedossa. Vesihöyryn painetta voidaan laskea seuraavasti kaavalla 14. (Björkholtz 1987, 44).

$$P = v \cdot 10^{-3} \cdot 461,4 \cdot (273 + T) \quad (14)$$

jossa	P	vesihöyryn paine	[Pa]
	v	ilmankosteus	[g/m ³]
	T	lämpötila	[°C]

Vesihöyryn painejakauman määrittäminen rakenteen osissa on merkityksellistä, kun tutkitaan luonnollisen konvektion aiheuttamaa ilmavirtausta rakenteen sisällä. Ilmanpaine on suhteessa lämpötilaan ja ilman suhteelliseen kosteuteen.

Vesihöyryn osapainetta voidaan laskea rakenteen missä tahansa kohdassa kaavalla 15 (Björkholtz 1987, 68).

$$p_x = p_s - \frac{\sum z_x}{\sum z} \cdot (p_s - p_u) \quad (15)$$

jossa	p_x	vesihöyryn osapaine kohdassa x	[Pa]
	p_s	vesihöyryn osapaine sisäilmassa	[Pa]
	$\sum z_x$	vesihöyrynvastusten summa sisäpinnasta alkaen kohdassa x	[m ² sPa/kg]
	$\sum z$	koko rakenteen vesi- höyrynvastus	[m ² sPa/kg]
	p_u	vesihöyryn osapaine ulkoilmassa	[Pa]

2.5 Kosteus

Kun rakennustekniikassa puhutaan kosteudesta, tarkoitetaan vettä rakennusaineen huokosilmassa tai ilmassa aineen ympärillä tilavuuteen nähden. Kosteuden määrää voi ilmaista monella eri tavalla, täysin vakiintunutta tapaa ei ole. Kosteuden ilmaisuun käytetään seuraavia taulukossa 3 näkyviä tapoja (Björkholtz 1987, 53).

Taulukko 3. Kosteuden ilmaisutapoja rakennusaineissa (Pentti & Hyypöläinen 1999, 31).

kg vettä / m ³ ainetta	kg/m ³
kg vettä / kg ainetta kuivana	paino-%
kg vettä / kg ainetta vesineen	paino-%
l vettä / l ainetta	tilavuus-%
Aineen huokosilmassa suhteellisena kosteutena	Huomioiden rakennusaineet vain hygroskooppisella alueella

Tavoista yleisimmät ovat taulukon ensimmäisellä ja viimeisellä rivillä. Rakenteiden hygroskooppista käyttäytymistä on helpompi ymmärtää, kun yksiköt ovat samat kuin suhteellisella kosteudella tai se on verrattavissa aineen sorptioikäyrään.

Toisaalta ei ole syytä tarkastella vain lukemia kosteuksista, sillä asiaan vaikuttaa ympärillä vallitseva lämpötila, rakennusmateriaalin kosteuspitoisuus ja ilman suhteellinen kosteus. Perussääntönä voidaan pitää sitä, että rakenteen vesihöyrynläpäisevyyden tulisi kasvaa höyrynsulkukerroksesta ulospäin, jotta kosteuden kulku rakenteesta ulospäin onnistuisi esteittä.

Vinha ym. (2005, 44) ilmoittavat kaavan materiaalien kosteuspitoisuuksien materiaalien kosteuspitoisuuksien laskemiselle seuraavasti:

$$w = \frac{m_{\varphi} - m_d}{V_d} = \frac{m_w}{V_d} \quad (17)$$

$$u = \frac{m_{\varphi} - m_d}{m_d} = \frac{m_w}{m_d} \quad (18)$$

jossa	w	kosteuspitoisuus	[kg/m ³]
	u	kosteuspitoisuus	[kg/kg]
	m_{φ}	kappaleen massa vastaavassa tasapainokosteudessa	[kg/kg]
	m_d	kappaleen kuivamassa	[kg]
	m_w	kappaleeseen sitoutuneen kosteuden massa	[kg]
	V_d	kappaleen kuivatilavuus	[m ³]

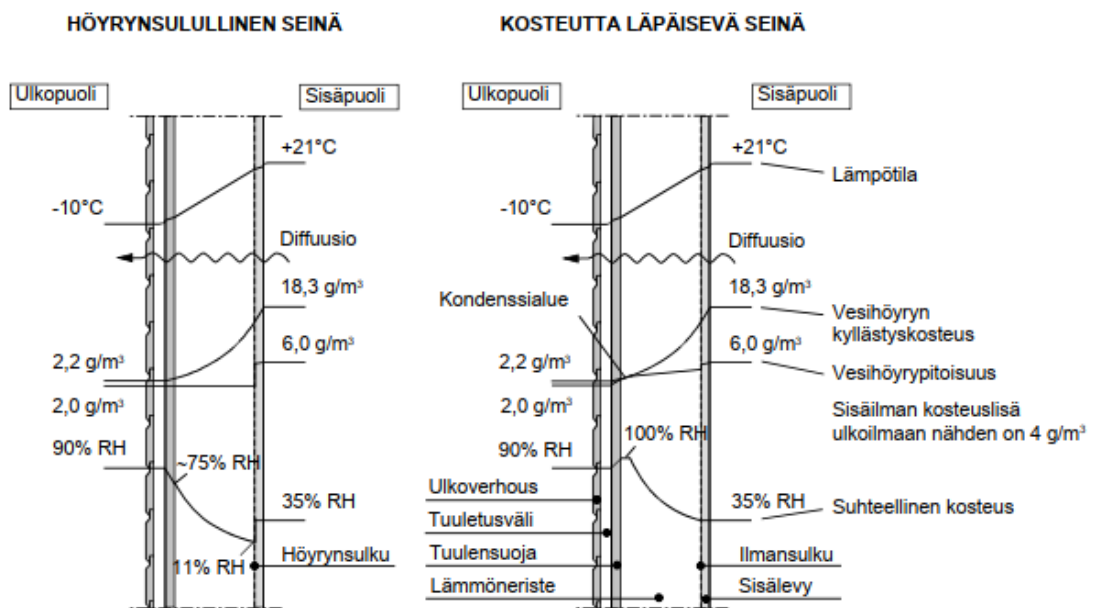
Sisäilman kosteuspitoisuuteen vaikuttavat ulkoilman kosteuspitoisuus, rakennuksen sisällä kehitetyn kosteuden määrä, käyttötarkoitus, rakennusaineiden kyky sitoa kosteutta sekä ilmanvaihto. Kosteutta rakennuksen sisällä syntyy esimerkiksi ihmisistä haihtumalla ja kodinkoneista. (Björkholtz 1997, 48.)

Björkholtzin (1997, 48) mukaan sisällä syntynyttä hetkellistä kosteutta pystytään arvioimaan seuraavasti kaavalla 19:

$$v_s = v_u + \frac{G}{n \times V} \cdot (1 - e^{-n \cdot t}) \quad (19)$$

jossa	v_s	sisäilman vesihöyrypitoisuus	[kg/m ³]
	v_u	ulkoilman vesihöyrypitoisuus	[kg/m ³]
	G	Kosteuden tuotto sisällä	[kg/h]
	n	ilman vaihtuvuus ajallisesti	[1/h]
	V	tuuletetun huoneen tilavuus	[m ³]
	t	aika	[h]

Suomessa ulkoilman vesihöyrypitoisuudet vaihtelevat laajalti johtuen eri vuodenaikojen suurista lämpötilavaihteluista. Lämpimällä ilmalla on moninkertainen kapasiteetti sitoa kosteutta kylmään ilmaan nähden. Vuorokauden tai viikon aikana lämpötila sekä kosteusvaihtelu voi olla suurempaa, mutta sen ei katsota vaikuttavan rakenteen kosteustekniseen toimintaan lyhytaikaisuutensa vuoksi. (Björkholtz 1987, 49.) Kuvassa 2 on esitetty kosteuden kulkeutumista diffuusion avulla erilaisissa seinärakenteissa, kun sisä- sekä ulkopuolella vallitsee vakio-olosuhteet.



Kuva 2. Kosteustekninen tarkastelu stationääritapauksissa talvella (Vinha 2007, 51)

2.6 Hygroσκοoppisuus

Hygroσκοoppisuudella kuvataan aineen kykyä sitoa ilmasta huokoisiinsa kosteutta sekä luovuttaa sitä takaisin ympäristöönsä kosteuden tasaamiseksi. Hygroσκοoppinen tasapainokosteus saavutetaan, kun aineen huokosissa oleva ilman suhteellinen kosteus tasaantuu samaan arvoon rakennusaineen ympärillä olevan ilman suhteellisen kosteuden kanssa. (Vinha ym. 2005, 11.)

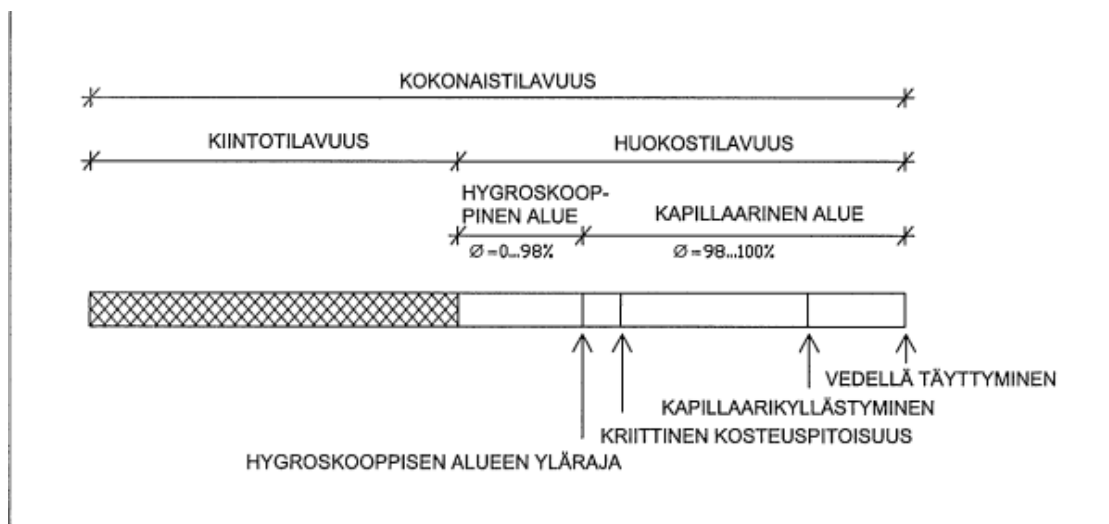
Rakennusmateriaalilla ja sen ympäröivällä ilmalla vallitsee aina tietty olosuhde. Olosuhteet, kuten ilman suhteellinen kosteus, lämpötilaerot, ilmanpaine-erot pyrkivät aina tasapainoon materiaalin ja ympäröivän ilman kanssa. Materiaalin ympärillä vallitseva ilman suhteellinen kosteus pyrkii aina tasoittumaan materiaalin tasapainokosteuden suhteen. Mikäli ilman suhteellinen kosteus on suurempi kuin materiaalin tasapainokosteus, on sillä materiaaliin kostuttava vaikutus. Vastaavasti pienemmällä ilman suhteellisella kosteudella on materiaaliin kuivaava vaikutus. (Pentti & Hyypöläinen 1999, 27.)

Rakennusmateriaalin kykyyn imeä kosteutta ja imunopeuteen olosuhteiden lisäksi vaikuttavat huokosten muoto, koko, määrä, sekä huokosten jatkuvuus materiaalissa. Rakennusmateriaaliin kapillaarisesti adsorptoitunut vesi on fyysikaalisesti sitoutunutta. Kemiallisesti sitoutunut vesi on sitoutunut rakenteeseen joko ioni- tai molekyyli sidoksina ja toimii osana aineen rakennetta, kuten betonirakenteissa. (Pentti & Hyypöläinen 1999, 27.)

Eri rakennusmateriaalien hygroσκοoppisuutta kuvataan sorptioilla eli tasapainokosteuskäyrillä. Puumateriaaleilla hygroσκοoppisuus on suurinta ja mineraalivilloilla vähintä. Hygroσκοoppisuus ilmoitetaan tasapainokosteuskäyrän avulla, jonka muuttujana huokoisten sisältämä kosteus. Tasapainokosteuskäyrät ovat usein logaritmisia. Aineen ollessa hygroσκοoppisella alueella kosteus siirtyy materiaalista vesihöyryn muodossa. (Björkholtz 1987, 52–61.)

Absorptioksi kutsutaan sitä, kun aine sitoo ilmasta kosteutta huokoisiinsa. Vastaavasti, kun aine luovuttaa kosteutta takaisin ilmaan, kutsutaan tätä ilmiötä desorptioksi. Kosteuden liikettä materiaalin huokoisissa esimerkiksi diffuusion

vaikutuksesta kutsutaan sorptioksi. Kosteutta aineen huokoisissa ilmaistaan tasapainokosteuden avulla prosentteina suhteessa aineen vedellä kyllästettyyn tilavuuspainoon tai tiheyden yksikkönä (Vinha ym. 2005, 44 & 45). Materiaalin kyky tasoittua ympärillä vallitsevan kosteuden kanssa riippuu aineen vesihöyrynläpäisykyvystä. Jos materiaali läpäisee hyvin vesihöyryä, on sillä kyky tasata ilman suhteellista kosteutta paremmin kuin huonommin läpäisevämmällä materiaalilla. Kosteuden tasoittuminen ajan suhteen riippuu tällöin aineen pak-suudesta. Rakennusmateriaalin ja vallitsevan ilman välillä on aina jokin edellä mainituista olosuhteista: aine sitoo kosteutta itseensä (adsorptio), luovuttaa kosteutta takaisin ilmaan (desorptio) tai vallitsee tasapaino. (Pentti & Hyypöläinen 1999, 28.) Kuvassa 3 aineen hygroskooppista toimintaa kuvaillaan seuraavasti.



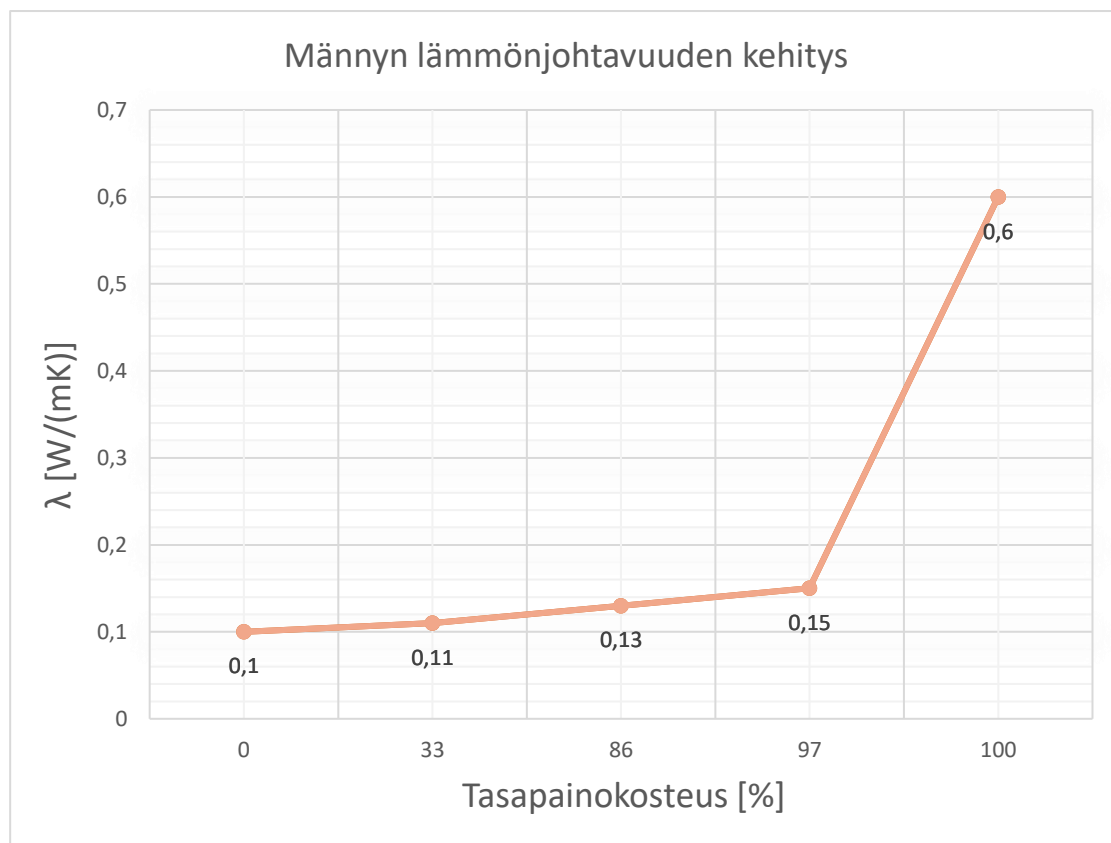
Kuva 3. Aineen hygroskooppisuus (Björkholtz 1987, 54.)

Hygroskooppisuudelle voidaan pitää yläarvona 97–98 prosenttista tasapainokosteutta, jolloin kosteus siirtyy materiaalissa myös kapillaarisesti (Vinha ym. 2005, 44).

Absorptio ja desorptio muodostavat käsitteen kosteuskapasiteetti. Etenkin puurakenteilla on rakennusmateriaaleista suurin kyky tasata rakenteessa kosteutta ilman suhteellisen kosteuden suhteen. Kosteus rakennekerroksissa usein mielletään negatiiviseksi, mutta kosteusteknisen toiminnan kannalta, etenkin puuperäisillä tuotteilla sillä on rakenteen toimivuuteen suuri merkitys tasaamalla

kosteusvaihteluja rakenteessa (Siikanen 2014, 77–79). Tärkeintä on materiaalituntemus perusarvojen ja hygrotermisten funktioiden suhteen. Hygrotermisistä funktioista lisää seuraavassa luvussa.

Materiaalin lämmönjohtavuuskyky kasvaa tasapainokosteuden kasvaessa. Materiaalin huokosiin varastoitunut vesi alkaa johtamaan lämpöä. Samoin kasvaa myös materiaalin vesihöyrynläpäisevyysluku. Kriittisimmät muutokset materiaali-parametreilla tapahtuu tasapainokosteuden ollessa enemmän kuin 97–98 %. Sorptiokäyristä on huomattavissa, että materiaalin kuivaminen on paljon hitaampaa kuin materiaalin kastuminen (Pentti & Hyypöläinen 1999, 30). Kuvassa 4 on kuvattu männyn lämmönjohtavuuden muutosta materiaalissa vallitsevan kosteuden suhteen.

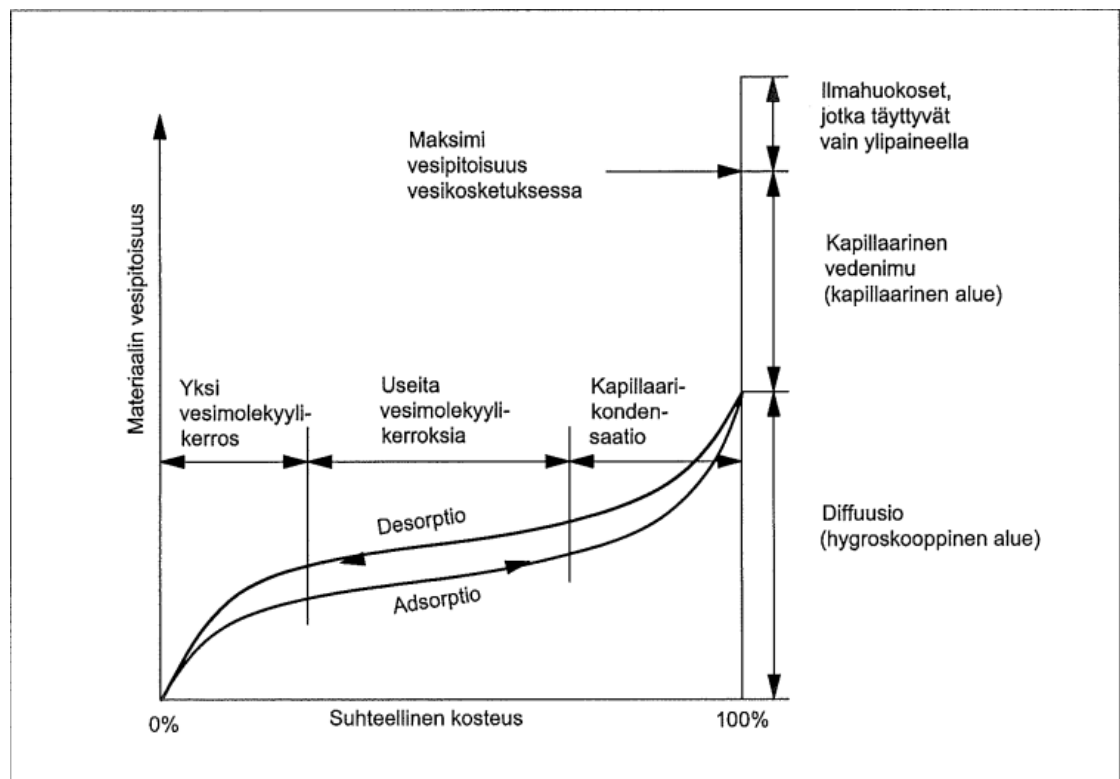


Kuva 4. Männyn lämmönjohtavuuden kehitys tasapainokosteuden kasvaessa (Kärkäs 2020)

2.7 Kapillaarinen tasapainokosteus

Kapillaarisella tasapainokosteudella tarkoitetaan kosteutta, joka sitoutuu aineen huokosiin aineen ollessa kosketuksissa vapaaseen vedenpintaan. Kapillaarinen tasapainokosteuskäyrä on samanlainen kuin kapillaarikondensaatio (Saarimaa ym. 1989, 31). Käytännössä rakennusaineen tasapainokosteuden on vaikeata ylittää arvoa 98 % ilman kosteudella, joka on saavuttanut kyllästymispisteen. Materiaalin kosteuspitoisuus ylittyy kapillaari-imun vaikutuksesta. Kapillaarisella alueella kosteuden siirtyminen tapahtuu diffuusion lisäksi myös nesteinä. Kapillaarisella alueella aine menettää radikaalisti lämmöneristys- ja vesihöyrynvastuskykynsä. (Vinha ym. 2013, Liite 1.)

Kapillaarinen kosteuden siirtyminen on seinärakenteissa vaakasuuntaan nopeampaa, kun kapillaarisuutta ei vastusta painovoima. Kapillaarisuuteen vaikuttavat materiaaliominaisuus kapillaari-imulle sekä ulkoiset voimat tuulenpaine ja vedenpaine (Björkholtz 1997, 54). Rakennusaineen kuivamisen ja kostumisen vaiheita, materiaalissa vallitsevan suhteellisen kosteuden suhteen on kuvattu seuraavasti kuvassa 5.



Kuva 5. Rakennusmateriaalin hygrokooppisesta toiminnasta (Pentti & Hyypöläinen 1999, 30).

Materiaalin on mahdollista saavuttaa ilmasta sitomalla kosteutta itseensä hygroskooppisen alueen ylärajaan 97–98 % asti, mutta kapillaarisella alueella veden lisäämiseen aineen huokosiin tarvitaan ulkoista vaikutusta materiaaliin. Ulkoinen vaikutus voi olla edellä mainittu kosketus vapaaseen vedenpintaan tai tuulenpaine. Käytännössä rakennusfysikaalisella laskentaohjelmalla rakenteita simuloitaessa voidaan pitää edellä mainittua 97–98 % aineen sisältämää suhteellista kosteutta ehdottomana ylärajana, koska tämän jälkeen kosteutta ilmenee ainekerroksessa runsain määrin vetenä. Hygroskooppinen toiminta on sidoksissa aineen vesihöyrynvastukseen. Mitä enemmän aine vastustaa höyrymäisen veden liikettä, sitä kauemmin aineella kestää kostua ja kuivaa ilman suhteellisen kosteuden vaikutuksesta.

3 RAKENNUSFYSIKAALISET LASKENTAOHJELMAT

Laskentaohjelmissa olosuhteet rakenteelle ovat joko stationääriset tai epästationääriset. Stationäärisellä laskentaohjelmalla rakenteelle määritetään yksittäinen vakio-olosuhde, jossa rakenne toimii huomioiden materiaalitkin myös stationääritilassa. Tarkastelua ei tapahdu siis pidemmällä aikajaksolla eikä ajan funktiona. Stationäärisellä tarkastelulla voidaan määrittää esimerkiksi U-arvo, lämpötilan tai ilman suhteellisen kosteuden kehitys rakenteessa. Stationäärisessä tarkastelussa ei siis voida huomioida materiaaliominaisuuksien muuttumista tai erilaisissa olosuhteissa. Käytännössä stationäärisessä tarkastelussa saadaan rakenteessa höyrynsulkutoiminnan kannalta kriittisin kosteuden tiivistymiskohta.

Epästationäärisillä laskentatarkasteluilla rakenteelle asetetut olosuhteet muuttuvat esimerkiksi ajan, materiaaliominaisuuksien ja sääolojen suhteen. Laskenta tapahtuu pidemmällä aikajaksolla, joka ottaa huomioon erilaiset lämmön- sekä kosteuden siirtymismuodot samanaikaisesti rakenteessa. Stationäärinen tarkastelukeino on tavanomaisempi, mutta epästationäärinen tarkastelu yleistyy, kun tarkempi materiaalitietämys kasvaa.

Suomessa usein käytetty laskentaohjelma stationäärisissä tapauksissa on DOF-lämpö. DOF-lämmöllä voidaan arvioida rakenteen U-arvoa, energiankulutusta, lämpö- sekä kosteuskäyriä vakio-olosuhteissa (DOF-tech kotisivut s.a.). Käytännössä ohjelmaan määritetään jokin rakennetyyppi ja niiden rakennusaineiden materiaaliarvot. Ohjelma piirtää rakennetyypin pohjalle grafiikan lämpötilan kehittymisestä rakenteessa. Laskennasta saadaan tieto, onko rakenteen sisälle ylipäänsä mahdollista muodostua kastepistettä. Kuormittavin tilanne mielletään stationäärisissä tapauksissa vuoden kylmimmäksi päiväksi, jolloin ulkoilman suhteellisen kosteuden erot sisäilman kanssa ovat suurimmat. Tarkastelua tehdään talvella, koska ilman suhteellinen kosteus on suurimmillaan seinärakenteen sisällä talvella, kun lämpötila- sekä kosteuserot pyrkivät tasoittumaan seinärakenteen lävitse.

Laskentamalli ei ota huomioon rakennusmateriaalien hygroskooppisia ominaisuuksia, eli kosteuden tasaantumista materiaalin ja ilman välillä. Huomioimatta jää myös muita oleellisia asioita kuten: rakennusaineen lämmönjohtavuuden tai vesihöyrynläpäisevyyden kehitys materiaalin kosteuspitoisuuden kasvaessa. Ohjelmasta ei ole saatavissa sellaista laskentadataa, jota voisi hyödyntää esimerkiksi homeindeksintarkastelussa. DOF-lämpö soveltuu määräysten mukaiseen laskentaan, kuten U-arvon laskentaan ja kastepiste tarkasteluun rakenteessa.

WUFI 1D on yksidimensionaalinen laskentaohjelma, jossa käytännössä määritetään rakennetyyppi ja tehdään sille rakennusfysikaaliset tarkastelut epästationäärisessä tilassa. Laskentaohjelmalla voidaan huomioida ilmasto-olosuhteita kohteessa, jossa rakenne sijaitsee. Tarkastelua tehdään pidemmällä ajanjaksoilla rakenteen rasittuessa luonnonilmiöille. Laskentaohjelma soveltuu lämpö- ja kosteustekniseen tarkasteluun esimerkiksi seinärakenteelle. Laskentaohjelmassa määritetään monitorointipisteet tulosten tarkastelua varten. Monitorointipisteistä saatava tieto on helposti yhteensovitettavissa homeindeksi taulukkolaskentapohjan kanssa, jolloin tarkastelua rakenteen toimivuudelle voidaan tehdä pidemmällä aikajaksolla. (Wufi-wiki 2009.)

WUFI 2D on kaksidimensionaalinen laskentaohjelma, jota käytetään liitoskohtien tutkimiseen epästationäärisessä tilassa. Tutkittavia liitoskohtia ovat esimerkiksi perustuksien ja seinän liitos tai rakennuksen ulkonurkka. WUFI 2D:tä suositellaankin käytettävän vain WUFI 1D:n täydennykseksi, WUFI 1D:n helppokäyttöisyytensä vuoksi. Laskenta-aika kasvaa merkittävästi yksidimensionaaliseen tarkasteluun nähden. (Wufi kotisivut 2018).

WUFI 3D:stä on kahden tyyppistä kolmidimensionaalista laskentaohjelmaa, jotka laskevat rakennukset epästationäärisissä tapauksissa. Ensimmäinen on passiivirakenteille tarkoitettu WUFI Passive ja toinen yleisesti WUFI Plus. Molemmat näistä laskentaohjelmista laskee käytännössä kaiken rakennusfysikaalisiin lämpö- ja kosteusteknisiin tarkasteluihin ja energiankulutukseen liittyen. Laskennat alkavat olemaan raskaita laskennaltaan ja tiedostojen kooltaan.

WUFI Plus ohjelmalla voidaan määrittää, täyttääkö rakenne passiivitalon kriteerit. WUFI Passive neuvotaan ottamaan käyttöön, kun passiivitalon kriteerit täyttyvät. (Wufi kotisivut 2018.)

3.1 Lämpö- ja kosteussimulointi WUFI-laskentaohjelmalla

WUFI-laskentaohjelma on tuoteperhe, jolla lasketaan lämpötila- sekä kosteudenkulku monikerroksisissa rakenneseosissa, ottaen huomioon, että rakenne altistuu luonnon sääolosuhteille. WUFI-laskentaohjelma on päivittyvä ohjelmisto, jonka tulokset pohjautuvat viimeisimpiin havaintoihin rakennusfysiikassa. Ohjelmisto on kehitetty laboratorio- sekä kenttäkokeiden saatujen tulosten pohjalta. (Wufi kotisivut 2018.)

Laskennan suorittamiseksi rakennekerrosten aineista vaaditaan materiaalikoh- taisia arvoja, kuten aineen raakatiheys, huokoisuus, ominaislämpökapasiteetti, lämmönjohtavuus ja vesihöyryn diffuusiokerroin, jotka muodostavat yhdessä käsitteen perusarvot. Perusarvot ovat kuvattu taulukossa 4 seuraavasti.

Taulukko 4. Materiaalien määriteltävät perusarvot WUFI-laskentaohjelmassa (Wufi-Wiki 2009)

Raakatiheys [kg/m^3]	Materiaalin massa tilavuuden suhteen
Huokoisuus [m^3/m^3]	Materiaalin tiivistyneisyys tilavuuden suhteen
Ominaislämpökapasiteetti, kuiva [J/kgK]	Kuvaa materiaalin kapasiteettia sitoa lämpöenergiaa kuivaa massaa kohden
Lämmönjohtavuus, kuiva, 10°C [W/mK]	Kuivan materiaalin lämmönjohtavuuskyky lämpötilan suhteen
Vesihöyryn diffuusiokerroin [-]	Materiaalin vesihöyrynvastusluku

Lisäksi, jotta kosteuden ja lämpövirran liikettä pystytään simuloimaan ohjelmalla tarkasti, tarvitaan laskennan tueksi materiaalin hygrotermisiä funktioita ja vallitsevien olosuhteiden sääaineistoa. Hygrotermiset funktiot kuvaavat materiaalin ominaisuuksien muutosta, kuten lämmönjohtavuuden tai vesihöyrynvastuksen suhteen, materiaaliin sitoutuneen kosteuden tai ympärillä vallitsevan lämpötilan suhteen.

Taulukko 5. Hygrotermiset funktiot WUFI-laskentaohjelmassa (Wufi-Wiki 2009)

Kosteuskapasiteettifunktio	Kertoo materiaaliin sitoutuneen kosteuden $[\text{kg}/\text{m}^3]$ suhteessa suhteelliseen kosteuteen $[\%]$
Kapillaariset ominaisuudet	Nesteen liikkumista materiaalin huokoisissa $[\text{m}^2/\text{s}]$ suhteessa materiaalissa olevaan kosteuteen $[\text{kg}/\text{m}^3]$
Diffuusiovastuskerroin	ilmaisee, diffuusiovastusluvun $[\mu]$ heikkenemisen suhteessa materiaalissa olevaan suhteellisen kosteuteen $[\%]$
Lämmönjohtavuus, kosteudesta riippuva	Kertoo materiaalin lämmönjohtavuudesta $[\text{W}/\text{mK}]$ kosteuden kasvaessa $[\text{kg}/\text{m}^3]$
Lämmönjohtavuus, lämpötilasta riippuva	Ilmaisee materiaalin lämmönjohtavuuden $[\text{W}/\text{mK}]$ lämpötilan suhteen $[\text{°C}]$
Entalpia, lämpötilariippuva	Entalpia kertoo materiaaliin sitoutuneesta lämpöenergian määrästä $[\text{J}/\text{kg}]$ lämpötilan suhteen $[\text{°C}]$

Laskennallisella mallinnuksella voidaan ottaa huomioon eri rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet, ja saada realistisempi kuva rakenteen höyrynsulkutoiminnasta pidemmällä aikajaksolla.

Seinärakenteesta käytetään laskentaohjelmassa termiä komponentti. Komponentti muodostuu eri rakennekerroksista. Komponenttiin määritellään rakennekerrokset. Rakennekerroksia voi tehdä manuaalisesti tietoja syöttämällä tai hakemalla ohjelman tietokannasta. Rakennekerroksia määriteltäessä rakennekerroksista tulisi tietää perusarvot sekä hygrotermiset funktiot. Tarkat materiaalitiedot vähentävät konvergoituvirheiden lukumäärää, jonka ohjelma ilmoittaa laskennan päätyttyä, joka lähinnä johtuu puutteellisesta tietojen määrittämisestä.

Komponentille määritetään myös mahdolliset lämmön-, kosteuden- ja ilmanvaihtolähteet, joita ohjelma kutsuu hygrotermisiksi lähteiksi. Lähteiden ja nielu-
jen määrittäminen on tärkeää, jotta simuloinnin aikana käy ilmi lämmön- sekä kosteuden virtaussuunta.

Laskentaohjelmalla ei voida ottaa huomioon lämmöneristeiden ikääntymistä, sekä konvektion vaikutusta rakenteessa ja kylmiä siltoja, joilla olisi vaikutusta simuloinnin lopputulokseen. Oletuksena on rakenteen toimivuus ideaalitilanteessa, jossa rakenne toimii virheettömästi ilman epäkohtia. Mahdollisia epäkohtia (mm. kylmäsiltoja) voidaan jäljitellä lisäämällä rakenteisiin hygrotermisiä lähteitä, joilla voidaan selvittää rakenteen toimivuus esimerkiksi vuotokohdissa. Hygrotermisillä lähteillä voi myös lisätä tuuletusrakojen rakenteeseen eli ilmanvaihtuvuuslähde tai lämmönlähteitä esimerkiksi kiuas.

3.2 Laskennan kulku

Lämmön kuljettumisprosessia kuvataan differentiaaliyhtälöllä 20.

$$\frac{\partial H}{\partial \vartheta} \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + h_v \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (20)$$

jossa	H	kostean materiaalin entalpia	[J/m ³]
	ϑ	lämpötila	[°C]
	λ	kostean aineen lämmönjohtavuus	[W/mK]
	h_v	veden haihtumisen entalpia	[J/kg]
	δ	ilman vesihöyryn läpäisevyys	[kg/msPa]
	μ	diffuusiovastuskerroin	[-]
	p	vesihöyryn osapaine	[Pa]

Kosteuden kuljettumista kuvataan differentiaaliyhtälöllä 21.

$$\rho_w \frac{\partial u}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_w D_w \frac{\partial u}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (21)$$

jossa	ρ_w	veden tiheys	[kg/m ³]
	u	huokoisten vesipitoisuus	[m ³ /m ³]
	φ	suhteellinen kosteus	[-]
	D_w	kapillaarinen kuljettumiskerroin	[m ² /s]
	δ	ilman vesihöyryn läpäisevyys	[kg/msPa]
	μ	diffuusiovastuskerroin	[-]
	p	vesihöyryn osapaine	[Pa]

Lämmön- ja kosteudensiirtymisprosesseja kuvataan laskentaohjelmassa yhdistetyillä differentiaaliyhtälöillä. Differentiaaliyhtälö on usean muuttujan yhtälö, jonka voi ratkaista esimerkiksi iteroimalla.

Molempien yhtälöiden vasemmat puolet kuvaavat materiaalin kykyä varastoida lämpöä sekä kosteutta. Kosteuden kuljettumisyhtälössä kuvataan kosteuden varastoitumista aineen huokosiinsa. Lämmönsiirtymisyhtälössä lämmönvarastointikyky perustuu aineen massaan, lämpötilaan ja kostean aineen entalpiaan. (Wufi-wiki 2009.)

Yhtälöiden oikeat puolet kuvaavat lämmön- sekä kosteuden kuljettumisehtoja rakenteessa. Kaavassa määritetään lämmönsiirtyminen aineessa johtumalla materiaalissa vallitsevan kosteuden suhteen sekä diffuusiolla haihtuvan veden entalpiavirtausten suhteen. Käsitteenä entalpiavirtaus huomioi lämmön sitoutumisen materiaaliin tarkasteltavassa paikassa ja vapautumisen rakenteessa. (Wufi-wiki 2009.)

Kaavassa (21) kosteuden kulkeutumista määritetään materiaalin vesihöyrynläpäisevyyden, kapillaaristen ominaisuuksien ja ilman ominaisuuksien suhteen. Kapillaariset ominaisuudet sekä materiaalin vesihöyrynläpäisevyys ovat riippuvaisia materiaalissa vallitsevan suhteellisen kosteuden määrästä. Mikäli ohjelma ei pysty iteroimaan derivaattayhtälöä tasapainoon, ilmoittaa ohjelma konvergointivirheestä (Wufi-wiki 2009.) Konvergointivirhe aiheuttaa pitkäaikaisessa tarkastelussa jatkumoa seuraavalle, kun laskenta perustuu edellisestä arvosta saatuun tulokseen. Yleensä virheet ovat minimaalisia, kun ohjelma iteroi tuloksen minimiin.

4 HOMEINDEKSIIN LASKENTA

Homeindeksi on TTY:n ja VTT:n yhdessä kehitelemä numeerinen taulukkolaskentamenetelmä rakenteen homehtumisriskin tarkastelua varten. Mallilla pystytään arvioimaan kasvuriskiä rakennusmateriaalien pinnoilla muuttuvissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa suhteessa aikaan. Laskennassa otetaan huomioon homeen mahdollinen taantuminen liian kuivissa tai kylmissä olosuhteissa, jolla on pienentävä vaikutus homeindeksin arvoon. Laskennassa käytetään homeindeksille suuretta M , joka kuvaa materiaalin homehtumisriskiä (ks. kuva 8). Homeindeksi ei ota kantaa siihen, kuinka ihmisen terveydelle vaarallista tai haitallista mahdollinen mikrobikasvusto on. (Suomalainen homemalli 2017.) Kuvassa 6 on kuvattu eri rakennusmateriaalien homehtumisherakkyysluokat, joka kuvaa kuinka altis materiaali on homeen kasvuille.

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

Kuva 6. Materiaalit jaotellaan homehtumisherakkyysluokkiin (HHL) (Homeindeksin taulukkolaskentapohja 2017).

Vastaavasti homehtumisherakkyydelle on määritelty taantumaluokka (ks. kuva 7). Tautumaluokka kuvaa kuinka hyvin materiaalissa oleva mahdollinen mikrobikasvusto taantuu, kun olosuhteet mikrobikasvuston kasvamiselle ei ole suotuisat.

Taantumakerroin C_{mat} ryhmittäin		Esimerkiksi
voimakas taantuma	1	
merkittävä taantuma	0,5	(sahattu mänty ja kuusi, mitalistettu mänty ja kuusi, kevytbetoni)
kohtalainen taantuma	0,25	(höylätty mänty ja kuusi, kuusiliimapuulevy, betoni, paperipintainen PUR)
vähäinen taantuma	0,1	(kevytsorabetoni, polyesterikuitueriste, EPS, lasivilla)

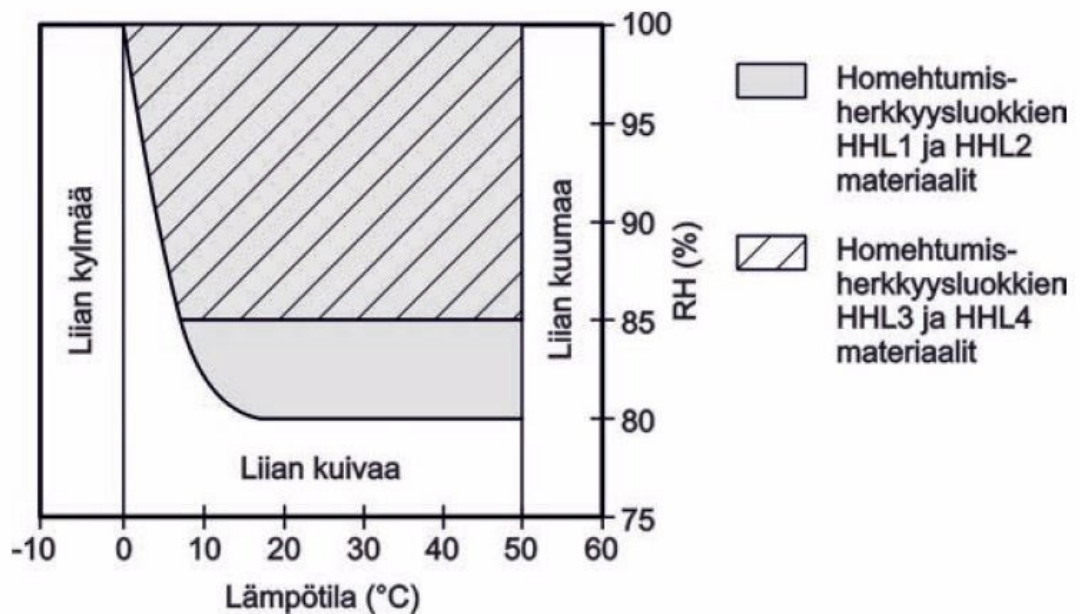
Kuva 7. Homeindeksin määrittämisessä käytettävät taantumaluokat (Homeindeksin taulukkolaskentapohja 2017)

Tulkinta taulukkolaskennan homeindeksin arvosta on esitetty kuvassa 8.

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

Kuva 8. Homeindeksin laskentatuloksen tulkinta (Homeindeksin taulukkolaskentapohja 2017)

TTY ja VTT (Suomalainen homemalli 2017) määrittelee mikrobikasvustolle suotuisat olosuhteet kuvan 9 mukaisesti.



Kuva 9. Mikrobikasvustolle suotuisat olosuhteet (Homeindeksin taulukkolaskentapohja 2017)

Vanhemmassa VTT:n esittelemässä (1999, 38) homeindeksin laskentamallissa on myös esitetty mikrobikasvuston taantumista lämpötilan laskiessa alle pakasrajan.

Puulle kriittiset olosuhteet lahon ja homeen kannalta on määritetty seuraavasti taulukossa 6.

Taulukko 6. Kriittisiä kosteuksia (Björkholtz 1997, 60 & Hagentoft 2017, 38)

	Riskitön	Vähäinen riski	Suuri riski
Laho, kosteusprosentti	< 16 %	16 – 28 %	> 28 %
Laho, suhteellinen kosteus	< 75 %	75 – 99%	> 99 %
Laho, lämpötila	Suotuisa lämpötila olosuhde +3...45°C		
Home, Kosteusprosentti	< 15 %	15 – 20 %	> 20%
Home suhteellinen kosteus	< 70 %	70 – 85 %	> 85 %
Home lämpötila	Suotuisa lämpötila olosuhde +3...45°C		

Hagentoft (2017, 38) määrittelee homeen kasvulle puussa matalamman kynnyksen kuin esimerkiksi mitä se on homeindeksin mukaan yleisesti muille materiaaleille. Home ei ole kuitenkaan puulajeissa ainut ongelmallinen haittatekijä. Samasta taulukosta huomataan, että samoissa olosuhteissa on myös mahdollista esiintyä lahoa (Björkholtz 1997, 60). Laholla on vaikutus puun lujuusteknisiin ominaisuuksiin vähentämällä lujuutta, joka riippuu kasvuston esiintyvyydestä.

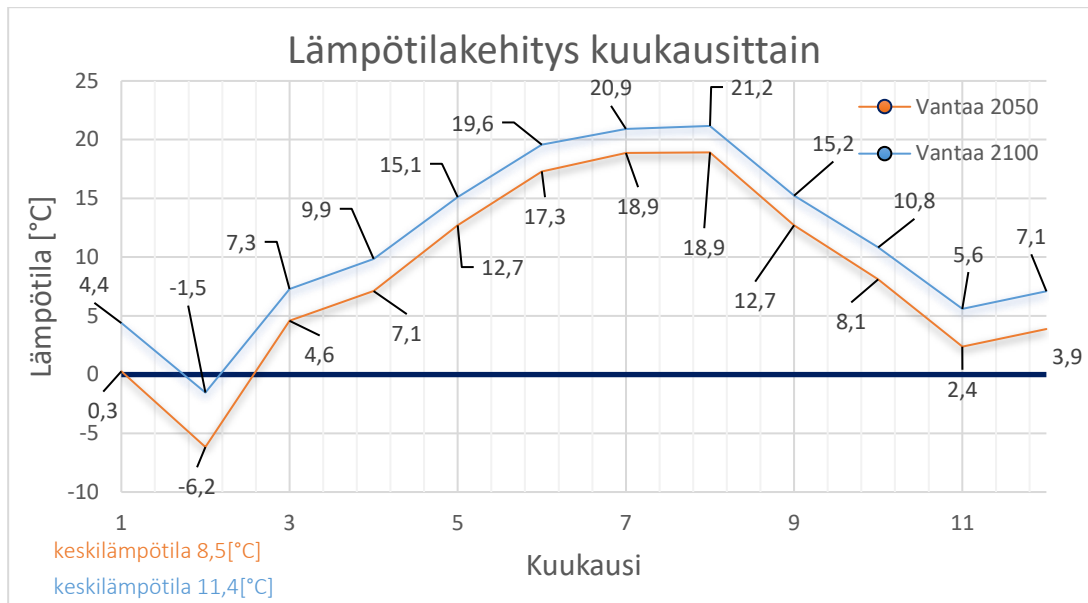
5 TUTKITTAVAT SEINÄRAKENTEET

Opinnäytetyössä tavoitteena oli selvittää CLT-rakenteen toimivuutta vertailtuna LVL-ratkaisuihin Suomen olosuhteissa. Tutkittavissa rakennetyypeissä ulkoseinän kantava runko oli LVL-levyä tai CLT-levyä. Tutkittavat CLT-rakenteet olivat pääosin Puufon (2020) RunkoPES 2.0 rakennetyypikirjastosta. Tutkittavina LVL-rakenteina on käytetty pitkälti LVL handbook European (2019, 97) mukaisia rakenneratkaisuita. Laskennassa käytettiin WUFI:n materiaalikirjaston arvoja, Tampereen teknillisen yliopiston Frame-hankkeen (2013, Liite 1) mukaisia materiaaliarvoja ja Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona -tutkimuksen (2005) arvoja.

Ennen laskentaa rakenteelle määritetään monitorointipisteet, jotka tässäkin tapauksissa on määritetty kriittisiin kohtiin rakenteessa. Kriittisiä kohtia rakenteessa ovat eri rakennusaineiden rajapinnat, mutta on oleellista saada dataa paksujen rakennekerrosten keskikohdista. Valideja monitorointipisteiden sijain- teja voidaan jäljittää rakenteessa esimerkiksi stationäärinen tarkastelun perusteella tai laskentaohjelman filmin perusteella. Stationäärinen tarkastelun perusteella on keskeistä huomioida rakenteessa esiintyvät kosteuspadot ja suhteellisen kosteuden esiintyminen rakenteessa.

Tutkittaville rakennetyypeille tehtiin yhden testivuoden perusteella viiden vuoden jatkuva simulaatio homeindeksin tarkastelua varten. Laskennassa käytetyssä säädatassa on nähtävissä ennakoitavat ilmastonmuutoksen vaikutukset ympärivuotisessa säädatan tarkastelussa. Laskennassa käytetty säädata on peräisin Tampereen yliopiston rakennusfysikaalisten testivuosien www-sivuilta. Kuvassa 10 on esitetty arvioitu lämpötilakehitys kahden sääaineiston välillä.

Säätiedostosta tärkeimmät tiedot ulkoilman lämmön- sekä kosteudensiirron kannalta ovat: lämpötila, kosteus, auringon säteily, pitkäaaltoinen lämpösäteily, tuulen nopeus ja suunta, kokonaispaine ja paineen ero sekä sademäärä (VTT 1999, 11).



Kuva 10. Lämpötilan kehittyminen säätiedoston mukaan Vantaalla vuosien 2050–2100 välillä (Kärkäs 2020)

Laskennassa käytettiin Vantaan sekä Jokioisten sääaineistoa nyky- sekä tulevaisuuden ilmastossa.

Säädätassa huomioitavaa oli keskilämpötilan nouseminen, sademäärien kasvu, säteilyn vähentyminen ja tuulten voimistuminen. Rakennusfysiikan kannalta huomioitavaa on lämpötilan nouseminen ja suhteellisen kosteuden kasvu. Sään lauhtuminen luo enemmän edellytyksiä kohoavalle homeindeksille, kun materiaalipinnoilla suhteellinen kosteus ja lämpötila kasvaa, mutta samalla myös taantuminen heikkenee. Rakennusosan tarkastelusuunta määriteltiin viistosateen kuormituksen kannalta vaikeimmaksi. Vantaan säätiedoston mukaan ankarin ilmansuunta oli etelä ja Jokioisissa lounas.

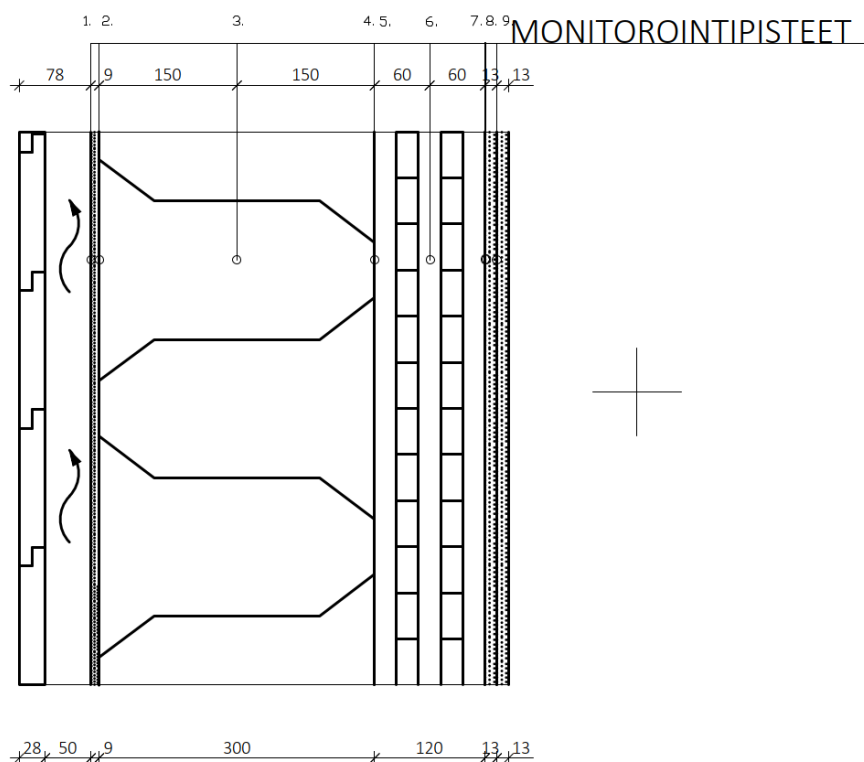
Myrskyjen lisääntyminen	- Viistosateidenrasitus julkisivu- pinnoille kasvaa
Keskilämpötilan nousu - Ilman suhteellinen kosteus kasvaa	- Homeindeksille otolliset olo- suhteet lisääntyvät - Vastaavasti homeindeksitar- kastelussa taantumajaksot ly- hentyvät - Kuivumisajanjaksot lyhentyvät
Rakennusten lämmityksen sijaan jäähdytystarve lisääntyy kesäisin	- Kesäkondensoitumisen riski rakenteen sisälle kasvaa
Poutaiset ajanjaksot lyhenevät	- Kuivumiskyky vähenee
Pilvisuus lisääntyy - Säteily vähenee	- Vähentää ulkopintojen kuiva- mista

Taulukko 7. Sääolojen muuttuminen sekä seuraukset (Heljo & Vinha 2014, 66).

Rakennetyypeissä käytettiin myös simuloitua eri eristemateriaaleja, vertailun vuoksi. Materiaaliparametrit eivät ole sidoksissa tietyn valmistajan tuotteeseen.

VTT:n raportin (1999, 12) mukaan uusien rakenteiden suunnittelussa tulisi käyttääkin maksimaalisia hygrotermisiä kuormia, jotta varmuus rakenteen toimivuudesta tulevaisuudessa saataisiin. Tuona aikana ei ollut laskentaohjelmiin käytettäviä säätiedostoja tulevaisuudesta ennustettu. Nykyajan tiedostot sisältävät rakenteelle tulevat kosteuskuormat. Kuormittavuutta voisi lisätä esimerkiksi asettamalla rakennusaikaista kosteutta alkukosteutena simuloinnille.

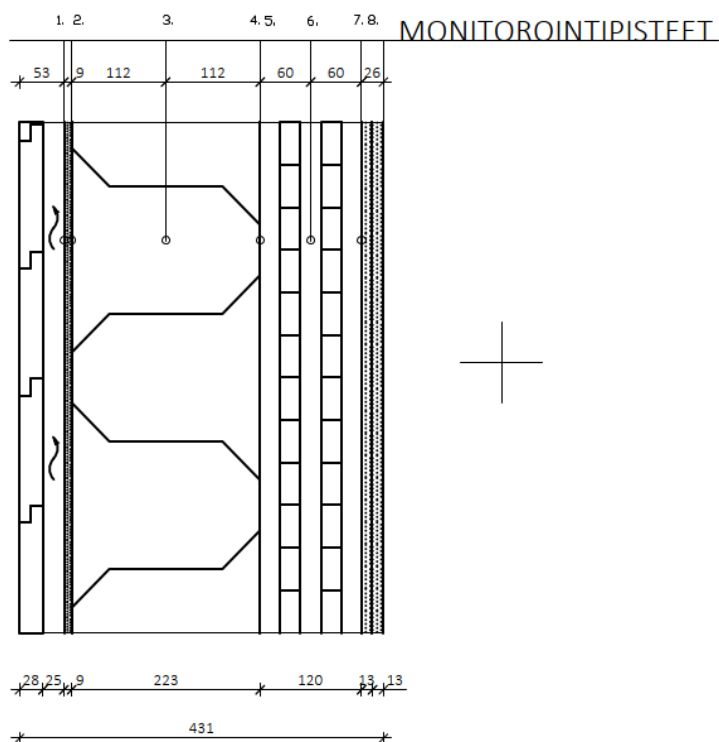
Materiaaleja kuormitettiin asettamalla alkukosteutta näille 80 % lämpötilassa 20°C saadakseen varmuutta rakenteen toimivuudelle kosteusteknisessä kuormituksessa. Lämmöneristeenä CLT-rakenteita simuloitaessa on käytetty mineraalivillaa. Mineraalivilla on alttein rakenteen kosteudenpitoisuuden muutoksille, koska materiaali on vähiten hygroskooppinen käytettävistä olevista villamaisista lämmöneristemateriaaleista. Puukuituinen lämmöneristemateriaali antaisi seinälle enemmän kapasiteettia tasata kosteutta hygroskooppisten ominaisuuksiensa vuoksi.



Taulukko 8. Rakennekerrokset CLT-matalaenergiarakenteessa (Kärkäs 2020)

Kerros	Materiaali	Paksuus [m]	Lambda-arvo [W/mK]
1.	Julkisivumateriaali	0,028	[-]
2.	Tuuletusrako	0,05	[-]
3.	Tuulensuojakipsilevy	0,009	0,19
4.	Mineraalivilla + koolaus k600	0,3	0,035
5.	Höyrynsulkumuovi	0,0002	[-]
6.	CLT-levy	0,12	0,13
7.	Kipsilevy	0,013	0,19
8.	Kipsilevy	0,013	0,19

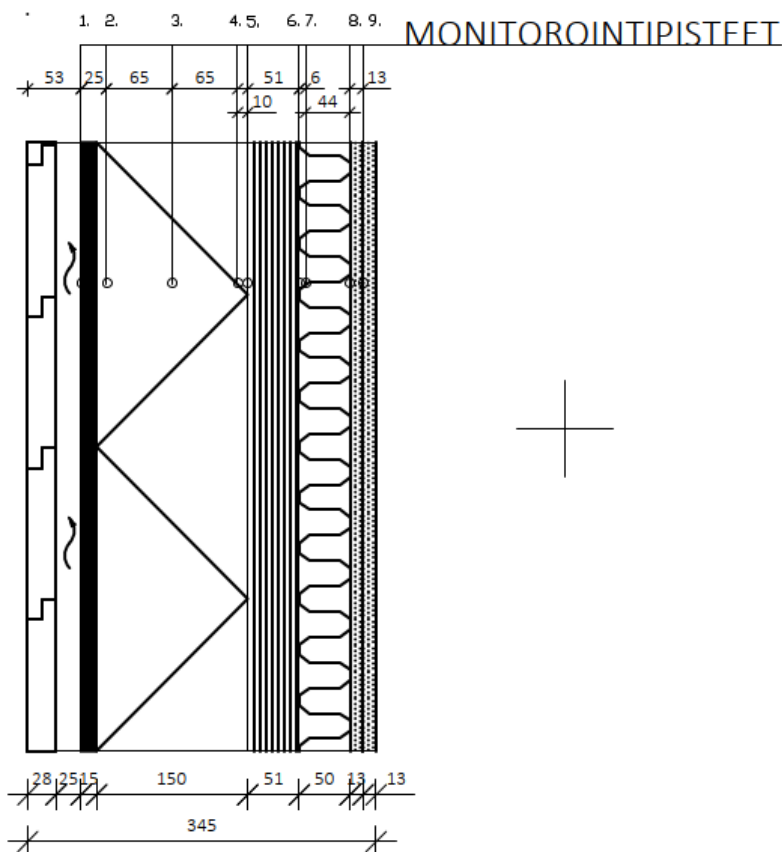
Ohessa CLT-matalaenergiarakennetyyppi, jonka U-arvo on $0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ (ks. taulukko 8). Kaikki rakennetyypit eroavat lähteistään siten, että simuloinnin aikana sisäverhousmateriaalina on käytetty kahta kipsilevyä, jotta paloeristävyysvaatimukset täytyisivät. Myös tuuletusrakoina on käytetty eri dimensioita vertailua varten. Peruskäsityksenä on, että kasvava lämmöneristeen määrä rakenteessa tarvitsee suuremman tuuletusraon, jotta rakenteen kuivumiskyky kasvaa lämmöneristeen määrän vähentäessä sitä. Kasvavaa lämmöneristeen määrää on pyritty kompensoimaan tuuletusrakoa suurentamalla.



Taulukko 9. Rakennekerrokset tutkittavassa CLT-rakenteessa (Kärkäs 2020)

Kerros	Materiaali	Paksuus [m]	Lambda-arvo [W/mK]
1.	Julkisivumateriaali	0,028	[-]
2.	Tuuletusrako	0,025	[-]
3.	Tuulensuojakipsilevy	0,009	0,19
4.	Mineraalivilla + koolaus k600	0,223	0,035
5.	Höyrynsulkumuovi	0,0002	[-]
6.	CLT-levy	0,12	0,13
7.	Kipsilevy	0,013	0,19
8.	Kipsilevy	0,013	0,19

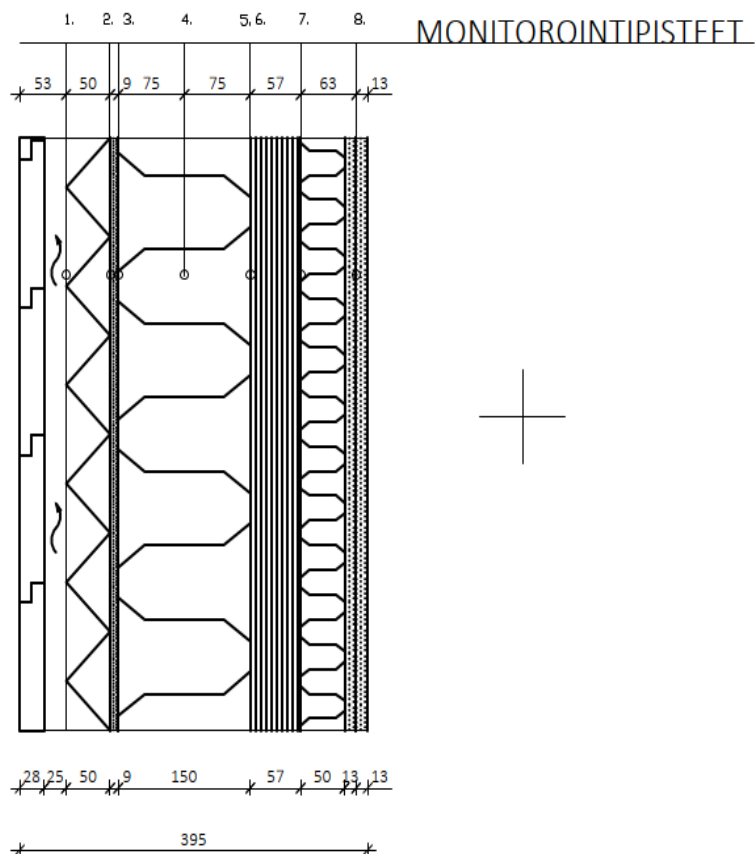
Ohessa CLT-rakenne, jonka U-arvo on 0,13 W/m²K. CLT-rakenteet poikkeavat toisistaan eristepaksuudessa ja tuuletusraon koossa (ks. taulukko 9). Simulatiolla on pyritty selvittämään tuuletusraon merkitystä eristepaksuuden kasvaessa. Rakenteen höyrynsulkukerros sijaitsee CLT-rungon ja puukoolauksen välissä. Höyrynsulkukerros on järkevintä laittaa puukoolauksen ja kantavan rungon väliin, jotta mahdollinen kerroksen rei'itys kiinnikkeillä olisi mahdollisimman vähäistä. Höyrynsulkukerros erottaa sisäilman ja ulkoilman sekä estää näitä sekoittumasta keskenään. Rakennekosteus ei siis pääse tasoittumaan CLT-levyn ulkopinnasta ulospäin, ainoastaan sisäänpäin. Olisi syytä tarkastella, että minkälaisella pinnoitteella sisäverhous voidaan pinnoittaa, jotta rakenteellisen kosteuden olisi mahdollista tasoittua ulos rakenteesta sisäverhouksen kautta.



Taulukko 10. Rakennekerrokset höyrynsulullisessa LVL-rakenteessa (Kärkäs 2020)

Kerros	Materiaali	Paksuus [m]	Lambda-arvo [W/mK]
1.	Julkisivumateriaali	0,028	[-]
2.	Tuuletusrako	0,025	[-]
3.	OSB-levy	0,015	0,092
4.	Polyuretaanieriste	0,15	0,025
5.	Alumiinipaperi	0,0002	[-]
6.	LVL-C Levy	0,051	0,13
7.	Mineraalivilla	0,05	0,035
8.	Kipsilevy	0,013	0,19
9.	Kipsilevy	0,013	0,19

LVL-rakenne saa U-arvon 0,12 W/m²K. LVL-rakenteen rakennekerrokset on esitetty taulukossa 10. Rakenteessa on käytetty OSB-levyä tuulensuojakerroksena. OSB-levy poikkeaa muista tuulensuojamateriaaleista niin, että se omaa korkean vesihöyrynvastuskapasiteetin verrattain muihin tuulensuojatuotteisiin. Rakenteessa on käytetty polyuretaanieristettä, joka omaa hyvän lämmönjohtavuusarvon esimerkiksi mineraalivillan verrattuna. Poikkeavaa PU-eristeessä on korkea diffuusiovastusluku villamaisiin lämmöneristeisiin verrattuna. Simuloitaessa on käytetty höyrynsulkuna alumiinipaperia.



Taulukko 11. Rakennekerrokset höyrynsuluttomassa LVL-rakenteessa (Kärkäs 2020)

Kerros	Materiaali	Paksuus [m]	Lambda-arvo
1.	Julkisivumateriaali	0,028	[-]
2.	Tuuletusrako	0,025	[-]
3.	Tuulensuojavilla	0,05	0,031
4.	Tuulensuojakipsilevy	0,009	0,19
5.	Mineraalivilla + Koolaus k600	0,15	0,035
6.	LVL-C Levy	0,057	0,13
7.	Mineraalivilla	0,05	0,035
8.	Kipsilevy	0,013	0,19
9.	Kipsilevy	0,013	0,19

Oheinen höyrynsuluton LVL-rakenne saa U-arvon 0,13 W/m²K. Rakenne poikkeaa muista olemalla höyrynsuluton rakenne (ks. taulukko 11). Höyrynsulun merkitystä on pyritty arvioimaan homeindeksin avulla. Rakenne on altis sisä- ja ulkoilman kosteudelle, joka tasaantuu rakenteen lävitse. Homeindeksitarkastelussa ilmenee myöhemmin höyrynsulun merkitys, kun ilmenee rakennekerrokseen jäävän kosteuden olevan suurempi kuin höyrynsulullisessa ratkaisussa.

5.1 Liiman vaikuttavuus CLT-levyssä

CLT-valmistajista suurin osa käyttää valmistuksessaan PUR-liimaa, ja selkeä vähemmistö valmistajista käyttää MUF-liimaa. PUR-liima kovettuu huoneenlämmössä ja on kuivamisajaltaan lyhyempi, joka on tuotannon kannalta helppo ratkaisu. (Pfunggen 2018.)

Puufon (2020.) mukaan CLT-levyjen liimasaumat ovat testattu erilaisissa rasituskokeissa, vähäisten käyttäjäkokemusten vuoksi. Rasituskokeilla tutkitaan liimasauman toimivuutta pidempiaikaisissa olosuhteissa. Kosteudunkulku CLT-levyssä riippuu liiman käytettävyydestä, paksuudesta sekä suhteellisen kosteuden määrästä lamellikerroksien välillä. Keskimääräinen liimasauman paksuus on 0,1 mm. Valmistusprosessissaan liimaus muodostaa kaasun ja kuivumisen aiheuttavia aukkoja. Liimauksen ei katsota muodostavan tiivistä höyrynsulkua lamellikerrosten välille, vaan kosteus pääsee tasaantumaan liimakerrosten läpi vapaasti.

Srisgantharajah ja Ullah (2015, 87) vertailivat diplomityössään laboratoriotuloksiaan WUFI 2D laskentaohjelmassa saatuihin tuloksiin. Tuloksista kävi ilmi, että CLT-levyn absorption mallintaminen on helpompaa kuin desorption mallinnus. Desorption eli kuivumisen mallinnus oli haasteellista, kun tutkimuksen lopputuloksissa oli päädytty liimakerrosten hidastavan kuivamista. WUFI-simulaatiossa rakenteen todettiin kuivavan nopeammin kuin laboratorionkokeissa. Tutkimuksessa tutkittiin seinän ja lattian välisiä liitoksia.

Liimavalmistaja Purbond (s.a.) on teettänyt mittauksia liimasaumojen vesihöyrynläpäisevyyteen liittyen. Tutkimuksen taustalla oli toistuvasti heränneet kysymykset liimasaumojen toimivuudesta. Tutkimukset tehtiin Purbond HB 110 ja Purbond HB 530 liimoille liitoksissa puun kanssa. Tutkimuksen tulkintana pidettiin 0,1 mm PUR-liimasauman vastaavan diffuusiovastukseltaan 25 mm kuusilamellia. Tutkimuksessa ilmoitetaan 0,1 mm liimasaumalle käytettävän diffuusiovastuslukuna arvoa 10200, kun 25 mm paksulle kuusilamellikerrokselle on ilmoitettu arvona 40. 0,1 mm liimasauman diffuusiovastusluku on 255-kertainen kuusilamelliin nähden, jonka paksuus on 25 mm. Tutkimuksen tulkintana

pidettiin myös, että rakennusaineen kosteustasapainoa voidaan laskea arvioimalla liimasaumoista huolimatta.

Käytännössä se tarkoittaa sitä, että CLT-levyn hygroskooppiset ominaisuudet ovat absorption (kostumisen) suhteen samanlaiset kuin puulla, mutta poikkeaa desorption (kuivamisen) suhteen. Kuivamiseen vaikuttaa suuressa osin liimakerroksen ominaisuudet, mutta myös ristiinliimattujen lautakerrosten syiden erisuuntaisuus.

Liiman vaikuttavuus rakenteessa on edellä mainitusti ilmeinen. Vaikuttavuus lisääntyy mitä enemmän lamellikerroksia levyssä esiintyy. Liiman korkea diffusiovastus suhteessa levyn raaka-aineeseen käytettyyn puuhun on huomattava. Levyn hidas kuivumiskyky, selittyy liimakerrosten aiheuttamasta vesihöyrynvastuksesta. Toisaalta hidas kuivumiskyky on tuotteen eduksi, tällöin muodonmuutokset levyssä vähenevät, kun kuivuminen tapahtuu hitaammin. Hidas kuivumiskyky tulee tällöin yhteensovittaa muiden käytettävien rakennusmateriaalien kanssa. Muiden seinärakenteiden ainekerrosten hygroskooppisten ominaisuuksien katsottakoon auttavan kosteustasapainon saavuttamisessa.

5.2 Tuotevalmistajien kyselyt

Kyselyllä oli tarkoitus selvittää valmistajakohtaisia näkemyksiä CLT-levyn rakennusfysikaalisesta toiminnasta ainekerroksena, sekä toiminnasta osana seinärakennetta. Kysely lähetettiin haastattelun muodossa viidelle eri tuotevalmistajalle, joista 1/5 vastasi. Kysely tehtiin sähköpostitse. Kyselyä käytettiin tässä opinnäytetyössä tiedonhankintamenetelmänä, jossa vastauksia pyrittiin saamaan avoimiin kysymyksiin. Kyselyiden vastauksien vähyyksien vuoksi vastauksia ei referoida vaan vastaukset ilmoitetaan niin kuin ne ovat. Kyselyyn vastasi tuotevalmistaja CLT Finland Oy.

Mitä liimaa teillä on käytetty tuotannossanne lamellien liimaamiseksi yhteen?

”Formaldehyditön polyuretaaniliima, M1 luokiteltu”

Onko mahdollista käyttää CLT-levyn kanssa mitä tahansa lämmöneristettä asuinkerrostalojen seinärakenteissa?

”Syrjäliimatun massiivipuun Hoisko CLT:n kanssa emme suosittele käytettäväksi umpisoluista eristettä, joka vaikuttaa normaaliin diffuusioon ja saattaa aiheuttaa kastepistettä rakenteen sisään. Muissa eristeistä ei tiettävästi ole ollut ongelmia.”

Voidaanko CLT-levy päällystää millä tahansa sisäverhousmateriaalilla asuinkerrostalojen seinärakenteissa?

”Huomioitava hyvään rakennustapaan liittyvät rakenneratkaisut (hengittävyys). Kosteissa tiloissa tietenkin huomioitava tuuletusrako pintalevyjen alla”

Millaisella maalilla CLT-seinärakenteessa sisäverhouslevy tulisi maalata, jotta rakennusaikaisen kosteuden olisi mahdollista tuulettua pois rakenteesta?

”Huomioitava hyvään rakennustapaan liittyvät rakenneratkaisut (hengittävyys). Eli sulkeva pinta ei ole hyväksi. Rakennusaikaisen kosteuden poistuminen pidemmällä aikavälillä massiivipuusta on vain hyvä asia. Ulkoseinärakenteiden tuuletusväli on tietenkin normaalisti huomioitava”

Tarvitseeko asuinrakennuksissa, joissa CLT-levyä käytetään kantavana runkona, käyttää erikseen ilman- tai höyrinsulkukerrosta?

”Syrjäliimatulla CLT-massiivipuulevyllä ei tarvitse. Syrjäliimaamattomalla emme suosittele/pysty antamaan takuuta ilmatiiviyyestä. Olemme havainneet, että syrjäliimaamattomalla tulee ilmapuotoja liitoskohtiin (pintalamellin rako, kuva1).”



Kuva 11. Kyseisen haastattelun kuva 1 vasemmalla puolella. Syrjäliimaamattoman CLT-levyn liitokset pintalamellissa, oikealla puolella syrjäliimattu CLT-levy liitoksissa (Peltokangas, J. sähköpostikysely 2020.)

Tulisiko levyn liimakerrokselle käyttää omaa diffuusiovastuslukua, kun rakennetta määritellään rakennusfysikaalisiin laskentaohjelmiin?

”Ei mielestämme tarvitse. Aikanaan, jolloin lamellihirsi tuli markkinoille asiasta keskusteltiin paljon. VTT:n tutkimuksissa ei saatu silloinkaan liimasauman vaikutukselle mitään poikkeamaa vesihöyryn läpäisevyyteen. Suurempi vaikutus on puun tiheydellä (sydänpuu vai pintapuu). Puulehden liitteissä selventäviä tietoja asiasta. Liimanvalmistajan testeissä sauman (0,1 mm) vaikutus on max 25 mm lamellin verran (testattu vanerilla LVL). Käyttämässämme tekniikassa ainoastaan pintakerrokset syrjäliimataan, joten vaikutus diffuusion on ymmärtääksemme pieni. Tämä aihehan koskettaa myös muita liimattuja rakenteita, kuten ikkuna ja ovikarmeja. Materiaaleista LVL (vaneri) tietenkin sisältää useampia liimakerroksia, joten siihen en osaa vastata. Varmaan LVL-valmistajat pystyvät kertomaan tuotteestaan lisää, eli tarvitaanko silloin erillistä diffuusiovastuslukua.”

Hidastaako levyn liimakerros kuivamista, jos vertaillaan tuotetta tuotteen raaka-aineena käytettävään puuhun?

”Mahdollista on, että hidastaa, mutta ei estä pitkäkestoisesti. Hidastaminen olisi vain hyvä, koska silloin puun elämisestä/kuivumisesta johtuvat halkeamat vähenevät ja puumateriaali ehtii ”joustamaan” mukana. Puun kosteus liimaus/tuotantovaiheessa on 12% +-2%. Lopullinen kuivuus vaihtelee 5-18 % sisällä riippuen onko kyseessä sisäpinta vai ulkopinta. Asuminen ja rakennuksen ilmanvaihto vaikuttavat myös asiaan.”

Vaikuttaako kosteus tuotteen ilmatiiveyteen?

”Kosteus ei vaikuta suoraan ilmatiiveyteen. Vaikutus tulee ehkä liitoksissa, jos materiaali/pintalamellit ovat turvonneet kosteudesta. CLT:llä materiaalin muutos on kuitenkin niin pieni ja käytettävät saumatiivisteet kompensoivat tämän mahdollisen 1-2 mm mittapoikkeaman. Ilmatiiveyteen vaikuttaa mielestämme liimaustekniikka, jossa pintakerrokset ovat syrjäliimattuja. Reunaliimaamattomalla saattaa liitoskohtiin tulla ilmavuotoja.”

Tuotevalmistaja ei suosittele käytettävän umpisoluisia eristeitä, joita ovat uretaanipohjaiset eristeet, niiden korkean vesihöyrynvastuksen vuoksi. Rakennusten seinät voidaan pinnoittaa maalilla, joiden vesihöyrynvastuksen ei katsota haittaavan kuivumista ja hengittävyttä. Hengittävyys on hygroskooppista toimintaa, ja sillä tarkoitetaan kosteuden vapaata tasaantumista ainekerroksen ja sen ympäröivän ilman välillä. Syrjäliimatulle CLT-massiivipuulevylle ei katsota tarpeelliseksi käytettävän erillistä ilman- tai höyrynsulkukerrosta, tiiveytensä vuoksi. Levyn liimakerroksen vaikutus kuivamiseen katsotaan tuotteen etuudeksi, koska halkeamien esiintyvyys levyn kuivamisprosessissa vähenee. Tuotteen etuudeksi hirsirakentamiseen katsotaan olevan rakennusfysiikan osalta parempi ilmatiiveys. Paremmalla ilmatiiveydellä tarkoitetaan tuotteen ominaisuuksilla saavutettavaa etuutta, jolloin konvektion avulla liikkuvien ilmavirtausten esiintymät rakenteessa vähenee (Peltokangas, J. sähköpostikysely 2020.)

5.3 Syrjäliimauksen merkitys rakenteessa

Halkeamien muodostumisen riski on tutkittu suurenevan huomattavasti ilmakammioissa tehdyissä testeissä, kun kosteuspitoisuus CLT-levyssä kasvaa yli 2% ympäristönsä olosuhteisiin nähden. Tästä syystä todetaankin rakenteen tarvitsevan tiivistä ilmansulkua materiaalin elämisestä johtuvien muodonmuutoksien takia, vaikka materiaalia ilmatiiviinä pidetäänkin. (Öberg & Wiede 2018, 33.)

Ilmansulku- ja vesihöyrynvastusominaisuudet muuttuvat, kun syrjäliimaamattomassa CLT-levyssä kosteuspitoisuus kasvaa 10:sta 14:sta prosenttiin, koska hiushalkeamat kasvavat levyssä. Tutkimuksessa todetaan, että CLT-levy on syytä peittää ilmatiiviillä materiaalilla. Raportissa tutkittiin CLT-levyjen ilman- ja höyrynsulkutoimintaa erilaisissa kosteuden kuormitustapauksissa ilmatiiveysmittauksiin perustuen. (Kukk ym. 2017, 746.)

Syrjäliimaamattomassa CLT-levyssä lautasaumojen sivut ovat liimaamattomia. Taustalla on halkeamien muodostuminen lautasaumoihin kosteuselämisen vaikutuksista, eikä keskelle lautaan. Syrjäliimatussa CLT-levyssä kaikki sivut ovat liimattuja. Tällöin kosteuselämisen vaikutukset näkyvät laudoissa eikä saumoissa. Liimasaumat ovat aina vahvempia lujuudeltaan kuin mitä tuotteen raaka-aine on. (Puuinfo 2020.)

CLT-levyn mallintaminen WUFI:iin on haastavaa, koska materiaali on epähomogeeninen, kun materiaali sisältää useita liimalla erotettuja puukerroksia, joiden syyt ovat joka kerroksessa erisuuntaisia ja tuotteen raaka-aineena on käytetty eloperäistä materiaalia. Polyuretaaniliimoille ei löydy tarkkoja materiaali-kerros määrittäviä, arvot perustuvat lähinnä arviointiin.

6 RAKENTEIDEN TUTKIMINEN

Tutkittaville CLT- sekä LVL-rakenteille tehtiin laskennalliset tarkastelut Jokioisen ja Vantaan ilmastossa. Matalaenergian rakennetyypissä on yritetty kasvanneen lämmöneristeen määrää kompensoida kasvattamalla tuuletusrakoa vertailtuna tavalliseen CLT-rakenteeseen. Tuuletusraon kasvattamisella on ajateltu kiihdyttävän rakenteen kuivumiskykyä rakenteesta ulospäin. Rakenteiden pintakäsittelyihin ei ole otettu kantaa laskennallisesti tässä opinnäytetyössä. Kaikkia rakennetyyppejä simuloitiin DOF-lämmöllä ja WUFI 1D laskentaohjelmalla.

Stationäärisessä tapauksissa kaikkien tässä opinnäytetyössä esitettyjen rakennetyyppien laskennan voi rajata ulottumaan seinän sisäpinnasta tuulensuojakerrokseen. Laskennan rajauksella tarkoitetaan U-arvon sekä vesihöyryn etenemiseen liittyvää laskentaa. Tuulensuojapinta on käytännössä jo tekemisissä ulkoilman kanssa hyvin tuulettuvassa ilmaraossa julkisivuverhoilun suojatessa sitä tuulelta ja viistosateen aiheuttamalta kuormitukselta. WUFI 1D:ssä tällaisia yksinkertaistuksia ei voi tehdä, koska ohjelma ottaa huomioon säteilyn, tuulen ja viistosateen vaikutukset julkisivupinnoilla, jotka kuormittavat rakennetta.

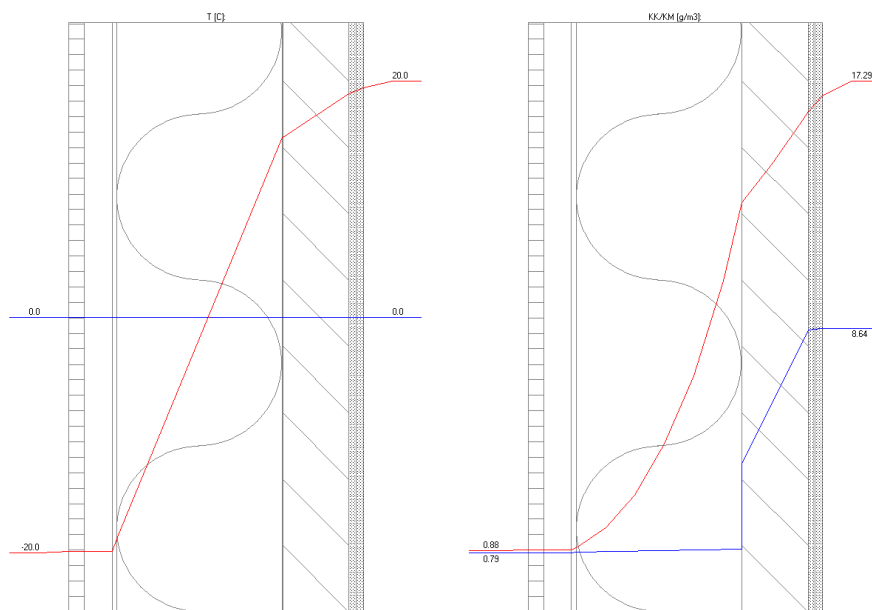
WUFI-laskentaohjelmalla rakennetta tarkasteltiin nyky- sekä tulevaisuuden ilmastossa. Jokaiseen rakenteeseen käytettiin aina RHe-water-nimistä ulkoilma tiedostoa RHe-ice-nimisen tiedoston sijaan. Erona näiden tiedostojen välillä Tampereen yliopiston WWW-sivujen mukaan (2018) on tiedostoissa annettu suhteellisen kosteuden määrä ja sen mittaustapa. RHe-water tiedoston suhteellisen kosteuden mittaustapa on nestemäisen veden suhteen, kun RHe-ice tiedostossa se on ilmoitettu jään suhteen. Simuloinnin kannalta näiden tiedostojen välinen ero oli, että RHe-water tiedosto sisälsi sateen ja RHe-ice tiedosto ei sisältänyt sadetta.

Sisäilmastolle oli myös kaksi tiedostoa eri vuosilta. Laskennassa käytettiin TiS2-päätteistä tiedostoa Ti21-päätteisen tiedoston sijaan. Oleellisena erona näille

tiedostoille oli se, että TiS2-tiedostossa sisäilman lämpötila vaihteli myös vuodenaikojen mukaan, kun Ti21-tiedostossa se oli vakio 21°C. Vaihteleva sisäilman lämpötila kuvaa enemmän todellisuutta valtaosissa asuinrakennuksia, jossa sisäilman lämpötila saattaa kesäisin nousta 26°C.

Tuuletusraossa laskennassa käytettiin hygrotermistä ilmanvaihtolähdettä. Ilmanvaihtuvuudelle käytettiin 0,05m tuuletusraossa 50/h ja 0,025m tuuletusraolle arvoa 25/h. Tämä tarkoittaa sitä, että ilma vaihtuu esimerkiksi 0,025m tuuletusraossa 25 kertaa tunnissa. Monitorointipisteet ovat lueteltu aina ulkopinnasta sisäpintaan päin.

6.1 Matalaenergia CLT-rakenne



Kuva 12. Matalaenergiarakenteen simulointia DOF-lämpö ohjelmalla (Kärkäs 2020)

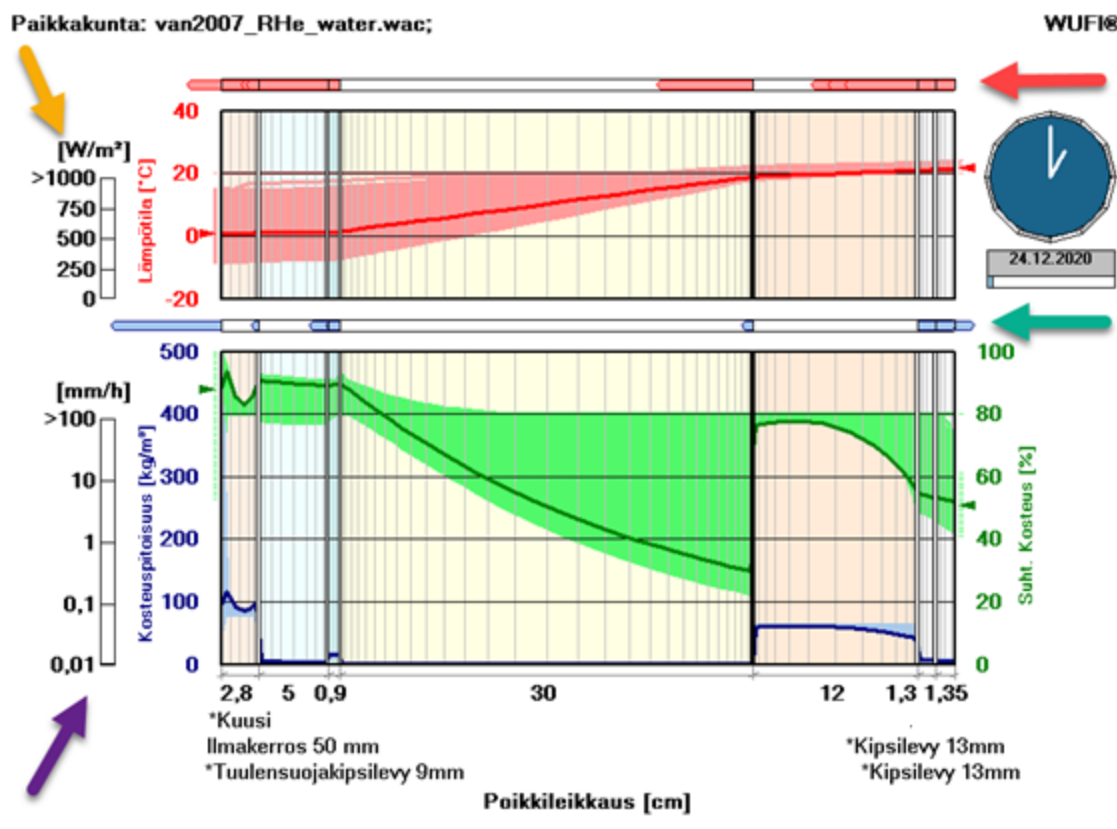
Kuva 12 on DOF-lämpö ohjelmasta matalaenergisestä CLT-rakenteesta. Rakenne on tavanomaisessa laskentatarkastelussa eli stationääritilassa. Tulos on kolmelta vuoden kylmimmältä päivältä. Ohjelman luomassa vasemmanpuoleisessa kuvassa kuvataan rakenteen lämpökäyttäytymistä. Punaisella viivalla kuvataan lämpötilan kehittymistä rakenteessa ja sinisellä viivalla lämpötilan nolla-

tasoa. Oikeanpuoleisessa kuvassa kuvataan rakenteen kosteusteknistä käyttäytymistä. Punaisella käyrällä kuvataan vesihöyryn kyllästyskosteuden määrää rakennusaineen osassa suhteessa vallitsevaan lämpötilaan. Sininen käyrä puolestaan kertoo rakennusaineiden parametreilla toteutuneen diffuusion avulla etenevän kosteudenvirran rakenteessa.

Stationäärisessä tarkastelutavassa huomataan rakenteen toimivan ongelmitta. Kosteusteknisessä toiminnassa on huomattavissa, ettei toteutunut suhteellinen kosteus (sin.) kohtaa kyllästyskosteuden kanssa (pun.). Rakenteessa oleva suhteellinen kosteus pääsee tuulettumaan rakenteesta ulos hyvin tuulettuvaan tuuletusrakoon. Kosteustekniseltä kannalta kuormittavin kohta rakenteessa tuulensuojakerroksen ja lämmöneristekerroksen välissä. Kuormittavuus on jokseenkin välttämätöntä ja yleistä. Kuormittavuus tuulensuojakerroksen ja eristekerroksen rajapinnassa johtuu ulkoilman suuresta kosteuspitoisuuden määrästä ja rakenteessa olevan matalan lämpötilan sisältämästä kosteudesta.

Kuormittavuuteen voitaisiin vaikuttaa valitsemalla tuulensuojakerroksen materiaali paksummaksi tai lämmöneristävyydeltään paremmaksi vesihöyrynvastuksen ollessa sama. Tällöin mahdollinen tiivistymiskohta siirtyisi lähemmäksi hyvin tuulettuvaa tuuletusrakoa, mutta ei poistaisi riskiä vaan madaltaisi kynnystä kondensoitumiselle. Samoin on todettu myös Ympäristöministeriön teettämässä tutkimuksessa matalaenergiarakenteista Tampereen teknillisellä yliopistolla tuulensuojakerroksen toimivuudesta (Vinha ym. 2008, 46).

Rakenteen WUFI-laskentaohjelman laskentafilmiä on esitelty kuvassa 13. Laskentafilmissä esitetään rakenteeseen kohdistuneet lämpö- ja kosteustekniset rasitukset, kun olosuhteet muuttuvat ajan mukaan.



Kuva 13. WUFI-laskentaohjelman laskentafilmi (Kärkäs 2020)

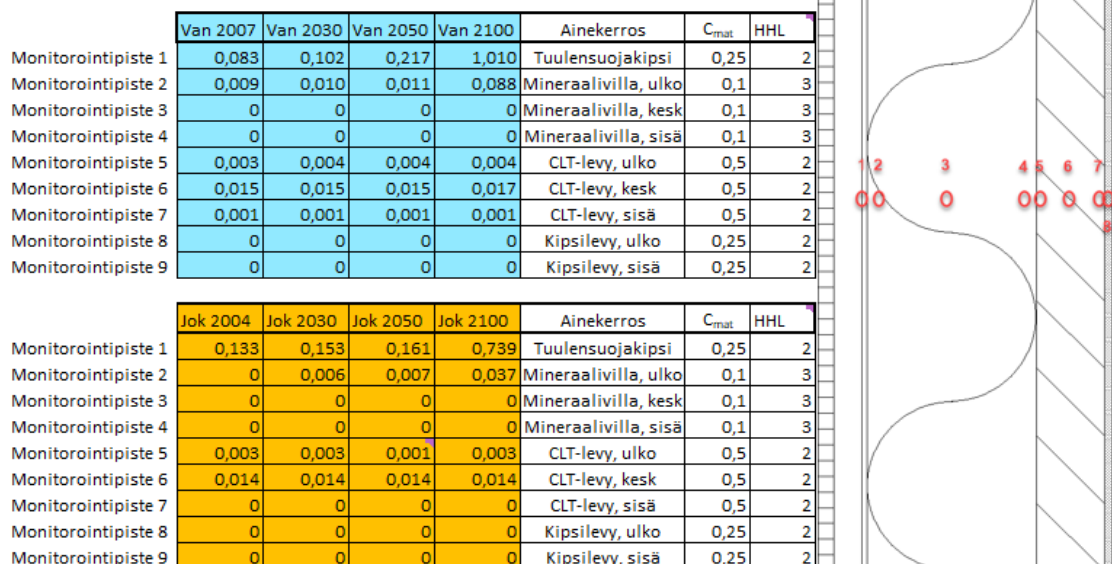
Punainen grafiikka kertoo rakennekerroksen kohdassa olevan lämpötilan aika-hetkellä. Grafiikan yläpuolella oleva punainen nuoli kertoo lämpövirtauksen suunnasta rakenteessa. Keltaisella nuolella osoitettu asteikko kertoo rakenteen julkisivuun kohdistuneesta lämpösäteilyn määrästä.

Violetti nuoli kertoo julkisivuun kohdistuneesta sadekuormasta. Turkoosista nuolesta ilmenee vesihöyryn liikkeen suunta rakenteessa. Vihreä grafiikka rakennusaineen huokoisissa olevan suhteellisen kosteuden määrän. Suhteellisen kosteuden ja vesihöyryn liikkeen grafiikasta on pääteltävissä rakenteen kuivumiskyky. Sininen kosteuspitoisuuskäyrä kertoo materiaalin kosteuspitoisuudesta sen huokoisissa.

WUFI-laskentaohjelman filmistä käy ilmi rakenteen CLT-kerroksen kuivavan erittäin hitaasti sisäänpäin, mikäli rakenteeseen pääsee rakennusaikaista kosteutta. Tämä johtuu siitä, että ulkopuolella on höyrynsulkumuovi, josta kosteus ei pääse lainkaan läpi ja sisäpuolella sijaitsee kipsilevy, joka on paljon vähemmän hygroskooppisempi kuin CLT-levy. Tässä tapauksessa kipsilevyn pinnan-käsittelyllä olisi merkitystä kosteuden kuivamisen kannalta pois rakenteesta.

Lämmöneristekerroksen osalta suhteellinen kosteus nousee ulkopinnassa korkeaksi syksystä talveen (ks. kuva 14). Ilmaston lämmetessä kosteustekninen kuormitus lisääntyy, kun ilmassa oleva lämpötila sekä suhteellinen kosteus kasvaa.

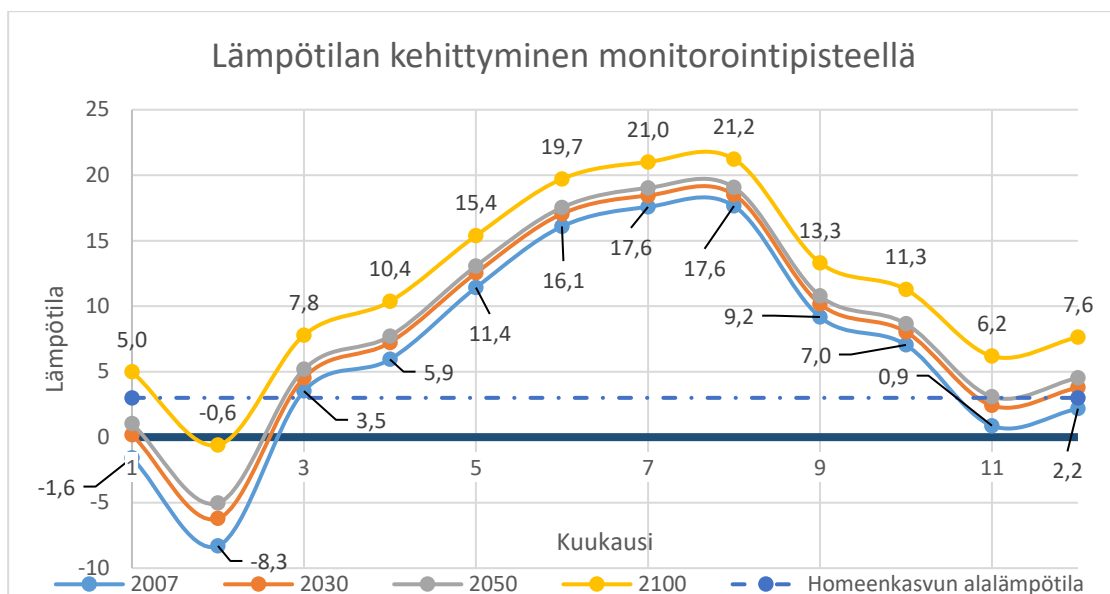
CLT-Matalaenergiarakenne



Kuva 14. Tulokset homeindeksin kehittymisestä monitorointipisteistä mitatusta datasta matalaenergisrakenteen rakennekerroksissa (Kärkäs 2020)

Tuloksista on nähtävissä homeindeksin nousu tuulensuojakerroksessa. Homeindeksin nousu materiaalikerroksessa johtuu suotuisista olosuhteista homeen kasvulle.

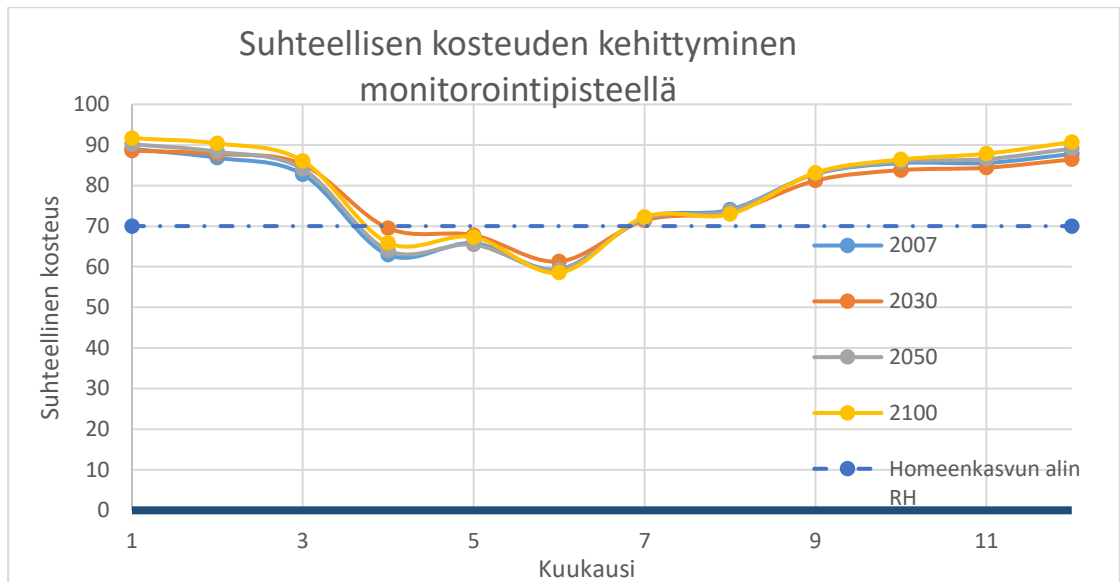
Monitorointipisteen arvot ovat kuvattu kuukausittaisilla keskiarvoilla. Kuukausittaiset lämpötila-arvot ovat kuvattu kuvassa 15. Lämpötilan suotuisuus on kuvattu samassa grafiikassa mahdolliselle mikrobikasvustolle. Grafiikassa on kuvattu alimman sekä ylimmän käyrän kuukausittaiset keskilämpötilat.



Kuva 15. Matalaenergiarakenteen tuulensuojakerroksessa mitatut kuukausittaiset keskilämpötilat Vantaan säätapauksissa (Kärkäs 2020)

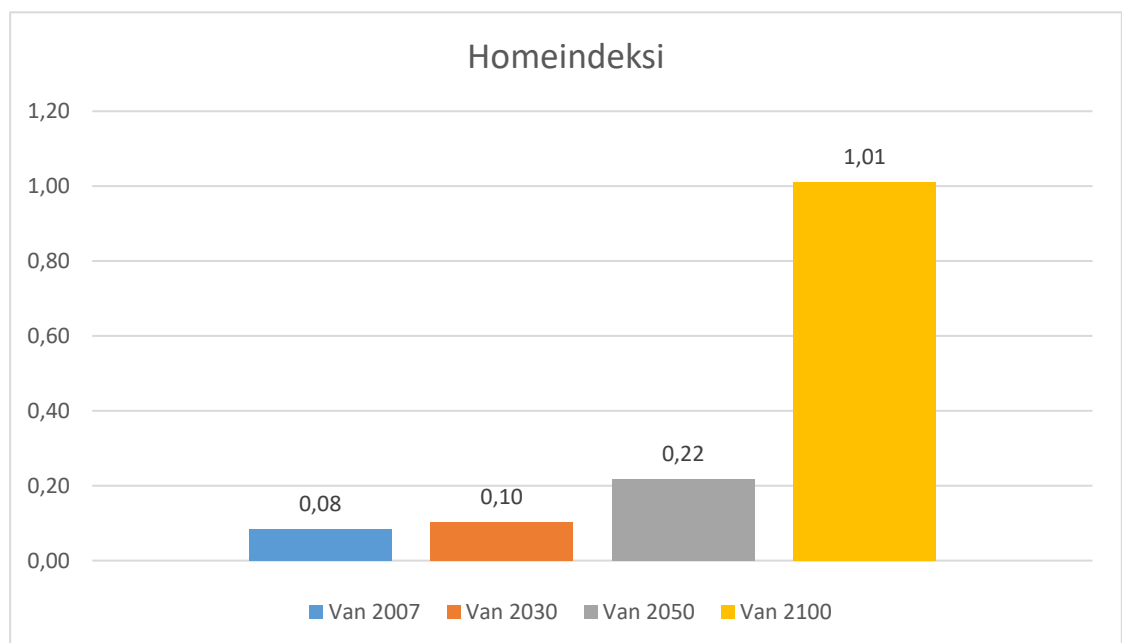
Grafiikasta on nähtävissä lämpötilankasvu tuulensuojakerroksessa tulevaisuudessa. Samalla on nähtävissä edellytyksiä kohoavalle homeindeksille alälämpötilan suhteen, kun kuukausittaiset lämpötilat kasvavat. Grafiikkaan katkovivulla merkityn alälämpötilan jälkeen katsotaan mahdollisen homeenkasvun taantuvan. Ratkaisevaa on taantumakuukausien merkittävä väheneminen vuosien 2007 ja 2100 välillä.

Homeindeksin kehitys on suhteessa rakennusaineessa vallitsevaan suhteelliseen kosteuteen. Ilman rakennusaineen huokosiin varastoitunutta riittävää kosteutta ei voi mikrobikasvustoa ilmentyä. Kosteutta mitattiin suhteellisen kosteuden funktiona materiaalissa sijaitsevassa monitorointipisteessä. Monitorointipiste ilmoittaa suhteellisen kosteuden kehittymisen muuttuvissa olosuhteissa tunnin välein. Näistä arvoista laskettiin kuukausittaiset suhteellisen kosteuden keskiarvot, jotka on esitetty kuvassa 16.



Kuva 16. Matalaenergiarakenteen tuulensuojakerroksessa mitatut kuukausittaiset keskimääräiset suhteelliset kosteudet Vantaan säätapauksissa (Kärkäs 2020)

Grafiikasta huomataan, että huhtikuun ja heinäkuun aikana ei ole edes edellytyksiä mahdolliselle kasvuille. Suhteellinen kosteus pysyy melko samana monitorointipisteessä. Merkittäviä muutoksia ei tapahdu kuin lämpötilan suhteen. Johtopäätöksiä voidaan vetää, että lämpötila muuttuu määrävämmäksi tässä tapauksessa homeindeksin kehittymisen suhteen. Kuvassa on 17 on esitetty homeindeksin kehittymistä tuulensuojakerroksessa matalaenergiarakenteessa.

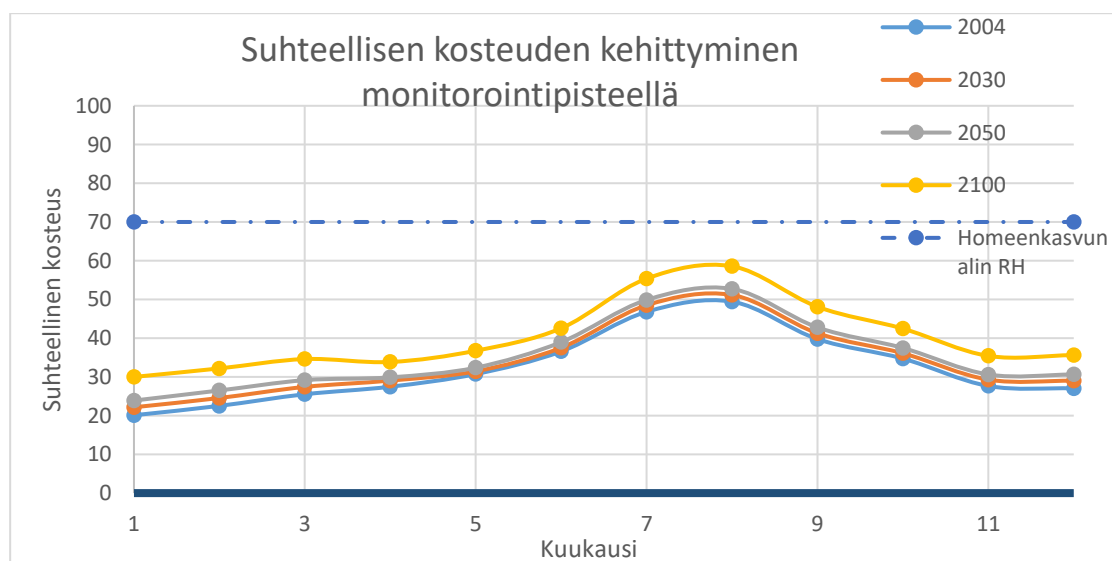


Kuva 17. Homeindeksin kehittyminen nyky- sekä tulevaisuuden ilmastossa tuulensuojakerroksessa.

Homeindeksin kannalta vaikuttavampaa on keskilämpötilan nousu kuin suhteellisen kosteuden määrä ilmassa. Vertailua suorittaessa lämpötilakehitykselle Vantaan 2007 ja 2100 luvun välille, huomataan taantumakuukausien voimakas vähentyminen. Vuonna 2007 tiedostossa homeen kasvun taantumakuukausia olivat marraskuu-helmikuu, kun vuonna 2100 säädatan perusteella taantumakuukausia olisi vain helmikuu. Tämä näkyy homeindeksin kehityksessä.

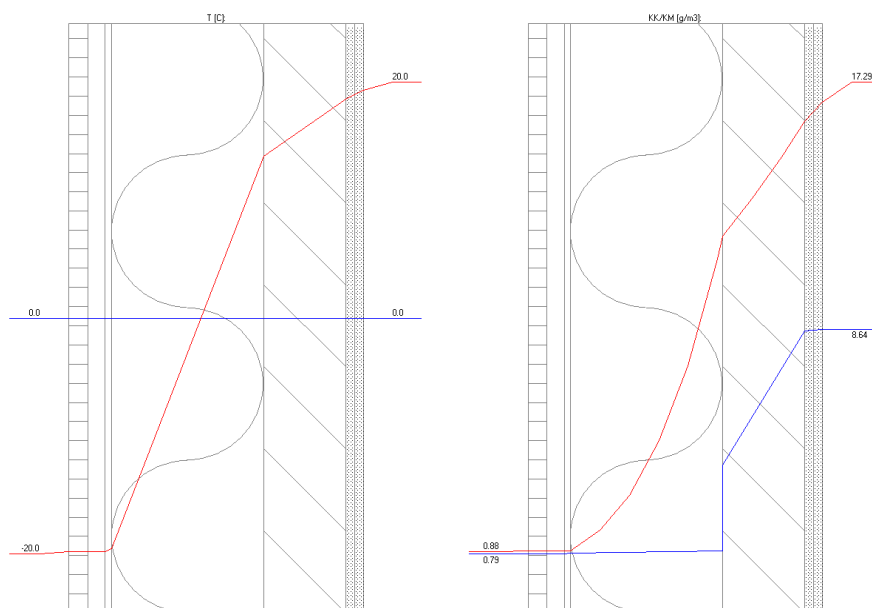
Homeindeksi-arvot ovat tuulensuojakerroksessa joka tapauksessa matalia. Materiaali on tekemisissä kostean ilman kanssa, joten olosuhteisiin ei voida homeindeksin kannalta vaikuttaa. Merkitseväksi nousee tällöin materiaali-kohtaiset ominaisuudet homeen kasvun osalta, kuten homeen maksimimäärän määräävät herkkyysluokat sekä taantumaluokat.

Muita kohonneita homeindeksin arvoja nähtiin mineraalivillakerroksen ulkopinnassa sekä CLT-levyn keskellä. Arvot ovat kuitenkin niin pieniä, että ovat vailla merkitystä. Matalaenergiarakenteen tapauksissa suurimmat homeindeksin arvot olivat nähtävissä Vantaan olosuhteilla. Muutoinkin CLT-levyn sisäosassa, kipsilevykerroksessa ja mineraalivillakerroksen sisä- sekä keskiosassa ei havaittu kohonneita homeindeksi-arvoja kummankaan paikkakunnan olosuhteissa. Tämä selittyy sillä, etteivät olosuhteet mikrobikasvuston mahdolliselle kasvun alkamiselle olleet suotuisat aineessa mitatun suhteellisen kosteuden puolesta. Kuvassa 18 on esitetty kosteuden kehitys mineraalivillakerroksessa.



Kuva 18. Suhteellisen kosteuden kehittyminen mineraalivillakerroksen sisäosassa Jokioisissa (Kärkäs 2020)

6.2 CLT-rakenne



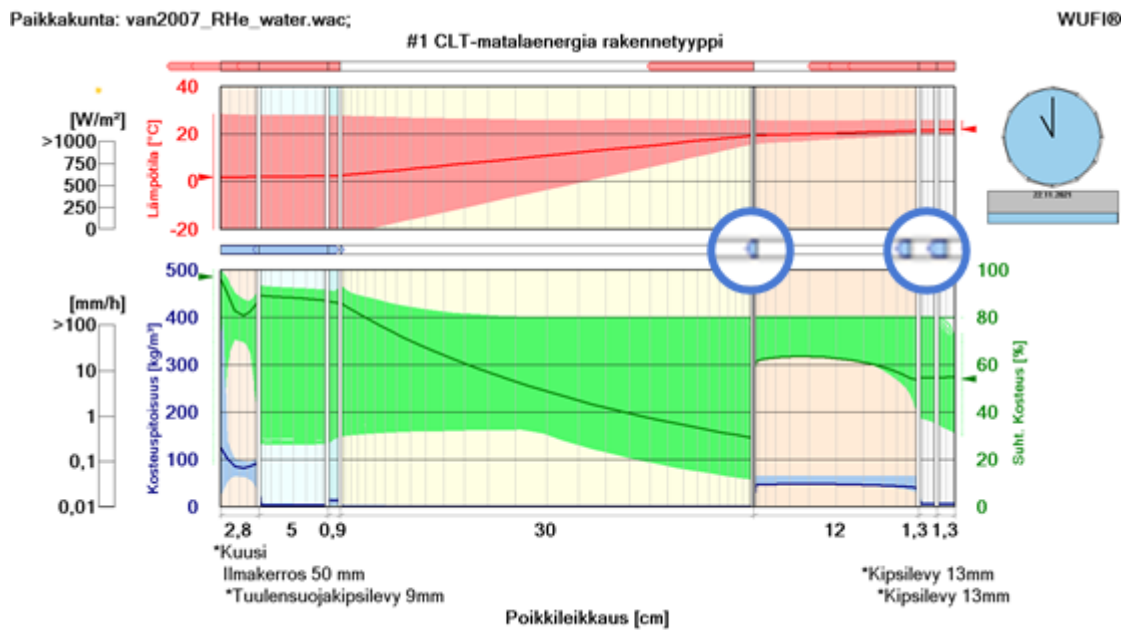
Kuva 19. CLT-rakenteen simulointi DOF-lämmöllä (Kärkäs 2020)

CLT-rakenne toimii samalla tavalla kuin matalaenergiarakenne, kun rakennetta tarkastellaan stationääritilassa (ks. kuva 19). Rakenteeseen muodostuu diffuusiopato ennen tuulensuojakerrosta. Diffuusiopato on tässäkin tapauksessa välttämätön. Rakenteen voidaan todeta toimivan stationäärisessä vuoden kolmen päivän kylmin tarkastelussa.

Rakenteelle tehtiin homeindeksitarkastelua monitorointipisteittäin Vantaan ja Jokioisen ilmasto-oloissa. Monitorointipisteistä ei suuria arvoja löytynyt homeindeksin osalta.

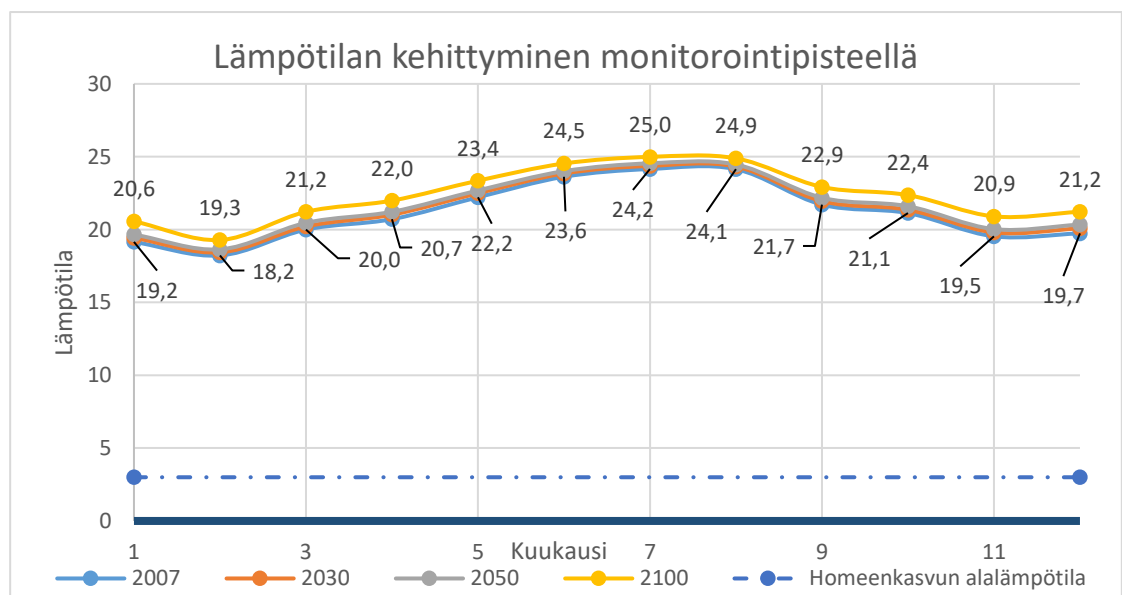
Kun tarkastellaan CLT-levyä, huomataan suurimmat homeindeksinarvot keskellä levyä. Molemmissa CLT-rakenteissa ilmenee sama tapaus. Tapauksen taustalla on sisätilassa noussut sisäilman suhteellisen kosteuden pitoisuus. Kosteus tasaantuu kipsilevykerrosten läpi aina CLT-levyyn asti, mutta CLT-levyn voimakkaan hygroskooppisuuden ja kuormituksen hetkellisyyden takia kosteus etenee levyssä puoleen väliin asti. Vastaavasti CLT-levyn keskeltä kuivumiskyky sisäilmaan kohti on hitaampaa, koska se edellyttää levyä edeltävissä kipsilevykerroksissa on kosteutta haihtunut sisäilmaan. CLT-levyn ulkopinnan

alempi homeindeksiarvo selitty materiaalin erittäin hitaalla, mutta jatkuvalla kuivamisprosessilla höyrynsulun läpi (ks. kuva 20).



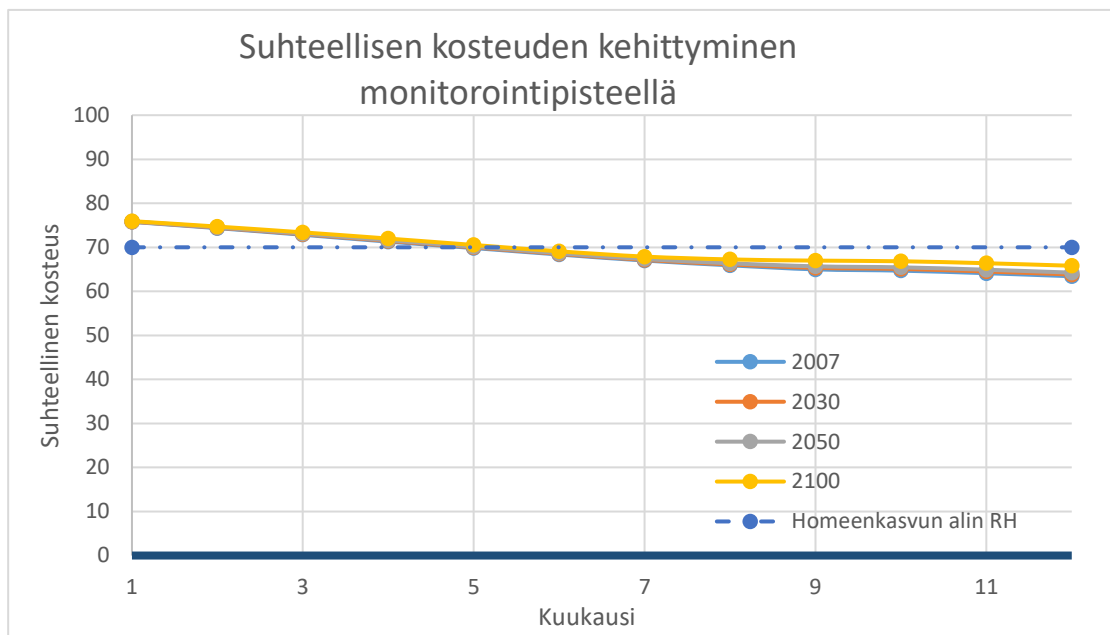
Kuva 20. Wufi:sta ja rakenteiden kosteuden kuljettumisen mallintamisesta (Kärkäs 2020)

CLT-levyn ja lämmöneristekerroksen välissä on korostettavasti esitetty kosteuden kuljettumista diffuusion avulla CLT-kerroksesta lämmöneristekerrokseen. Kosteuden hidas tasaantuminen höyrynsulkukerroksen läpi on jatkuvaa, johdun materiaalien kosteuspitoisuuksien eroista. CLT-levyn keskellä kohonnut homeindeksi selitty pitkäaikaisilla ja suotuisilla olosuhteilla.



Kuva 19. CLT-rakenteen lämpötila olosuhteet CLT-levyn keskellä Vantaan tapauksissa (kärkäs 2020)

Lämpötila luo suotuisat olosuhteet homeindeksin kasvulle, joka on rakenteen kerroksissa välttämätöntä. Vältettävää olisi rakennusaikaisen kosteuden joutuminen rakenteen CLT-kerrokseen esimerkiksi rakentamalla sääsuojan alla. Kuvassa 21 on esitetty mahdollisen rakennusaikaisen kosteuden kuivamista diffuusion avulla ajan funktiona.



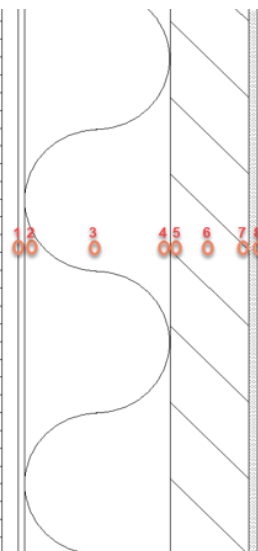
Kuva 21. CLT-rakenteen CLT-kerroksessa mitatut suhteellisen kosteuden määrät (Kärkäs 2020)

Molemmissa CLT-rakenteiden tapauksissa näkyy CLT-kerroksen erittäin hidas kuivuminen rakennusaikaisen kosteuden kannalta. Korkea kosteuspitoisuus näkyy myös kohonneessa homeindeksin arvossa. Kosteuden tasaantumista rakenteessa voisi helpottaa käyttämällä sisäverhousmateriaalina hygroskooppisempaa tai vesihöyryäläpäisevämpää tuotetta kuin kipsilevy tai höyrynsulun sijasta ilmansulkupaperia. Hidas kuivumiskyky näkyy homeindeksin arvossa kuvassa 22. Uudet laskelmat tulisi tehdä rakenteen toimivuudesta ilmansulkupaperin kanssa.

CLT-rakenne

	Van 2007	Van 2030	Van 2050	Van 2100	Ainekerros	C _{mat}	HHL
Monitorointipiste 1	0,068	0,115	0,117	0,822	Tuulensuojakipsi	0,25	2
Monitorointipiste 2	0,006	0,007	0,007	0,053	Mineraalivilla, ulko	0,1	3
Monitorointipiste 3	0	0	0	0	Mineraalivilla, kesk	0,1	3
Monitorointipiste 4	0	0	0	0	Mineraalivilla, sisä	0,1	3
Monitorointipiste 5	0,003	0,003	0,003	0,004	CLT-levy, ulko	0,5	2
Monitorointipiste 6	0,023	0,024	0,026	0,031	CLT-levy, kesk	0,5	2
Monitorointipiste 7	0,001	0,001	0,001	0,001	CLT-levy, sisä	0,5	2
Monitorointipiste 8	0	0	0	0	Kipsilevy, ulko	0,25	2

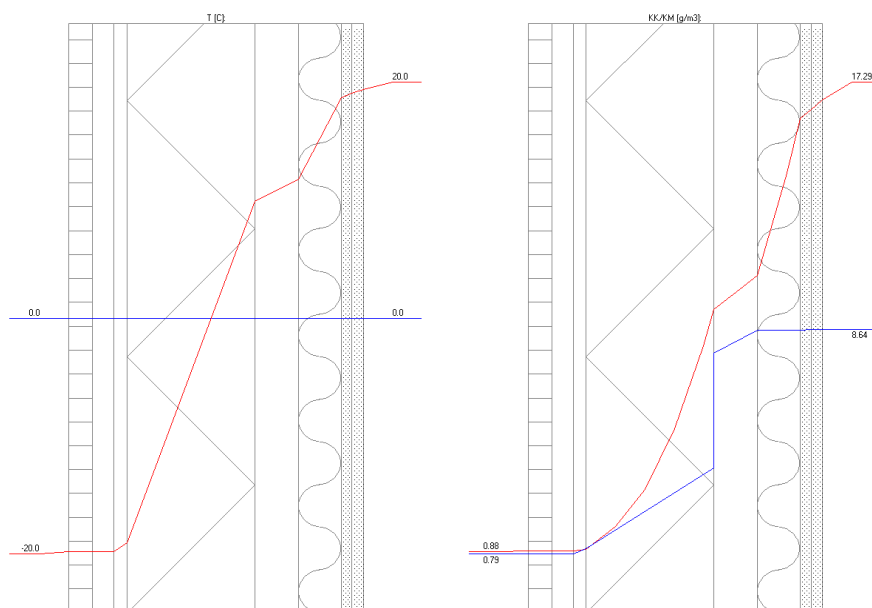
	Jok 2004	Jok 2030	Jok 2050	Jok 2100	Ainekerros	C _{mat}	HHL
Monitorointipiste 1	0,054	0,068	0,077	0,533	Tuulensuojakipsi	0,25	2
Monitorointipiste 2	0,002	0,002	0,003	0,018	Mineraalivilla, ulko	0,1	3
Monitorointipiste 3	0	0	0	0	Mineraalivilla, kesk	0,1	3
Monitorointipiste 4	0	0	0	0	Mineraalivilla, sisä	0,1	3
Monitorointipiste 5	0,003	0,003	0,003	0,003	CLT-levy, ulko	0,5	2
Monitorointipiste 6	0,016	0,019	0,020	0,026	CLT-levy, kesk	0,5	2
Monitorointipiste 7	0	0	0	0	CLT-levy, sisä	0,5	2
Monitorointipiste 8	0	0	0	0	Kipsilevy, ulko	0,25	2



Kuva 22. Homeindeksiarvot monitorointipisteittäin CLT-rakenteessa Jokioisen ja Vantaan ilmastossa (Kärkäs 2020)

CLT-rakenteille vertailua tehtäessä huomataan rakenteessa pienemmät homeindeksiarvot kuin matalaenergiarakenteessa. Matalammat homeindeksiluvut selittyvät rakenteen lämmöneristekerroksen ollessa ohuempi kuin matalaenergiarakenteessa. Oleellista on huomata näiden rakenteiden välille ero, että vastus rakenteen kuivumiskyvylle suurenee mitä enemmän rakenteessa lämmöneristeen määrä kasvaa, joka tarkoittaa myös sitä, että ainekerroksen huokosiin varastoituu hetkellisesti enemmän kosteutta.

6.3 Höyrynsulullinen LVL-ratkaisu



Kuva 23. DOF-lämmöllä simuloitu höyrynsulullinen LVL-rakenne

Rakennetta DOF-lämmöllä tarkasteltaessa rakenteeseen muodostuu kastepiste kolmannen päivän kylmimmässä lämpötilatarkastelussa (ks. kuva 23). Kastepiste muodostuu eristekerroksen loppupäähän. Stationäärisessä tarkastelutavassa eristekerrokseen muodostuu kastepiste, koska tuulensuojalevynä käytetty OSB-levy muodostaa diffuusiopadon eristekerrokseen. Käytännössä OSB-levy kerros vastustaa höyrymäisen veden liikettä niin paljon, että se tulisi korvata vesihöyrynliikettä paremmin läpäisevällä materiaalilla esimerkiksi tuulensuojakipsilevyllä.

Mitä paremmin tuulensuojakerros läpäisisi höyrymäisen veden liikettä, sitä varmempi rakenne olisi stationäärisessä tarkastelussa. Jos tuulensuojakerroksen vesihöyrynvastusta haluttaisiin nostaa jostain syystä, kastepiste siirtyisi syvemmälle rakenteeseen. Lämmöneristekerroksen diffuusiovastuksella ei ole tähän kastepisteeseen suurta vaikutusta. Stationäärisestä tarkastelutavasta on huomattavissa, miten kastepisteriski korreloi homeindeksitarkastelun kanssa rakennekerroksissa verrattain muihin tuloksiin. Homeindeksitulokset ovat esitelty kuvassa 24 kahden eri paikkakunnan sääaineistolla.

Höyrinsulullinen LVL-rakenne

	Van 2007	Van 2030	Van 2050	Van 2100	Ainekerros	C_{mat}	HHL
Monitorointipiste 1	0,02	0,024	0,038	0,473	OSB-levy	0,25	2
Monitorointipiste 2	0,002	0,003	0,007	0,130	PU-eriste, ulko	0,25	2
Monitorointipiste 3	0	0	0	0	PU-eriste, kesk	0,25	2
Monitorointipiste 4	0	0	0	0	PU-eriste, sisä	0,25	2
Monitorointipiste 5	0,003	0,003	0,004	0,004	LVL-levy, ulko	0,25	2
Monitorointipiste 6	0,005	0,005	0,006	0,009	LVL-levy, sisä	0,25	2
Monitorointipiste 7	0	0	0	0	Mineraalivilla, ulko	0,1	3
Monitorointipiste 8	0	0	0	0	Mineraalivilla, sisä	0,1	3
Monitorointipiste 9	0	0	0	0	Kipsilevy, ulko	0,25	2

	Jok 2004	Jok 2030	Jok 2050	Jok 2100	Ainekerros	C_{mat}	HHL
Monitorointipiste 1	0,036	0,05	0,057	0,212	OSB-levy	0,25	2
Monitorointipiste 2	0,020	0,026	0,035	0,123	PU-eriste, ulko	0,25	2
Monitorointipiste 3	0	0	0	0	PU-eriste, kesk	0,25	2
Monitorointipiste 4	0	0	0	0	PU-eriste, sisä	0,25	2
Monitorointipiste 5	0,002	0,002	0,001	0,001	LVL-levy, ulko	0,25	2
Monitorointipiste 6	0,002	0,002	0,001	0,002	LVL-levy, sisä	0,25	2
Monitorointipiste 7	0	0	0	0	Mineraalivilla, ulko	0,1	3
Monitorointipiste 8	0	0	0	0	Mineraalivilla, sisä	0,1	3
Monitorointipiste 9	0	0	0	0	Kipsilevy, ulko	0,25	2

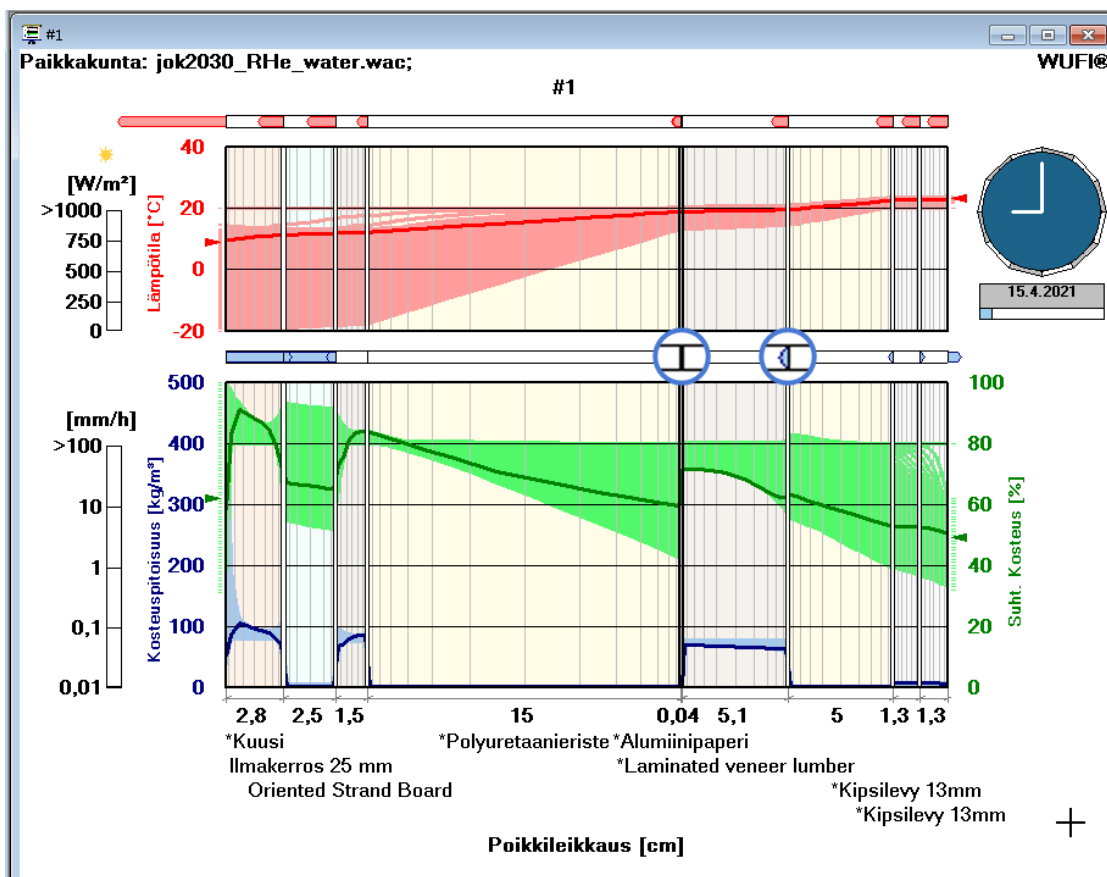
Kuva 24. Homeindeksi-arvot eri ilmastoissa höyrinsulullisessa LVL-rakenteessa (Kärkäs 2020)

Lämmöneristekerroksen ulkopäässä arvot jäävät mataliksi, koska homeindeksille suotuisien olosuhteiden ajanjaksot ovat lyhyitä. Myös käytettävät materiaalit ovat sellaisia, että eivät ole homeenkasvulle tai taantumalle heikoimmasta päästä.

Aiemmin mainitussa Srisgantharajahin ja Ullahin diplomityössä (2015, 87) todettiin CLT-levyssä olevan samat ominaisuudet pitkälti kuin puulla, mutta samalla todettiin liimakerrosten hidastavan materiaalin desorptiota. LVL-levyssä liimakerroksia on enemmän, koska viilujakin on paljon tiheämmin kuin ristiinliimattuja puukerroksia CLT-levyssä.

Tiiviitä tuulensuojalevyjä kuten vaneri, OSB-levy tai kovalevy ei suositella käytettävän yksinään. Jos levyjä halutaan käyttää jäykistystarkoituksessa, on suositeltavaa niille käytettävän ulkopuolista lämmöneristystä, joka voisi tässä tapauksessa olla tuulensuojavillakerros. Käytettävyyttä perustellaan myös siten, että lämmöneristeenä käytettävän materiaalin diffuusiovastuslukua pitäisi nostaa suhteessa tuulensuojakerroksen diffuusiovastuslukuun. Edellä mainittujen tuotteiden käyttöä tuulensuojakerroksissa perustellaan Vinhan ym. (2008, 48) tutkimuksissa matalaenergiarakenteiden toimivuudesta.

PU-eristekerroksessa homeindeksinarvot jäävät pieneksi, joka selittyy materiaalikerroksen diffuusiovastusluvulla. Suuren diffuusiovastusluvun takia kerros on vähemmän alttiimpi lyhytaikaisille kosteudenmuutoksille rakenteen ympärillä. Seinärakenteen kosteusteknistä toimintaa kuvataan laskentaohjelmassa-filmistä otetussa kuvassa 25.

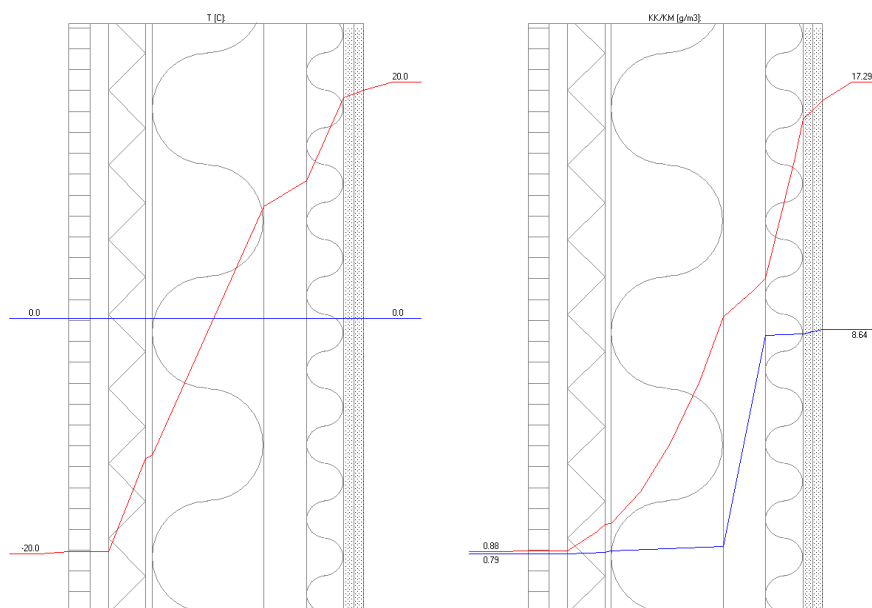


Kuva 25. WUFI-laskentaohjelman filmistä kosteudenliikkeet korostettuina (Kärkäs 2020)

WUFI-laskentaohjelman filmistä on nähtävissä myös LVL-levyn heikko kuivumiskyky. Heikko kuivumiskyky johtuu höyrinsulkukerroksen diffuusioatkosta, jolloin LVL-levy ei kuiva ulospäin ja siitä että sisäpuolella on heikosti hygroskooppinen mineraalivilla. Tämä tarkoittaa sitä, että koolauskerros, jossa käytetään mineraalivillaa eristeenä, tasaa erittäin heikosti kosteutta.

Rakenteessa voidaan pitää veden kondensoitumisriskiä suurempana kuin homeutumiseriskiä, koska tuulensuojamateriaalina käytetty OSB-levyn vesihöyrystävä vastus on niin suuri, että se estää kosteuden tasaantumista rakenteen läpi.

6.4 Höyrinsuluton LVL-rakenne



Kuva 26. Höyrinsuluttoman LVL-rakenteen simulointi DOF-lämmöllä (Kärkäs 2020)

Stationäärisessä tarkastelussa rakenne käyttäytyy riskeittä kosteuden kondensoitumisen suhteen (ks. kuva 26). Riskitön rakenne kondensoitumisen suhteen perustuu eri materiaalikerrosten kykyyn läpäistä vesihöyryä hyvin. Ilmansulkukerroksen voidaan tässä tapauksessa katsota alkavan LVL-kerroksesta. Ilmansulkukerroksesta ulospäin olevien materiaalien diffuusiovastusluvut ovat matalia. LVL-kerros toimii tässä tapauksessa myös osittain höyrinsulkuna, koska sen diffuusiovastusluku on suhteessa muihin käytettäviin materiaaleihin suuri. Kosteus pääsee tasaantumaan rakennekerrosten läpi.

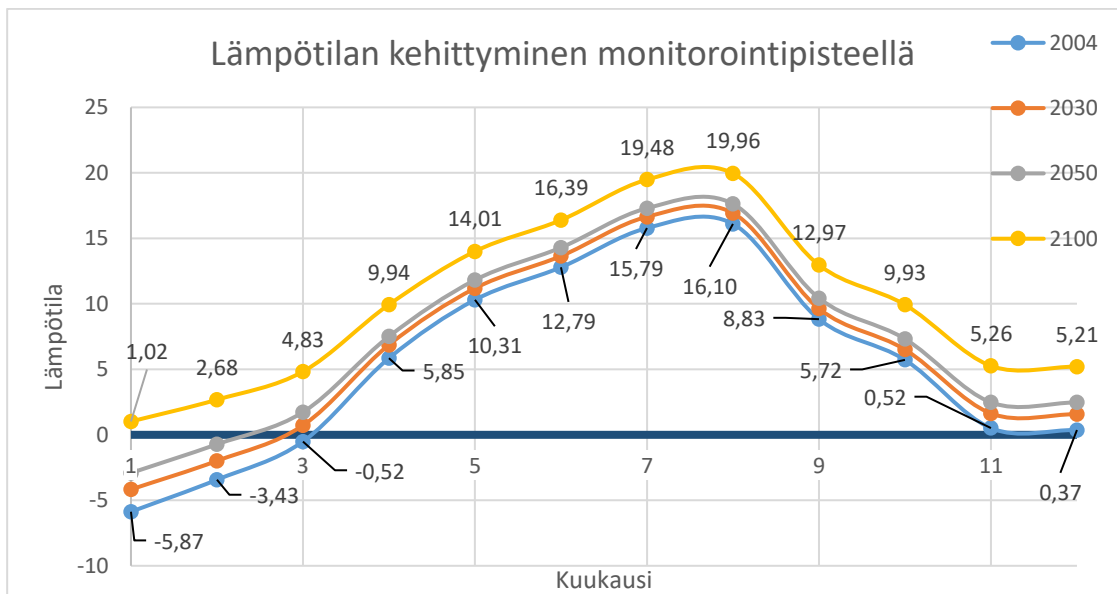
Rakenteen vesihöyrynläpäisevyys tarjoaa mikrobikasvustolle suotuisat olosuhteet, kun kosteuspitoisuudet rakennekerroksissa ovat suuret. Korkeista homeindeksiarvoista huomataan rakenteen alttiuden muuttuville sisä- sekä ulkoilmaolosuhteille. Alttiuden höyrinsuluttomalle rakenteelle luo höyrinsulun puutteellisuus, joka tässä tapauksessa toimisi diffuusiosulkuna sisä- sekä ulkoilmastolle. Rakenteen homeindeksiarvot ovat esitelty kuvassa 27.

Höyrynsuluton LVL-rakenne							
	Van 2007	Van 2030	Van 2050	Van 2100	Ainekerros	C_{mat}	HHL
Monitorointipiste 1	1,035	0,919	0,999	1,685	Tuulensuojavilla	0,25	2
Monitorointipiste 2	0,047	0,049	0,06	0,089	Tuulensuojakipsi	0,25	2
Monitorointipiste 3	0	0	0	0	Mineraalivilla, ulko	0,1	3
Monitorointipiste 4	0	0	0	0	Mineraalivilla, kesk	0,1	3
Monitorointipiste 5	0	0	0	0	Mineraalivilla, sisä	0,1	3
Monitorointipiste 6	0	0	0	0	LVL-levy, sisä	0,25	2
Monitorointipiste 7	0	0	0	0,001	Mineraalivilla, sisä	0,1	3
Monitorointipiste 8	0	0	0	0	Kipsilevy, ulko	0,25	2

	Jok 2004	Jok 2030	Jok 2050	Jok 2100	Ainekerros	C_{mat}	HHL
Monitorointipiste 1	0,81	0,889	1,18	1,903	Tuulensuojavilla	0,25	2
Monitorointipiste 2	0,029	0,033	0,037	0,046	Tuulensuojakipsi	0,25	2
Monitorointipiste 3	0	0	0	0	Mineraalivilla, ulko	0,1	3
Monitorointipiste 4	0	0	0	0	Mineraalivilla, kesk	0,1	3
Monitorointipiste 5	0	0	0	0	Mineraalivilla, sisä	0,1	3
Monitorointipiste 6	0	0	0	0	LVL-levy, sisä	0,25	2
Monitorointipiste 7	0	0	0	0	Mineraalivilla, sisä	0,1	3
Monitorointipiste 8	0	0	0	0,001	Kipsilevy, ulko	0,25	2

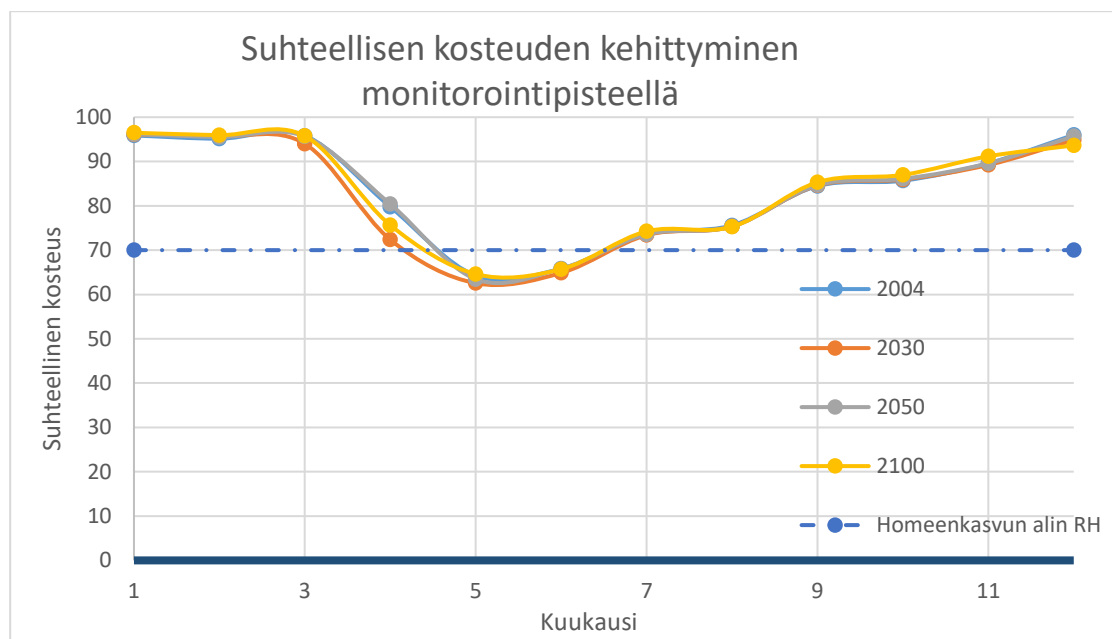
Kuva 27. Homeindeksi-arvot höyrynsuluttomassa LVL-rakenteessa (Kärkäs 2020)

Homeindeksi-arvot nousevat tuulensuojakerroksissa korkeiksi. Vantaan arvot ovat tässä tapauksessa matalampia kuin Jokioisten arvot. Tässä tapauksessa, kun rakenne on kosteutta helposti läpäisevä, tulee määräävämmäksi ilman suhteellisen kosteuden pitoisuus kuin viistosateen määrä.



Kuva 28. Tuulensuojavillakerroksen kuukausittaiset keskiarvot lämpötilan suhteen höyrynsuluttomassa LVL-rakenteessa Jokioisissa.

Kuvasta 28 näkee tuulensuojakerroksessa vuosien 2004–2100 taantumavuosien voimakas väheneminen, joka selittää kaikissa tapauksissa homeindeksin noususuhdanteen rakenteessa. Kuten edellä on huomattu, lämpötila ei yksinään kehittä suotuisia olosuhteita homeenkasvulle.



Kuva 28. Höyrinsuluttomassa rakenteessa mitatut suhteellisen kosteuden pitoisuudet tuulensuojavillakerroksessa Jokioisissa.

Ratkaisevaa on korkeat kosteuspitoisuudet tuulensuojavillakerroksessa, jotka nostavat homeindeksinarvoa korkealle kuvan 28 mukaisesti. Höyrinsuluttomissa rakennetapauksissa tämä on haaste, kun sisä- sekä ulkokosteus pääsee tasaantumaan koko rakenteen läpi. Tämän vuoksi uudet laskelmat tulisi tehdä tässä rakenteessa ilman- tai höyrinsulkukerrokselle. Höyrinsulku estäisi tässäkin tapauksessa sisäilmaa tasaantumasta rakennekerrokseen, joka sisältää haitallisen määrän kosteutta.

Tässä rakenteessa huomataan, että LVL-levy, joka omaa korkean diffuusiovastusluvun muuhun rakenteeseen verrattuna ei ole tarpeeksi höyrytiivis ajamaan höyrinsulkumuovin osuutta rakenteessa. Rakenne toimii stationäärisessä tarkastelussa hyvin, koska on riittävän diffuusioavoin tasaamaan kosteutta rakenteen läpi. Stationäärisessä tarkastelussa rakenne ei muodosta kastepistettä, joka on peruste rakenteen käytettävyydelle. Määräävämmäksi tulee korkeat kosteuspitoisuudet, joka luo edellytyksiä mikrobikasvustolle. Rakenteen toimivuutta tulisi tutkia höyrinsulkukerroksen kanssa.

7 TULOKSIEN YHTEENVETO

CLT-matalaenergiarakenteen voidaan todeta toimivan hyvin stationäärisessä- ja epästationäärisessä tarkastelussa. Rakenne ei kehitä kastepistettä stationäärisessä tarkastelussa, joka on yksi käytettävyyden perusteesta. Rakenne ei myöskään nostata haitallisen korkeita kosteuspitaisuuksia muuta kuin lämmöneristekerroksen ulkoilman puoleiselle sivulle ja tuulensuojakerrokseen, jotka ovat pitkälti välttämättömiä. Arvot ovat 2050-luvun ennustettuun ilmasto-parametreihin asti matalia. Myös molemmissa tapauksissa rakennusaikaisen kosteuden on mahdollista kuivaa rakenteesta pois tarkastelussa, jossa ei huomioida pintaverhouslevyn käsittelyn rajoittavan kuivaamista.

CLT-rakenteen stationäärisessä tarkastelussa rakenne ei muodosta kastepistettä. CLT-rakenteen voidaan todeta toimivan paremmin kuin matalaenergiarakenne, kun tarkastellaan homeindeksiarvoja. Rakenteessa on selkeästi matalalemmat homeindeksiarvot, joka tarkoittaa sitä, että rakenteessa esiintyy vähemmissä määrin kosteutta. Paksumman eristekerroksen voidaan katsota varaavan enemmän kosteutta ja lisäävän vastusta kuivamiselle. Simuloitaessa käytetty paksumpi hyvin tuulettuva tuuletusrakokaan ei luo merkittävää vaikutusta asiaan. Joka tapauksessa kummassakaan rakenteessa ei ole korkeita homeindeksiarvoja ja sitä kautta haitallisissa määrin kosteutta.

Höyrynsulullinen LVL-rakenne muodostaa stationäärisessä tarkastelussa kastepisteen lämmöneristekerroksen sisään. Kastepisteen muodostus seinärakenteen sisään johtuu tuulensuojakerroksessa käytettävästä OSB-levystä ja sen korkeasta vesihöyrynvastuskapasiteetista. OSB-levyn käyttöä tulisi harkita tarkoin, koska tuulensuojakerroksen pitäisi olla vesihöyryä helposti läpäisevää. Tuulensuojakerroksen tulee hetkellisesti kestää ulkoilman vaikutuksiakin, mikäli rakennus on ilman ulkoverhousta rakennusvaiheessa.

Höyrynsuluttoman LVL-ratkaisun käyttöä ei voi tämän opinnäytetyön perusteella suositella käytettäväksi. Rakenteita tarkasteltaessa DOF-lämmöllä rakenne toimisi stationäärinen tarkastelun perusteella, koska rakenne ei muodosta kastepistettä seinärakenteeseen. Homeindeksiarvoja tarkasteltaessa

epästationäärisissä olosuhteissa huomataan korkeat homeindeksi-arvot tuulensuojavillakerroksessa. Rakenteessa tulisi käyttää höyrynsulkukerrosta, ja tehdä uudet tarkastelut höyrynsululliselle rakenteelle.

CLT-levyn käytön uskotaan lisääntyvän rakentamisen ohjautuessa hiilineutraalimpaan suuntaan. CLT-levy on kuitenkin haastava mallintaa rakennusfysikaalisiin ohjelmiin, koska materiaali on epähomogeeninen. Pelkästään epähomogeenisuus ei tee rakennustuotteesta haasteellista mallintaa, vaan tuotteen sisältämät liimakerrokset, raaka-aineen kasvu ja joka lautakerroksessa syiden erisuuntaisuus. CLT-levyn materiaalmääritys on haastavaa niin stationäärisissä laskentaohjelmissa kuin epästationäärisissäkin. Aihetta tuotteen lisätutkimukselle on rakennusfysikaalisilta toimivuudeltaan, koska varmuutta levyn sorptiokäyttäytymisestä ei ole. Sorptiotoiminnasta haastavan tekee liimakerrosten vaikuttavuuden desorptioon.

LVL-levyn käyttö runkoratkaisuissa ei ole vielä yleistynyt Suomessa samaan tapaan kuin CLT-levyn käyttö. LVL-levy sisältää liimakerroksia enemmän kuin CLT-levy aiempaan toteamukseen viitaten. Tässäkin tapauksessa olisi aiheellista tutkia liimakerrosten vaikuttavuutta desorptioon, tai miten materiaalin ilman- sekä vesihöyrynvastusominaisuudet muuttuvat, kun materiaalissa kosteuspitoisuus kasvaa.

Opinnäytetyössä käytettyjä rakennusfysikaalisia laskentaohjelmia pitäisi käyttää kohteissa samanaikaisesti. Tällöin seinärakenteen kosteusteknisestä toimivuudesta muodostuu mahdollisimman kokonaisvaltainen käsitys. Esimerkiksi DOF-lämmöllä saataisiin rakenteesta kriittisin kohta, johon voisi kondensoitua kosteutta tai onko sellainen edes mahdollista kriittisimmässä olosuhteissa. WUFI-laskentaohjelmalla saataisiin käsitys sekä seinärakenteiden toimivuudesta, että eri valmistajien rakennusmateriaalien yhteensovituksesta pidemmällä ajanjaksolla muuttuvissa olosuhteissa.

Homeindeksitarkastelu on analysointimenetelmä, joka ansaitsee huomiota. Menetelmä parantaa WUFI-laskentaohjelman tuloksien luettavuutta, kun monitorointipisteiden tunneittaiset laskenta-arvot ovat vietävissä Excel-pohjaiseen ho-

meindeksitaulukkoon. Homeindeksitaulukko antaa tuloksen mahdolliselle mikrobikasvuston kasvamiselle. Homeindeksimenetelmä antaa vastauksen oleellisiin kysymyksiin, onko rakenteessa mahdollista ilmentyä mikrobikasvustoa tai ovatko rakenteessa esiintyvät kosteuspiitoisuudet haitallisia.

8 JATKOTUTKIMUKSEN TARVE

Homeindeksi- ja epästationäärinen laskentaohjelmien tarkastelutavan uskotaan yleistyvän, kun materiaalitietämys materiaalien hygrotermisistä ominaisuuksista laboratoriotestein kasvaa.

Jatkotutkimusta voisi tehdä esimerkiksi minkälaisella sisäverhousmateriaalilla CLT-levy voitaisiin päällystää tai millä sisäverhouslevyn voisi maalata, jotta rakennusaikainen kosteus pääsisi rakenteesta ulos. Lisätutkimuksen kohde voisi olla CLT-levyn käytöstä ulkoseinärakenteista sekä toimivuudesta, jossa on sisätilassa sauna. Simulaatioin voisi tarkastella massiivipuurunkoisten rakenteiden toimivuutta ilman erillistä höyrynsulkukerrosta.

Tarpeellista olisi tutkia, että voitaisiinko esimerkiksi nykyisin käytetyt polyuretaanipohjaiset ja haitallisia formaldehydejä sisältävät liimat korvata ligniinipohjaisilla liimoilla. Ligniini on puun raaka-aine, jota puu sisältää 30–40 %. Ligniini toimii puussa kuin liimana, sitomalla puussa puun kuidut yhteen. Aiemmin ligniiniä pidettiin puun hukka-aineena, ja sen käytettävyys liimoissa on huomattu myöhemmin (Wikberg & Leppävuori 2017). Ligniinipohjainen liima voisi tehdä CLT-levystä rakennusfysikaalisesti homogeenisempää, kun liimakerros on puun tuottamaa omaa raaka-ainetta, mikäli käytettävyys laboratoriotestein todettaisiin.

Liimavalmistajan sekä muiden tutkijoiden tekemissä tutkimuksissa on näkemuseroja vertailtuna järjestöjen julkaisuihin, jotka toimivat puun käytön puolesta puhujana. Näkemuserot koskevat liimasauman toimivuudesta osana CLT-levyä.

Rakenteissa sisäpintojen ja rungon väliin olisi useimmissa tapauksissa järkevää rakentaa koolaus. Koolaus mahdollistaisi LVIS-varusteiden, kuten putkien ja johtojen tuonnin niin, että CLT-levyn pintaa ei tarvitsisi erikseen rei'ittää. Lisäreiät tekisivät rakenteen riskialttiimmaksi haitallisille ilmavirtauksille.

LÄHTEET

Björkholtz, D. 1987. Lämpö ja kosteus: Rakennusfysiikka. 1. p. Helsinki: Rakennustieto.

Björkholtz, D. 1997. Lämpö ja kosteus: Rakennusfysiikka. 2. p. Helsinki: Rakennustieto.

D.O.F.tech Oy:n internetsivut. s.a. WWW-Dokumentti. Saatavissa: <http://dof-laskentapalvelut.fi/www/> [viitattu 5.11.2020]

Energiatehokaskoti internetsivut. s.a. WWW-Dokumentti. Päivitetty [17.3.2020]. Saatavissa: https://www.energiatehokaskoti.fi/perustieto/hyva_tietaa/suuntaa-antavia_ohjearvoja. [viitattu 18.12.2020]

Frame loppuraportti. 2013. Tampereen teknillinen yliopisto. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/rakentamisen-kehittaminen/frame-loppuraportti.pdf> [viitattu 12.11.2020]

Hagentoft, C. & Sandin, K. 2017. Byggnadsfysik: Så fungerar hus. Upplaga 1:1. Lund: Studentlitteratur.

Hens, H. 2016. Applied building physics: Ambient conditions, building performance and material properties. Second edition. Berlin: Ernst & Sohn.

Heljo, J. & Vinha, J. 2014. Rakennusfysiikka: 1, Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörin liitto.

Kukk, V., Horta, R., Püssa, M., Luciani, G., Kallakas, H., Kalamees, T., & Kers, J. 2017. Tallinnan teknillinen yliopisto. PDF-dokumentti. Impact of cracks to the hygrothermal properties of CLT water vapour resistance and air permeability. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217349317/pdf?md5=11ddf6be43af76d75c0a2e7b993dcb8e&pid=1-s2.0-S1876610217349317-main.pdf>

LVL Handbook: Europe. 2019. Helsinki: Puutuoteteollisuus ry.

Monikerroslevy (CLT). 2020. Puuinfo. WWW-dokumentti. 23.6.2020. Saatavissa: <https://www.puuinfo.fi/puutieto/insinooripuutuotteet/monikerroslevy> [viitattu 17.11.2020]

Peltokangas, J. 2020. Tuotekehitys & myynti. Sähköpostikysely 25.11.2020. CLT Finland Oy

Pentti, M. & Hyypöläinen, T 1999, Ulkoseinärakenteiden kosteustekninen suunnittelu. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Talonrakennustekniikka, Julkaisu, Nro 94, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Tampere.

Petersson, B. 2018. Tillämpad byggnadsfysik. Upplaga 6:1. Lund: Studentlitteratur AB.

Pfungen, L. 2018. Paradigm shift in the use of adhesives. WWW-dokumentti. Päivitetty [29.1.2018]. Saatavissa: <https://www.timber-online.net/holzprodukte/2018/01/paradigm-shift-in-the-use-of-adhesives.html> [viitattu 17.11.2020]

Purbond: Liimatutkimus. s.a. Prestazione igrotermica degli adesivi PUR-BOND® secondo la norma EN ISO 12572-1 (SIA 180.216) Päivitetty [13.5.2020] Saatavissa: https://documen.site/download/prestazione-igrotermica_pdf# [viitattu 2.12.2020]

Saarimaa, J., Nieminen, J., Rautiainen, L., Ojanen, T. & Kohonen, R. 1989. Kosteuden siirtyminen rakenteissa: Rakennusaineiden kosteustekniset ominaisuudet. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus.

Sandin, K. 2010. Praktisk byggnadsfysik. Lund: Studentlitteratur.

SFS-ISO 6946:en. 2017. Rakennusosat ja rakennuselementit. Lämmöneristävyys ja lämmönläpäisevyys. Laskentamenetelmät

Siikanen, U. 2014. Rakennusfysiikka: Perusteet ja sovelluksia. Helsinki: Rakennustieto.

Srisgantharajah, J & Ullah, S. 2015. A study of water content in CLT - the wetting and drying process. Norges miljø- og biovitenskapelige universitet. Diplomityö. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/bitstream/handle/11250/294093/Srisgantharajah%20%26%20Ullah%202015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Suomalainen homemalli. 2017. Tampereen yliopisto. WWW-dokumentti. Päivitetty [11.5.2018]. Saatavissa: <https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/suomalainen-homemalli/>

Suomen RakMk. 2010. Ympäristöministeriö. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://ymparisto.fi/download/noname/%7B7BF051A7-6436-4724-A1FD-7688A56FB09B%7D/102966>

Tampereen yliopisto. Rakennusfysikaaliset testivuodet. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/kosteusanalysointimenetelma/rakennusfysikaaliset-testivuodet/>

Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Puurakenteiden kosteustekninen toiminta. 1999. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/1999/T1991.pdf>

Vinha, J, Valovirta, I, Korpi, M, Mikkilä, A & Käkelä, P 2005, Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden

funktiona. Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan osasto, talonrakennustekniikan laboratorio, Tutkimusraportti, Vuosikerta. 129, Unknown Publisher.

Vinha, J. 2007. Hygrothermal Performance of Timber-Framed External Walls in Finnish Climatic Conditions. A Method for Determining the Sufficient Water Vapour Resistance of the Interior Lining of a Wall Assembly. Doctoral Thesis. PDF-dokumentti. Tampere University of Technology. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/114684/vinha.pdf?sequence=2>

Vinha, J 2007, Rakennusfysiikan perussäännöt suunnittelussa ja rakentamisessa. julkaisussa Rakentajain kalenteri 2008. Rakennustieto Oy, Sivut 394-409.

Vinha, J., Lindberg, R., Pentti, M., Mattila, J., Lahdensivu, J., Heljo, J., Suonketo, J., Leivo, V., Korpi, M., Aho, H., Lähdesmäki, K & Aaltonen, A. 2010. Matalaenergiarakenteiden toimivuus: Tutkimustuloksia ja suosituksia uusiin lämmöneristys- ja energiankulutusmääräyksiin ja -ohjeisiin, loppuraportti

Vinha, J 2011, Luentomoniste osa 1, Rakennusfysiikka RTEK-3511, TTY, Rakennustekniikan laitos

Vinha, J 2011, Luentomoniste osa 2, Rakennusfysiikka RTEK-3511, TTY, Rakennustekniikan laitos

Valtion teknillinen tutkimuskeskus & Tampereen teknillinen yliopisto. 2017. Päivitetty [11.5.2018] Homeindeksin taulukkolaskentapohja

WUFI-Wiki 2009. Details:Physics. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/Details:Physics> [viitattu 16.11.2020]

Wikberg, H & Leppävuori, J. 2017. Reaktiivinen ligniini alentamaan puutuotteiden ympäristövaikutuksia. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://news.cision.com/fi/vtt-info/r/reaktiivinen-ligniini-alentamaan-puutuotteiden-ymparistovaikutuksia,c2178104> [viitattu 26.11.2020]

Wufi Kotisivut. WUFI 2D. 2018. Saatavissa: <https://wufi.de/en/software/wufi-2d/> [viitattu 24.11.2020]

Öberg, J. & Wiege, E. 2018. Moisture risks with CLT-panels subjected to outdoor climate during construction -focus on mould and wetting processes. Department of Building Technology. Royal Institute of Technology (KTH). Bachelor degree of Building Technology. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1222631/FULLTEXT01.pdf>

Materiaalien perusarvot

LIITE 1

MATERIAALIEN PERUSARVOT	Tiheys	Huokoisuus	Ominaislämpökap.	Lämmönjohtavuus	Vesihöyryn dif. vastuskerroin
	[kg/m ³]	[m ³ /m ³]	[J/(kgK)]	[W/mK]	[-]
Tuulensuojakipsilevy 9 mm	774	0,68	1100	0,19	7,9
Huokoinen puukuitulevy 25 mm	280	0,85	1500	0,05	4,6
Tuulensuojamineraalivilla	73	0,94	850	0,031	1,4
Havuaneri 9 mm	394	0,65	1500	0,11	232
Huokoinen puukuitulevy 12 mm	270	0,85	1500	0,048	5,5
Tuulensuojalaminaatti 1 mm	360	0,001	1500	0,2	87
Diffuusioavoin tuulensuojakalvo 1 mm	250	0,6	1500	0,2	35
Kipsilevy 13 mm	574	0,77	1100	0,19	6,9
Höyrinsulkumuovi 1 mm	980	0,001	2300	0,4	89000
Mänty	532	0,9	2700	0,1	84
Lasivilla	22	0,98	850	0,035	1,2
Kivivilla	37	0,97	850	0,034	37
Puukuitueriste	37	0,97	2000	0,038	1,3
PU-eriste	39	0,95	1500	0,024	185
CLT-Levy	410	0,74	1300	0,13	500
LVL-Levy	462	0,627	2500	0,13	156
OSB -Levy	553	0,61	1700	0,12	134
Alumiinipaperi	980	0	1000	0,4	100000

Materiaalien lämmönjohtavuuden muutos
kosteuden suhteen

LIITE 2

LÄMMÖNJOHTAVUUDET KOSTEUSPITOISUUDEN FUNKTIONA

1	Tuulensuojakipsilevy 9mm	w [kg/m ³]	0	6,1	9	13,5	23,8	680
		λ [W/(m·K)]	0,19	0,19	0,19	0,2	0,21	0,6
2	Huokoinen puukuitulevy 25mm	w [kg/m ³]	0	12,3	24,1	47,6	74,8	850
		λ [W/(m·K)]	0,0485	0,0514	0,052	0,0553	0,0541	0,6
3	Tuulensuojamaineraalivilla	w [kg/m ³]	0	0,5	0,6	1,6	3,3	940
		λ [W/(m·K)]	0,0306	0,0305	0,0305	0,0305	0,0307	0,6
4	Havuvaneri 9mm	w [kg/m ³]	0	22,9	43,2	86,4	126	650
		λ [W/(m·K)]	0,11	0,11	0,11	0,12	0,13	0,6
5	Huokoinen puukuitulevy 12mm	w [kg/m ³]	0	12,4	22,4	45,9	71,3	850
		λ [W/(m·K)]	0,0465	0,0494	0,0512	0,0543	0,0529	0,6
6	Kipsilevy 13mm	w [kg/m ³]	0	4,6	6,7	10,1	17,7	770
		λ [W/(m·K)]	0,19	0,19	0,19	0,2	0,21	0,6
7	Mänty	w [kg/m ³]	0	32	62	126	185	900
		λ [W/(m·K)]	0,1	0,11	0,12	0,1	0,15	0,6
8	Lasivilla	w [kg/m ³]	0	0,45	0,66	1,3	2,4	980
		λ [W/(m·K)]	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,6
9	Kivivilla	w [kg/m ³]	0	0,15	0,33	0,62	0,93	970
		λ [W/(m·K)]	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,6
10	Puukuitueriste	w [kg/m ³]	0	1,9	4	8,6	15,2	970
		λ [W/(m·K)]	0,038	0,038	0,038	0,039	0,04	0,6
21	OSB-levy	w [kg/m ³]	0	610				
		λ [W/(m·K)]	0,12	0,319				
22	CLT-Levy	w [kg/m ³]	0	740				
		λ [W/(m·K)]	0,098	0,452				
23	LVL-Levy	w [kg/m ³]	0	627				
		λ [W/(m·K)]	0,13	0,395				

Materiaalien kosteusdiffusiviteetit

LIITE 3

KOSTEUSDIFFUSIVITEETIT

Nro.	Materiaali	w [kg/m ³]	DWS [m ² /s]	DWW [m ² /s]
1	Tuulensuojakipsilevy 9mm	0	0	0
		10,8	1,02E-10	1,02E-10
		500	8,78E-08	8,78E-09
		0	0	0
2	Huokoinen puukuitulevy 25 mm	35,7	2,82E-12	2,82E-12
		140	4,85E-09	4,85E-10
		0	0	0
3	Havuvaneri 9 mm	67,5	7,60E-12	7,60E-12
		590	5,28E-09	5,28E-10
		0	0,00E+00	0,00E+00
4	Huokoinen puukuitulevy 12 mm	33,6	4,17E-12	4,17E-12
		210	1,38E-09	1,38E-10
		0	0,00E+00	0,00E+00
5	Kipsilevy 13 mm	8	1,85E-10	1,85E-10
		371	1,59E-07	1,59E-08
		0	0,00E+00	0,00E+00
6	Mänty	62,6	1,32E-13	1,32E-13
		870	8,03E-11	8,03E-12
		0	0,00E+00	0,00E+00
7	Puukuitueriste	6,1	1,18E-10	1,18E-10
		440	1,07E-07	1,07E-08

Nro.	Materiaali	w [kg/m ³]	DWS [m ² /s]	DWW [m ² /s]
14	LVL-Levy	0	0,00E+00	0,00E+00
		59	[-]	4,40E-11
		68	[-]	5,20E-11
		525	[-]	3,00E-10
		0	0,00E+00	0
14	LVL-Levy	76	1,00E-11	[-]
		525	4,00E-11	[-]
		0	0	0
15	OSB-Levy	59	[-]	2,10E-14
		68	[-]	2,20E-14
		610	[-]	4,00E-09
		0	0	0
16	OSB-Levy	76	1,00E-12	[-]
		610	2,00E-12	[-]

TASAPAINOKOSTEUSKÄYRÄT

1	Tuulensuojakipsilevy 9mm	RH [%]	0	33	55	65	75	80	83	86	93	97	100	
		w [kg/m ³]	0	6,1	8,4	9	9,5	10,8	11,5	13,5	18,2	23,8	500	
2	Huokoinen puukuitulevy 25mm	RH [%]	0	33	55	65	75	80	83	86	93	97	100	
		w [kg/m ³]	0	12,3	20	24,1	28,2	35,7	40,2	47,6	64,8	74,8	140	
3	Tuulensuojamineraalivilla	RH [%]	0	33	55	65	75	80	83	86	93	97	100	
		w [kg/m ³]	0	0,51	0,58	0,6	0,62	0,91	1,1	1,6	2,9	3,3	4,1	
4	Havuaneri 9mm	RH [%]	0	33	55	65	75	80	83	86	93	97	100	
		w [kg/m ³]	0	22,9	31	43,2	55,4	67,5	74,7	86,4	114	126	590	
5	Huokoinen puukuitulevy 12mm	RH [%]	0	33	55	65	75	80	83	86	93	97	100	
		w [kg/m ³]	0	12,4	19,6	22,4	25,2	33,6	38,7	45,9	62,7	71,3	210	
6	Kipsilevy 13mm	RH [%]	0	33	55	65	75	80	83	86	93	97	100	
		w [kg/m ³]	0	4,6	6,3	6,7	7,1	8	8,6	10,1	13,5	17,7	371	
7	Mänty	RH [%]	0	33	55	65	75	80	83	86	93	97	100	
		w [kg/m ³]	0	32,3	45	62,6	80,1	97,5	108	126	169	185	870	
8	Lasivilla	RH [%]	0	33	55	65	75	80	83	86	93	97	100	
		w [kg/m ³]	0	0,45	0,54	0,66	0,78	0,98	1,1	1,3	1,9	2,4	45	
9	Kivivilla	RH [%]	0	33	55	65	75	80	83	86	93	97	100	
		w [kg/m ³]	0	0,15	0,23	0,33	0,43	0,53	0,59	0,62	0,69	0,93	45	
10	Puukuitueriste	RH [%]	0	33	55	65	75	80	83	86	93	97	100	
		w [kg/m ³]	0	1,9	3,1	4	4,8	6,1	6,8	8,6	12,9	15,2	440	
12	PU	RH [%]	0	35	50	70	80	90	98	100				
		w [kg/m ³]	0	0,12	0,16	0,16	0,18	0,27	0,38	45				
36	CLT-levy	RH [%]	0	20	35	50	65	80	90	95	99	99,5	99,9	100
		w [kg/m ³]	0	21	29	38	49	63	74	88	160	197	297	449
37	LVL-Levy	RH [%]	0	10	30	50	70	80	90	93	95	99	99,5	99,999
		w [kg/m ³]	0	38	47	55	67	76	94	104	114	169	196	264
38	OSB-Levy	RH [%]	0	10	30	50	70	80	90	93	95	99	99,5	99,999
		w [kg/m ³]	0	30	39	49	64	76	101	116	131	219	263	370
													413	494
													610	610

Antti Kärkäs
Opinnäytetyö

TUOTEVALMISTAJAN KYSELY

XAMK
Rakennustekniikka
Insinööri (AMK)

25.11.2020

Mitä liimaa teillä on käytetty tuotannossanne lamellien liimaamiseksi yhteen?

Onko mahdollista käyttää CLT-levyn kanssa mitä tahansa lämmöneristettä asuin-kerrostalojen seinärakenteissa?

Voidaanko CLT-levy päällystää millä tahansa sisäverhousmateriaalilla asuin-kerrostalojen seinärakenteissa?

Millaisella maalilla CLT-seinärakenteessa sisäverhouslevy tulisi maalata, jotta rakennusaikaisen kosteuden olisi mahdollista tuulettua pois rakenteesta?

Tarvitseeko asuinrakennuksissa, joissa CLT-levyä käytetään kantavana runkona, käyttää erikseen ilman- tai höyrynsulkukerrosta?

Tulisiko levyn liimakerrokselle käyttää omaa diffuusiovastuslukua, kun rakennetta määritellään rakennusfysikaalisiin laskentaohjelmiin?

Hidastaako levyn liimakerros kuivamista, jos vertaillaan tuotetta tuotteen raaka-aineena käytettävään puuhun?

Vaikuttaako kosteus tuotteen ilmatiiveyteen?

Voisiko ligniinipohjainen liima soveltua käytettäväksi CLT-levyissä? (Stora Ensolle pelkästään)

Mitä mahdollisia etuisuuksia voitaisiin saavuttaa ligniinipohjaisella liimalla vertailtuna nykyisiin levyn valmistuksessa käytettäviin liimoihin? (Stora Enso)

Minkälainen vaikutus ligniinipohjaisella liimalla olisi CLT-levyn sorptiokäyttäytymiseen? (Stora Enso)