

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Rakennustekniikan koulutusohjelma

Tero Leinonen

PUUKERROSTALON RAKENTEIDEN RAKENNUSFYSIKAALINEN
TOIMINTA

Opinnäytetyö
Toukokuu 2017



OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2017
Rakennustekniikan koulutusohjelma

Tikkarinne 9
80220 JOENSUU
(013) 260 600

Tekijä
Tero Leinonen

Nimeke
Puukerrostalon rakenteiden rakennusfysikaalinen toiminta

Toimeksiantaja
Karelia-Ammattikorkeakoulu / Bino puurakentamisen hankkeet

Tiivistelmä

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia 6-kerroksisen CLT-rakenteisen kerrostalon ulkoseinän sekä ylä- ja välipohjan kosteus- ja lämpötekniinen käyttäytyminen ja niiden soveltuminen Suomen sääolosuhteisiin.

Tässä opinnäytetyössä käsitellään lämpö- ja kosteusteknisiä rakennusfysikaalisia ilmiöitä ja sääolosuhteiden vaikutusta niihin. Opinnäytetyössä käsitellään myös puukerrostalorakentamista, ja siinä käytettäviä rakennustapoja ja materiaaleja. CLT-rakenteiden lämpö- ja kosteusarvot mallinnettiin käsin laskemalla, ja niitä verrattiin koetalosta saatuihin arvoihin. Tuloksista tehtiin yhteenveto ja pohdinta miten rakenteet soveltuvat Suomen sääolosuhteisiin.

Karjalaisen Kulttuurin Edistämissäätiö rakennutti Joensuuhun 6-kerroksisen puukerrostalon. Säätiö teki hankkeessa yhteistyötä Karelia-ammattikorkeakoulun kanssa. Puukerrostalo toimi tämän opinnäytetyön koetalona ja rakennuksesta saatavien tuloksien perusteella pystytään varmistamaan mallinnuksen luotettavuus.

Kieli
suomi

Sivuja 40

Liitteet 6

Liitesivumäärä 6

Asiasanat

CLT, puukerrostalo, rakennusfysiikka, kosteus, lämpö



THESIS
March 2017
Degree Programme in Engineering

Tikkarinne 9
80220 JOENSUU
FINLAND
(013) 260 600

Author
Tero Leinonen

Title
The Physical Functionality of Structures in a Wooden Block of Flats.

Commissioned by
Karelia University of Applied Sciences / Bino woodbuilding projects

Abstract

The aim of this final year project was to study the outerwall, roof and floor humidity and thermal functionality in a 6-floor CLT structured block of flats and the structures' suitability to Finnish weather conditions.

The thesis describes heat and humidity technical phenomena in building physics and the effect of weather conditions on them. The thesis also describes the building methods and materials for wooden block of flats. The temperature and the humidity of CLT-structures were modeled by manual calculation, and then compared with the values obtained with an experimental house. The results were summarized and the suitability of the structures to the Finnish weather conditions were discussed.

Karjalaisen Kulttuurin Edistämissäätiö built a 6-storey wooden block of flats in Joensuu. The foundation collaborated with the Karelia University of Applied Sciences in this project. The wooden block of flats was an experimental house for this thesis and the results from the building ensured that the modelling was reliable.

Language

Finnish

Pages 40

Appendices 6

Pages of Appendices 6

Keywords

CLT, wooden block of flats, building physics, humidity, heat

Sisältö

1	Johdanto	6
1.1	Tausta	6
1.2	Tavoite	6
1.3	Rajaus	6
2	Puurakenteiset kerrostalot	7
2.1	CLT	7
2.2	Tilaelementti	8
2.3	As Oy Joensuun Pihapetäjä.....	10
3	Rakenteiden lämpötekkinen toiminta	12
3.1	Lämmön siirtyminen.....	12
3.1.1	Johtuminen	13
3.1.2	Säteily	13
3.1.3	Konvektio	13
3.2	U-arvo	14
3.2.1	U-arvon määritelmä	14
3.2.2	U-arvon määrittäminen	14
3.2.3	U-arvo vaatimukset.....	16
3.3	Eristepaksuuden vaikutus lämmön ja kosteuden siirtymiseen	17
4	Rakenteen kosteustekkinen toiminta	20
4.1	Kosteuden siirtyminen	20
4.1.1	Diffuusio.....	20
4.1.2	Vesihöyryn konvektio	20
4.1.3	Kondensoituminen	21
4.2	Höyrynsulku	21
5	Lämpö- ja kosteustekkinen mallinnus	23
5.1	Rakenteen rakennusfysikaalinen mallinnus.....	23
5.2	Mallinnetut rakenteet	24
5.2.1	Ulkoseinä	24
5.2.2	Välipohja.....	25
5.2.3	Yläpohja.....	26
6	Mittauslaitteet ja mittausten tuotto	28
6.1	Mittauslaitteet.....	28
6.2	Mittaussektorit.....	29
6.2.1	Ulkoseinärakenne	29
6.2.2	Yläpohjarakenne.....	32
6.2.3	Välipohjarakenne	34

7	Tulokset	36
7.1	Ulkoseinärakenteen tulokset.....	36
7.2	Välipohjarakenteen tulokset.....	37
7.3	Yläpohjarakenteen tulokset.....	37
8	Johtopäätökset	38

Liitteet

Liite 1	Ulkoseinärakenteen mallinnetut arvot.
Liite 2	Välipohjarakenteen mallinnetut arvot.
Liite 3	Yläpohjarakenteen mallinnetut arvot.
Liite 4	Ulkoseinärakenteen mitatut arvot.
Liite 5	Välipohjarakenteen mitatut arvot.
Liite 6	Yläpohjarakenteen mitatut arvot.

1 Johdanto

1.1 Tausta

Opinnäytetyön taustana on puukerrostalorakentamisen lisääntyminen Suomessa. Puukerrostaloissa kantavana materiaalina käytettävä CLT-elementin käyttö on yleistynyt Suomessa ja muualla Euroopassa. CLT-elementin soveltumisesta Suomen sääolosuhteisiin ei ole tutkittu riittävästi, joten tällä tutkimuksella oli tarkoitus selvittää, miten CLT-rakenteiset kerrostalot käyttäytyvät Suomen sääolosuhteissa. Karjalaisen Kulttuurin Edistämissäätiö rakennutti Joensuuhun 6-kerroksisen puukerrostalon. Säätiö teki hankkeessa yhteistyötä Kareliammattikorkeakoulun kanssa. Vastaavanlainen tutkimus on tehty CLT-runkoiseen koetaloon Suomessa aiemminkin, mutta As Oy Joensuun Pihapetäjä on kuitenkin ensimmäinen yli 5-kerroksinen koetalo.

1.2 Tavoite

Tavoitteena oli selvittää mallintamalla CLT-rakenteisen ulkoseinän sekä ylä- ja välipohjan kosteus- ja lämpötekniinen käyttäytyminen. Mallinnus toteutettiin Joensuun Penttilään valmistuvaan puukerrostaloon, josta mitattiin vastaavat arvot ja niitä verrattiin mallinnettuihin arvoihin. Mittausajankohta oli toukokuu, joten mallinnuksessa käytettiin Itä-Suomen kevään olosuhteita. Tarkoituksena oli selvittää CLT-elementin soveltuminen Suomen sääolosuhteisiin.

1.3 Rajaus

Mallintaminen on rajattu koskemaan vuoden 2017 kevään olosuhteita, kuitenkin As Oy Joensuun Pihapetäjästä on saatavana lämpötila- ja kosteusarvoja myös jatkossa. Tutkimuksessa on keskitytty rakenteiden kosteus- ja lämpötekniiseen toimivuuteen.

2 Puurakenteiset kerrostalot

2.1 CLT

Cross Laminated Timber (CLT) muodostuu ristiin liimatuista lautakerroksista nimensä mukaisesti. Puulajina on yleensä kuusi. Yleisimmin kerroksia on kolme tai viisi, mutta niitä voi olla useita. Näistä kerroksista muodostuu jäykkä, luja sekä todella kevyt levymäinen elementti. (Puuinfo 2011, 1.)



Kuva 1. CLT-elementti (Stora Enso Oyj, 2011.)

CLT-levyjä pystytään käyttämään seinissä sekä väli- ja yläpohjarakenteissa jäykistävinä ja kantavina rakenteina. Levyt voidaan pinnoittaa tai jättää näkyville sellaisenaan, mikäli palomääräykset sen sallivat. CLT-levyt voidaan valmistaa mittatarkasti erimuotoisiksi elementeiksi. Julkisivuissa ovet ja ikkunat voidaan sijoittaa todella vapaasti ja koska levymäiset elementit toimivat tarvittaessa ulokkeina, tämän takia pystytään toteuttamaan myös kulmaikkunoita. Ulkoseinissä eristys toteutetaan kuten muissakin rakenteissa. Lämmöneriste sijoitetaan CLT-levyn ulkopuolelle. (Puuinfo Oy 2011, 1.)

Keski-Euroopassa CLT-elementtien käyttö on yleisempää kuin Suomessa. Taulukossa 1 on esitetty CLT-levyn tärkeimmät rakenteelliset ominaisuudet. (Puuinfo Oy 2011, 1.)

Taulukko 1. CLT-levyn rakenteelliset ominaisuudet (Puuinfo Oy 2011, 1.)

Ominaisuus	Arvo
Enimmäisleveys	2,95 m
Enimmäispituus	16,00 m
Enimmäispaksuus	400 mm
Kerrosrakenne	Ristiin laminoitu, vakuumiliimattu
Puulaji	Kuusi
Lujuusluokka	C24
Kosteuspitoisuus	12 % +/- 2 %
Liimatyyppi	Formaldehydivapaa PUR liima
Pintalaatu	Teollisesti hiottu
Visuaalinen laatuluokka	C tai A/B
Paino	5,0 kN/m ³
Kosteuden vaihtelun aiheuttamat muodonmuutokset levyn suunnassa	0,02 % jokaista kosteusprosentin muutosta kohden
Kosteuden vaihtelun aiheuttamat muodonmuutokset levyn paksuudessa	0,24 % jokaista kosteusprosentin muutosta kohden
Paloluokka	D-s2, d0
Palonkesto	Hiiltymisnopeus 0,65 mm/min
Kosteuden läpäisevyys	20...50
Lämmönjohtavuus (λ)	0,11 W/(mK)
Lämpökapasiteetti	1600 J/(kgK)
Ilmatiiviys	Täysin tiivis
Käyttöluokka	1 ja 2

2.2 Tilaelementti

Tilaelementtitekniikka on rakentamistapa, jossa erillisistä tehtaalla kootuista tilayksiköistä rakennus kasataan työmaalla. Yleensä tilaelementti muodostuu kantavasta rungosta ja valmiista seinistä, katosta ja lattiasta. Elementit valmistetaan tehdasolosuhteissa täysin säältä suojassa. Elementtiin voidaan asentaa tehtaalla valmiiksi LVIS-varustus, ikkunat ja kalusteet. (Puuinfo Oy, 2016, 1.)

Tilaelementin kantava rakenne voidaan toteuttaa esimerkiksi kehärakenteella, pilari-palkkitekniikalla, tai levymäisillä suurelementeillä kuten CLT-levyillä. Tilaelementtitekniikalla saadaan aikaan erinomainen ääneneristys. Tämä johtuu kaksoisrakenteesta, joka muodostuu esimerkiksi tilaelementin katosta ja lattiasta. Valmiiden elementtien tyypilliset mitat ovat esimerkiksi 12 x 4,2 x 3,2 metriä. Tilaelementtien mitoituksen suunnittelussa täytyy ottaa huomioon kuljetuksen asettamat rajoitukset. (Puuinfo Oy, 2016, 1.)

Tilaelementtitekniikalla rakentaessa työmaavaihe on erittäin lyhyt. Lyhyen työmaavaiheen takia järjestelmä on erinomainen esimerkiksi lisäkerrosten tekemisessä. Tilaelementeillä rakentaminen sopii myös hyvin matalaenergiarakentamiseen. Ruotsissa tilaelementtitekniikka on yleinen tapa rakentaa puisia kerrostaloja. (Puuinfo Oy, 2016, 1.)



Kuva 2. Tilaelementin asennus As Oy Joensuun Pihapetäjällä.

Puutilaelementeillä rakentamisen etuja ovat lyhyt rakennusaika, laadukas tehtaalla valmistettu tuote, prosessit ovat helposti valvottavissa, rakenteen keveys, sään aiheuttamien rakennusvirheiden välttäminen, työn osuus työmaalla on pieni sekä kustannusten hallinta on tehokasta. (Puuinfo Oy, 2016, 1.)

2.3 As Oy Joensuun Pihapetäjä

Karjalaisen Kulttuurin Edistämissäätiö KKES rakennutti 6-kerroksisen puukerrostalon Joensuun Penttilään. As Oy Joensuun Pihapetäjästä tuli Joensuun ensimmäinen yli 2-kerroksinen puukerrostalo. Rakennusprojektiin kuuluu Energiatehokas puukerrostalo EAKR -kehityshanke. Tavoitteena oli hankkia monipuolista tutkimus- ja koulutustietoa puurakentamisesta. Kareliamattikorkeakoulu ja Itä-Suomen yliopisto ovat hankkeessa säätiön yhteistyökumppaneita. (As Oy Joensuun Pihapetäjä, 2016, 1.)

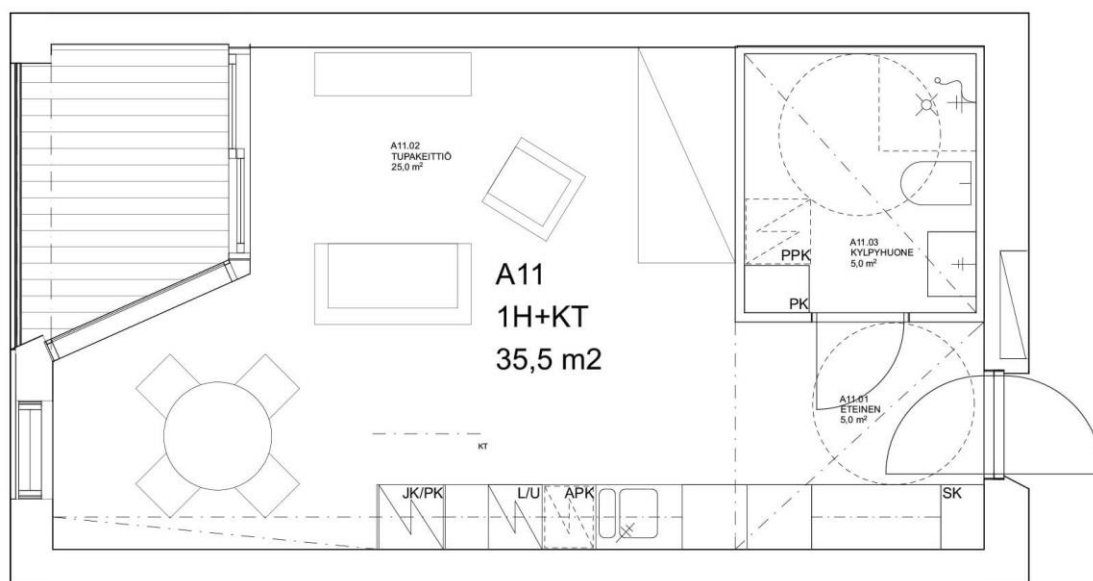


Kuva 3 Havainnekuva As Oy Joensuun Pihapetäjästä (As Oy Joensuun Pihapetäjä, 2016.)

As Oy Joensuun Pihapetäjästä rakennettiin paloturvallinen ja energiatehokas puukerrostalo. Rakentamiseen liittyvässä kehityshankkeessa etsittiin uusia ratkaisuja ja uutta tietoa puukerrostalorakentamiseen. (As Oy Joensuun Pihapetäjä, 2016, 1.)

As Oy Joensuun Pihapetäjästä suunniteltiin mahdollisimman energiatehokas rakennus. Pihapetäjä Oy:n energialuku 100 ja energialuokka on B. Suurin osa Suomessa rakennetuista kerrostaloista ovat energialuokkaa C. Jätevedenlämmöntalteenottojärjestelmän avulla on parannettu As Oy Pihapetäjän energiatehokkuutta. Rakennuksen katolle asennettiin lisäksi 100 m² aurinkopaneeleita. Aurinkopaneelien laskennallinen tuotto on arviolta 13 000 kWh vuodessa. (As Oy Joensuun Pihapetäjä, 2016, 1.)

As Oy Joensuun Pihapetäjässä on 40 kappaletta vuokrahuoneistoja jotka jakautuvat kolmioihin ja yksiöihin. Alla esitetty yksiön pohjapiirros kuvassa 4.



Kuva 4. Esimerkki Pihapetäjän asunnosta. (As Oy Joensuun Pihapetäjä, 2016.)

As Oy Joensuun Pihapetäjässä CLT-levyn pinta on näkyvissä huoneistojen väliseinissä sekä sisäkatoissa. Puuverhoilua käytetään myös lattioissa, ikkunoissa ja ovissa. (As Oy Joensuun Pihapetäjä, 2016, 1.)

Taulukko 2. Tietoa As Oy Joensuun Pihapetäjästä. (As Oy Joensuun Pihapetäjä, 2016.)

Nimi:	As Oy Joensuun Pihapetäjä
Osoite:	Honkapolku 4, 80220 Joensuu
Sijainti:	Kaupunginosa 16 Penttilä, Kortteli 1641, Tontti 5 R
1-kerroksen runkomateriaali:	Betoni
Kerrosten 2-6 runkomateriaali:	CLT-rakennuslevy
Julkisivu:	Puuverhous
Rakennuksen paloluokka:	P2
Automaattinen sammutusjärjestelmä:	Luokka OH1
Huoneistoala asunnot:	1730 hum ²
Kerrosala:	2344 kem ²
Bruttoala:	2969 brm ²
Tilavuus:	8436 m ³
Asuntomäärä:	40 kpl
Asuntojakauma:	1H+KT, 35,5 m ² , 30 kpl 3H+KT, 65 m ² , 10 kpl
Arkkitehti- ja pääsuunnittelu:	OOPEAA Office for Peripheral Architecture Anssi Lassila, pääsuunnittelija

3 Rakenteiden lämpötekkinen toiminta

3.1 Lämmön siirtyminen

Lämpötilaerot pyrkivät aina tasoittumaan. Lämmön siirtyminen tapahtuu aina korkammasta lämpötilasta matalampaan. Lämpö siirtyy rakenteessa kolmella eri tavalla: johtumalla, säteilemällä ja konvektiolla. Näistä lämmönsiirtymisilmiöistä johtuminen on keskeisin. (Björkholtz 1997, 12.)

3.1.1 Johtuminen

Lämmönjohtumisessa molekyylien liike-energiaa siirtyy aineen sisällä molekyylistä toiseen. Siirtymisen vuoksi puhutaan lämmönvirtauksesta. Lämmön oleukseen kuuluu, että se pyrkii tasoittumaan suuremmasta pienempään. Eri aineille voidaan määrittää lämmönjohtavuusarvot eli lambda-arvot (λ). Mitä suurempi lämmönjohtavuusarvo, sitä paremmin lämpö johtuu. Lämmönjohtavuuden yksikkö on $W/(K \cdot m)$. (Björkholtz 1997, 12.)

3.1.2 Säteily

Lämmönsäteilyssä rakenteiden pinnoilta siirtyy energiaa sähkömagneettisen aaltoliikkeen välityksellä valon nopeudella. Kaikki aineet, joiden lämpötila on absoluuttisen nolapisteen yläpuolella emittoivat eli lähettävät lämpösäteilyä. Lämpösäteilyn osuessa aineen pintaan, se osittain heijastuu, osittain absorboituu. Läpäisevien aineiden pinnoissa kuten lasi, osa säteilystä menee vielä pinnan läpi. Kuten lämmönjohtumisessakin, on lämmönsäteilyssä eri aineille määritettävissä säteilyarvot eli emissiviteetti-arvot (ϵ). Jos kappaleen heijastavuus on suuri, emissiivisyysarvo on pieni. Useiden rakennusmateriaalien emissiviteetti asettuu huonelämmössä alueelle 0,8-0,95. (Björkholtz 1997, 13.)

3.1.3 Konvektio

Konvektiossa lämpövirtaus tapahtuu nesteessä tai kaasussa. Konvektio on joko pakotettua tai luonnollista. Pakotetussa konvektiossa kaasu tai neste liikkuu jonkin ulkopuolisen voiman vaikutuksesta, luonnollisessa konvektiossa taas lämpötilaerojen aiheuttamista tiheyseron takia. Kokonaan luonnollista konvektiota esiintyy rakenteissa harvoin. Yleensä kyseessä on pakotetun ja luonnollisen konvektion yhdistelmästä. Pakotettuja virtauksia rakennuksen sisätiloissa saavat aikaan mm. ihmisten liikkeitä ja ilmanvaihdon puhaltimet. Rakennuksen ulkopuolella ensisijainen pakotetun konvektion aikaansaaja on tuuli. (Björkholtz 1997, 13.)

3.2 U-arvo

3.2.1 U-arvon määritelmä

U-arvo eli lämmönläpäisykerroin kuvaa sitä lämpövirtaa, joka kulkee 1m²:n kokoisen rakenteen osan läpi lämpötilaeron ollessa 1 °C. Todellisissa rakenteissa U-arvo vaihtelee olosuhteiden muuttuessa. Esimerkiksi seinän kostuessa U-arvo heikkenee ja paranee jälleen seinän kuivuesssa. U-arvo voi heikentyä kuormituksen alla olevan lämmöneristyksen iän myötä painuessa hiukan kokoon. U-arvo kuvaa rakenteen keskimääräistä kykyä vastustaa lämmönkulkua koko rakenteen käyttöajan. Kyseessä on pitkäaikaista toimintaa kuvaava suure. Lämmönläpäisykerroimen yksikkö on W/(K·m²) (Björkholtz 1997, 14.)

3.2.2 U-arvon määrittäminen

U-arvo määritetään rakennusmääräyskokoelman osan C4 mukaan seuraavasti.

Rakenteen lämmönläpäisykerroin (U) on rakenteen kokonaislämmönvastuksen (R_T) käänteisluku kaavassa 1. (Ympäristöministeriö rakennusmääräyskokoelma C4 2003, 5.)

$$U = 1 / R_T \quad (1)$$

jossa

U on rakennusosan lämmönläpäisykerroin, W/(m² K)

R_T on rakennusosan kokonaislämmönvastus, m²K/W.

Lämpö johtuu yleensä rakennusosan sisällä useiden ainekerroksien läpi. Ainekerrokset saattavat poiketa toisistaan lämmönjohtavuudeltaan sekä paksuudeltaan. Yksittäisen ainekerroksen lämmönvastus (R) lasketaan lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoa (λ_U) sekä ainekerroksen paksuutta (d) käyttäen kaavasta 2. (Ympäristöministeriö rakennusmääräyskokoelma C4 2003, 5.)

$$R = d / \lambda_U \quad (2)$$

jossa

R on ainekerroksen lämmönvastus, m^2K/W

d on ainekerroksen paksuus, m

λ_U on ainekerroksen lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo, $W/(m K)$.

Rakennusosan erilaiset ainekerrokset ovat lämpövirran suuntaan nähden rinnan tai peräkkäin. Ainekerroksista jotka ovat lämpövirran suuntaan peräkkäin, muodostuu rakennusosan kokonaislämmönvastus (R_T) joka lasketaan kaavalla 3 (Ympäristöministeriö rakennusmääräyskokoelma C4 2003, 5.)

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} \quad (3)$$

jossa

R_T on rakennusosan kokonaislämmönvastus, m^2K/W

R_{si} on sisäpuolen pintavastus, m^2K/W

R_1, R_2, \dots, R_n on rakennusosan ainekerrosten 1, 2,...,n lämmönvastukset, m^2K/W

R_{se} on ulkopuolen pintavastus, m^2K/W

Jokaisen peräkkäisen yksittäisen ainekerroksen lämmönvastus (R_1, R_2, \dots, R_n) lasketaan ainekerroksen lämmönjohtavuutta ja paksuutta käyttäen kaavasta 2 ja sijoitetaan kaavaan 3. (Ympäristöministeriö rakennusmääräyskokoelma C4 2003, 5.)

3.2.3 U-arvo vaatimukset

U-arvovaatimukset määräytyvät rakennusmääräyskokoelman osan C3 mukaan seuraavasti.

Rakenneosien lämmönläpäisykertoimet eivät saa ylittää seuraavia arvoja:

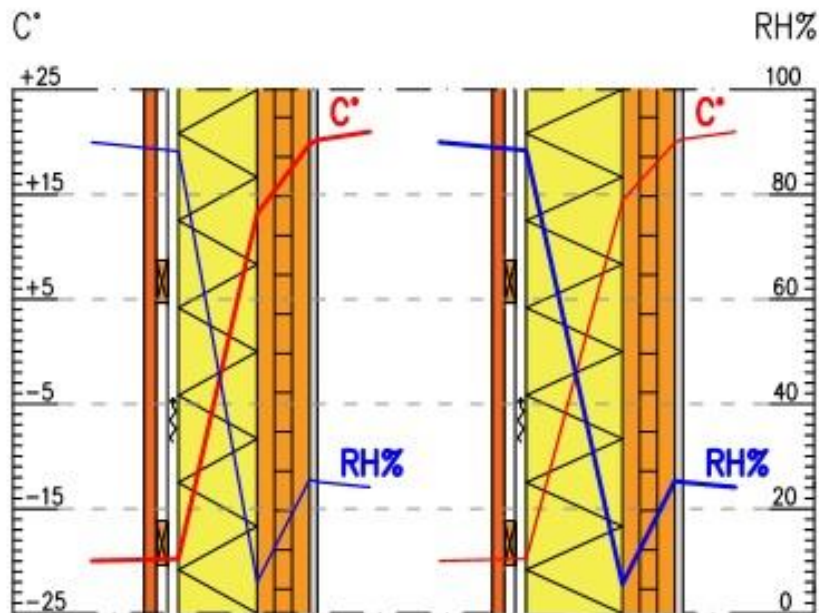
- seinä 0,17 W/m²K
 - hirsiseinä 0,40 W/m²K
(hirsirakenteen keskimääräinen paksuus vähintään 180 mm)
 - yläpohja ja ulkoilmaan rajoittuva alapohja 0,09 W/m²K
 - ryömintätilaan rajoittuva alapohja 0,17 W/m²K
(tuuletusaukkojen määrä enintään 8 promillea alapohjan pinta-alasta)
 - maata vastaan oleva rakennusosa 0,16 W/m²K
 - ikkuna, kattoikkuna, ovi 1,0 W/m²K
- (Ympäristöministeriö rakennusmääräyskokoelma C3 2003, 7.)

3.3 Eristepaksuuden vaikutus lämmön ja kosteuden siirtymiseen

Lämmöneriste ja sen paksuus vaikuttavat rakenteen kerrosten lämpötiloihin ja vesihöyryn osapaineisiin, jotka ovat oleellinen asia rakenteen rakennusfysiikallisessa toimivuudessa. Opinnäytetyön tutkimuskohteessa As Oy Joensuun Pihapetäjässä ulkoseinissä käytetty lämmöneriste on PAROC Cortex One 180 mm. Kyseistä eristetyyppejä on saatavana myös 205 mm:n ja 220 mm:n paksuuksissa. Kuvissa 6 ja 7 on vertailtu 180 mm:n ja 220 mm:n paksuisia Paroc Cortex One lämmöneristeitä CLT-rakenteisessa ulkoseinässä, Suomen talviolosuhteissa. Ulkoseinärakenne koostuu seuraavista ainekerroksista:

- julkisivuverhouslauta 28 mm
- ristikoolaus / tuulettuva rako 50 mm
- tuulensuojamineraali villa 180 mm
- CLT-levy 120 mm
- kipsilevy 18 mm

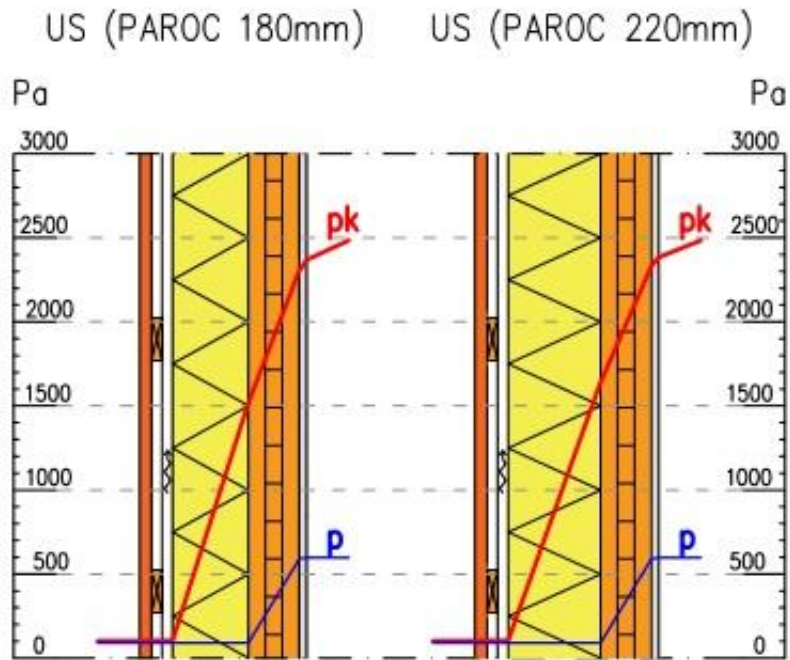
Kuvassa 5 on esitetty lämpötilan (°C) ja suhteellisen kosteuden (RH %) siirtyminen rakenteessa. Vasemmanpuoleisessa kuvassa ulkoseinärakenteessa on 180 mm:n paksuinen lämmöneriste, ja oikeanpuoleisessa rakenteessa eristeen paksuus on 220 mm. Taulukossa on esitetty lämpötila- ja kosteusarvot eri ainekerrosten rajapinnoissa.



Ainekerros	T [°C]	T [°C]	RH [%]	RH [%]
Eristepaksuus	180mm	200mm	180mm	200mm
Ulkoilma	-20,0	-20,0	90,0	90,0
	-19,8	-19,8	88,3	88,5
Paroc cortex one				
	13,2	14,4	6,1	5,6
CLT				
	19,8	20,0	25,6	25,3
Gyproc				
	20,2	20,3	25,2	25,1
Sisäilma	21,0	21,0	24,1	24,1

Kuva 5. Eristepaksuuden vaikutus lämmön ja kosteuden siirtymiseen.

Kuvassa 6 on esitetty osapaineen (p) ja kyllästymispaineen (p_k) siirtymistä ulkoseinärakenteessa. Vasemman puoleisessa kuvassa rakenteessa on 180 mm:n paksuinen lämmöneriste, ja oikeanpuoleisessa kuvassa eristeen paksuus on 220 mm. Taulukossa on esitetty painearvot [Pa] eri ainekerrosten rajapinnoissa.



Ainekerros	pk [Pa]	pk [Pa]	p [Pa]	p [Pa]
Eristepaksuus	180mm	200mm	180mm	200mm
Ulkoilma	102,2	102,2	92,0	92,0
	104,3	104,0	92,0	92,0
Paroc cortex one				
	1521,0	1641,4	92,3	92,4
CLT				
	2305,1	2331,5	590,2	590,2
Gyproc				
	2367,6	2385,0	597,6	597,6
Sisäilma	2484,3	2484,3	597,6	597,6

Kuva 6. Eristepaksuuden vaikutus osa- ja kyllästymispaineen siirtymiseen.

4 Rakenteen kosteustekninen toiminta

4.1 Kosteuden siirtyminen

Kun kosteus siirtyy rakenteessa kylmemmästä tilasta lämpimämpään, rakenne kuivaa. Kun taas kosteusvirran suunta on lämpimästä kylmään, tuolloin rakenne kastuu. Kosteus voi siirtyä rakenteessa useilla erilaisilla tavoilla, mutta yleensä kyseessä on yhdistelmä kahdesta tai useammasta tavasta.

4.1.1 Diffuusio

Kaasujen osapainelain mukaan kaasumolekyylit pyrkivät liikkumaan epämääräisesti jakautuneessa kaasuseoksessa siten, että syntyy tasaisesti jakautunut kaasuseos. Tätä ilmiötä kutsutaan diffuusioksi. Rakennustekniikassa kosteuden liikettä rakenteen läpi vesihöyrynä kutsutaan yleisesti ottaen diffuusioksi. Lähes tulkoon kaikki materiaalit läpäisevät jonkin verran vesihöyryä. Diffuusion suuntaan vaikuttaa oleellisesti tilojen välillä vallitseva ilman kosteusero. Kosteus pyrkii diffuusioidumaan rakenteen läpi tilaan, jossa on matalampi vesihöyryn osapaine. Yleensä diffuusion suunta on lämpimästä tilasta kylmään, mutta jos kylmemmän tilan kosteuspitoisuus on suurempi, on diffuusion suunta kylmästä tilasta lämpimään päin. (Siikanen 2014, 71.)

Huokoisten rakennusmateriaalien sisällä osa kosteuden liikkeestä on usein myös kapillaarista, joten todellisuudessa kyse on harvoin puhtaasta diffuusiosta. (Siikanen 2014, 71.)

4.1.2 Vesihöyryn konvektio

Vesihöyryn konvektio tarkoittaa kaasuseoksessa olevan vesihöyryn liikkumista seoksen mukana sen siirtyessä rakenteessa kokonaispaine-eron vaikutuksesta. Rakennuksessa huokoisten ja ilmaa läpäisevien rakenneosien läpi tapahtuvaa ilmanvirtausta kutsutaan konvektioksi. Ilmanvirtaus johtuu rakenteen eripuolilla olevien ilman paine-erojen vaikutuksesta. Konvektiota saattaa esiintyä myös ra-

kenteen sisäisenä, eli ilman tiheyseroista johtuvana luonnollisena konvektiona, tai pakotettuna konvektiona rakenteessa olevien reikien tai rakojen kautta. Reikien ja rakojen läpi sisältä ulos tapahtuvilla ilmanvirtauksilla on rakenteen toiminnan kannalta suuri merkitys. (Siikanen 2014, 71.)

4.1.3 Kondensoituminen

Kondensoituminen tarkoittaa ilmiötä, jossa vesihöyry tiivistyy vedeksi. Kun ilman suhteellinen kosteus on 100 % voi rakenteen pinnassa tai sen sisällä tapahtua tiivistymistä. Rakenteessa vesihöyry tiivistyy pinnoille jotka ovat lämpötilaltaan ympäröivää ilmaa matalampia, jos kyllästymiskosteus ylittyy. Kondensoitumisen yleisimpiä aiheuttajia ovat kylmäsiilat, höyrynsulun puuttuminen tai väärä sijainti sekä höyrynsulussa olevat reiät. Rakenteet tulisi toteuttaa siten, että vesihöyrynvastus pienenee lämpimästä kylmään päin. (Siikanen 2014, 72.)

4.2 Höyrynsulku

Höyrynsululla tarkoitetaan ainekerrosta, joka on diffuusiotiivis. Koska vesihöyrynvastuksen tulisi pienentyä kylmään tilaan päin, tulisi höyrynsulku sijoittaa rakenteen lämpimälle puolelle. Höyrynsulun tarkoitus on estää diffuusiota sekä estää samalla rakenteen läpi tapahtuvat ilmavuodot, kuin myös mahdolliset konvektiokosteudesta aiheutuvat kondenssivauriot. (Siikanen 2014, 72.)

CLT-levyn ristiliimauksen vuoksi on elementtien ilmatiiveys hyvä, tämän takia rakenteessa ei tarvita erillistä höyrynsulkua, vaan CLT-elementti toimii itsessään vesihöyryä vastustavana ainekerroksena.

Yksi tapa ilmoittaa materiaalin vesihöyrynvastus on S_d -arvo. S_d -arvolla ilmoitetaan yleensä ohuiden kerrosten vesihöyrynvastus. S_d -arvo määritetään kaavalla 4. (SFS-EN 12086.)

$$S_d = \mu \times d \quad (4)$$

jossa

S_d on vesihöyrynvastus, m

μ on diffuusiovastuskerroin

d on materiaalin paksuus, m

Taulukossa 3 on esitetty yleisimpien erilaisten höyrynsulkumateriaalien vesihöyrynvastuksia S_d .

Taulukko 3. Höyrynsulkujen vesihöyrynvastuksia.

Materiaali	Vesihöyryn vastus S_d [m]
CLT (180mm)	17,6
Ilmansulkupaperi	0,6
Höyrynsulkumuovi	50
Alumiinikalvo	1500
ISOVER VARIO Duplex	0,2 - 5
ISOVER VARIO Xtra	0,2 - 20

5 Lämpö- ja kosteustekninen mallinnus

5.1 Rakenteen rakennusfysikaalinen mallinnus

Ensiksi selvitetään mallinnettavan rakenteen ympäröivät ulko- ja sisäilman olosuhteet, eli lämpötila sekä suhteellinen kosteus.

Seuraavaksi tulee selvittää tarkasteltavan rakenteen ainekerroksien paksuudet sekä lämmönjohtavuusarvot. Ainekerroksien paksuuksista ja lämmönjohtavuusarvoista lasketaan kunkin kerroksen lämmönvastus kaavalla 2. Näiden kerrosten lisäksi tulee ottaa huomioon pintavastukset jotka riippuvat lämpövirran suunnasta, nämä arvot löytyvät rakennusmääräyskokoelman osasta C4. Rakenteelle saadaan kokonaislämmönvastus, joka on esitetty sivulla 15 kaavassa 3.

Tämän jälkeen saadaan rakenteelle laskettua lämpötilajakauma kaavalla 5 määrittämällä lämpötila paikassa x

$$t_x = t_s - (\sum m_x / \sum m) \cdot (t_s - t_u) \quad (5)$$

jossa

t_x on lämpötila kohdassa x, °C

t_s on sisäilman lämpötila, °C

t_u on ulkoilman lämpötila, °C

$\sum m_x$ on lämmönvastus sisäpinnasta kohtaan x, m²·°C/W

$\sum m$ on koko rakenteen lämmönvastus, m²·°C/W

Sitten on vuorossa vesihöyryn osapaineen määrittäminen paikassa x kaavalla 6.

$$p_x = p_s - (\sum Z_x / \sum Z) \cdot (p_s - p_u) \quad (6)$$

jossa

p_x on vesihöyryn osapaine paikassa x, Pa

p_s on vesihöyryn osapaine sisäilmassa, Pa

p_u on vesihöyryn osapaine ulkoilmassa, Pa

$\sum Z_x$ on sisäpinnasta kohtaan x olevien kerrosten vesihöyryn vastusten summa, $m^2 \cdot s \cdot Pa/kg$

$\sum Z$ on koko rakenteen vesihöyrynvastus, $m^2 \cdot s \cdot Pa/kg$

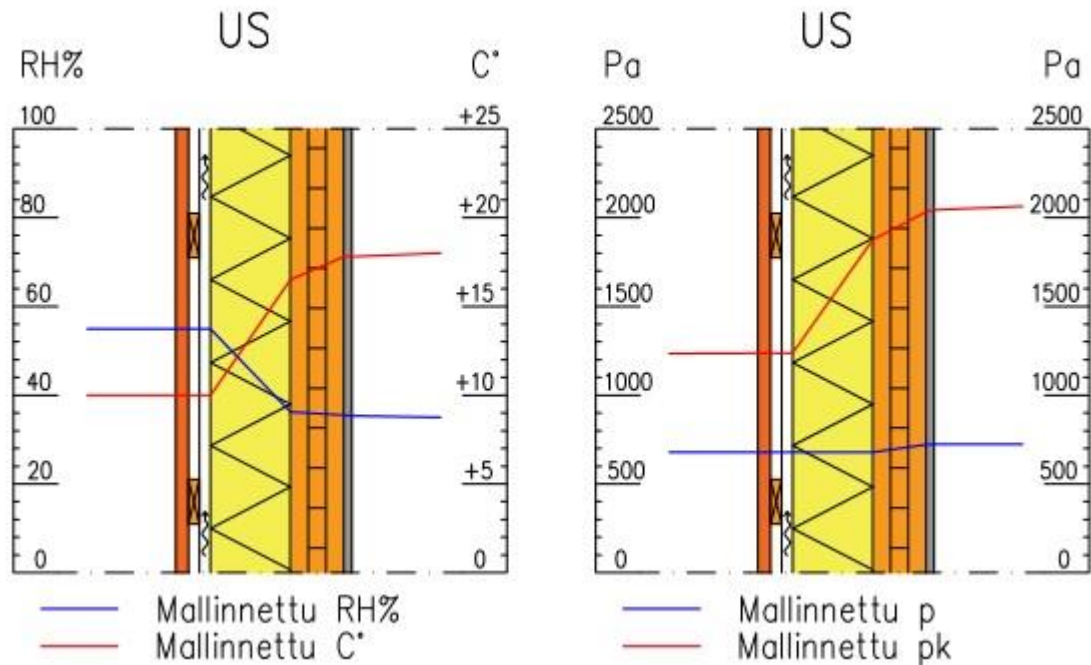
Vesihöyrynosapainetta rakenteen kerroksissa verrataan kyllästymispaineeseen, mikäli osapaine ei ylitä kyllästymispainetta missään rakenteen kerroksissa, ei kondensoitumista tapahdu. Tulokset esitetään graafisesti piirtämällä viiva rakenteen läpi joka kuvaa painetta eri kerroksissa.

5.2 Mallinnetut rakenteet

Mallinnuksessa on käytetty samoja ulko- ja sisäilman lämpö- ja kosteusarvoja, kuin koetalosta saatujen arvojen mittaus hetkellä. Koetalo oli mittaushetkellä asuttamaton, joten sisätilan kosteusarvot voivat sen käyttöönoton jälkeen muuttua. Sääolosuhteet olivat tyypillisiä Suomen kevätajan olosuhteita.

5.2.1 Ulkoseinä

Mallinnuksessa käytetty, kohteelta mitattu ulkolämpötila on +10 °C. Ulkoilman mitattu suhteellinen kosteus taas on 55 %. Sisätiloissa lämpötila on +18 °C, ja suhteellinen kosteus 35 %. Näillä arvoilla mallinnettuna, on kosteuden- ja lämmönsiirtyminen ulkoseinärakenteessa esitetty kuvassa 15.

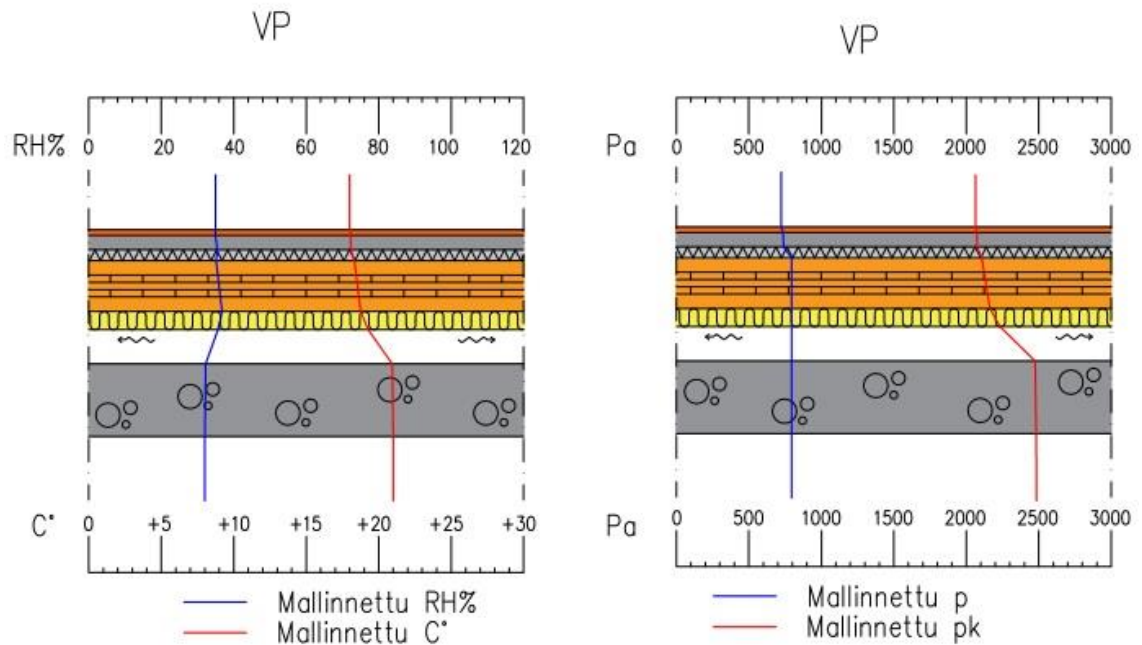


Kuva 7. Mallinnetut ulkoseinärakenteet.

Kuvassa 15 vasemmanpuoleisessa rakenteessa on esitetty lämpötilan ($^{\circ}\text{C}$) ja suhteellisen kosteuden (RH %) siirtyminen rakenteessa. Oikeanpuoleisessa rakenteessa on esitetty lämpötila- ja kosteusarvoista laskemalla saadut osa- ja kyllästymispaineet. Osapainetta kuvaa käyrä (p), ja kyllästymispainetta taas käyrä (pk). Jos osapaine ylittäisi kyllästymispaineen, syntyisi rakenteessa kondenssia. Tarkat mallinnetut arvot esitetty liitteessä 1.

5.2.2 Välipohja

Mallinnuksessa käytetty, kohteelta mitattu ensimmäisen asuinkerroksen lämpötila on $+18^{\circ}\text{C}$. Ensimmäisen asuinkerroksen mitattu suhteellinen kosteus taas on 35 %. Kellarikerroksessa lämpötila on $+21^{\circ}\text{C}$, ja suhteellinen kosteus 32 %. Näillä arvoilla mallinnettuna, on kosteuden- ja lämmönsiirtyminen välipohjarakenteessa esitetty kuvassa 16.

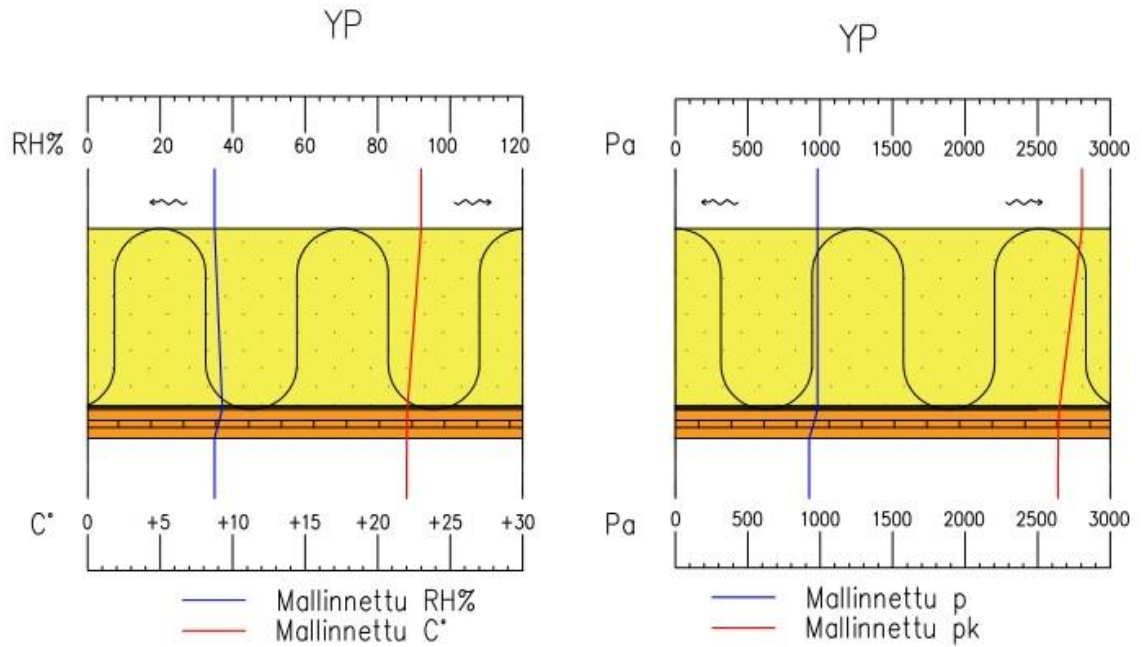


Kuva 8. Mallinnetut välipohjarakenteet.

Kuvassa 16 vasemmanpuoleisessa rakenteessa on esitetty lämpötilan ($^{\circ}\text{C}$) ja suhteellisen kosteuden (RH %) siirtyminen rakenteessa. Oikeanpuoleisessa rakenteessa on esitetty lämpötila- ja kosteusarvoista laskemalla saadut osa- ja kyllästymispaineet. Osapainetta kuvaa käyrä (p), ja kyllästymispainetta taas käyrä (pk). Jos osapaine ylittäisi kyllästymispaineen, syntyisi rakenteessa kondenssia. Tarkat mallinnetut arvot esitetty liitteessä 2.

5.2.3 Yläpohja

Mallinnuksessa käytetty, kohteelta mitattu tuulettuvan ullakon lämpötila on $+23^{\circ}\text{C}$. Ullakon mitattu suhteellinen kosteus taas on 32 %. Ylimmässä asuinkerroksessa lämpötila on $+18^{\circ}\text{C}$, ja suhteellinen kosteus 35 %. Näillä arvoilla mallinnettuna, on kosteuden- ja lämmönsiirtyminen yläpohjarakenteessa esitetty kuvassa 17.



Kuva 9. Mallinnetut yläpohjarakenteet.

Kuvassa 17 vasemmanpuoleisessa rakenteessa on esitetty lämpötilan ($^{\circ}\text{C}$) ja suhteellisen kosteuden (RH %) siirtyminen rakenteessa. Oikeanpuoleisessa rakenteessa on esitetty lämpötila- ja kosteusarvoista laskemalla saadut osa- ja kyllästymispaineet. Osapainetta kuvaa käyrä (p), ja kyllästymispainetta taas käyrä (pk). Jos osapaine ylittäisi kyllästymispaineen, syntyisi rakenteessa kondenssia. Tarkat mallinnetut arvot esitetty liitteessä 3.

6 Mittauslaitteet ja mittausten tuotto

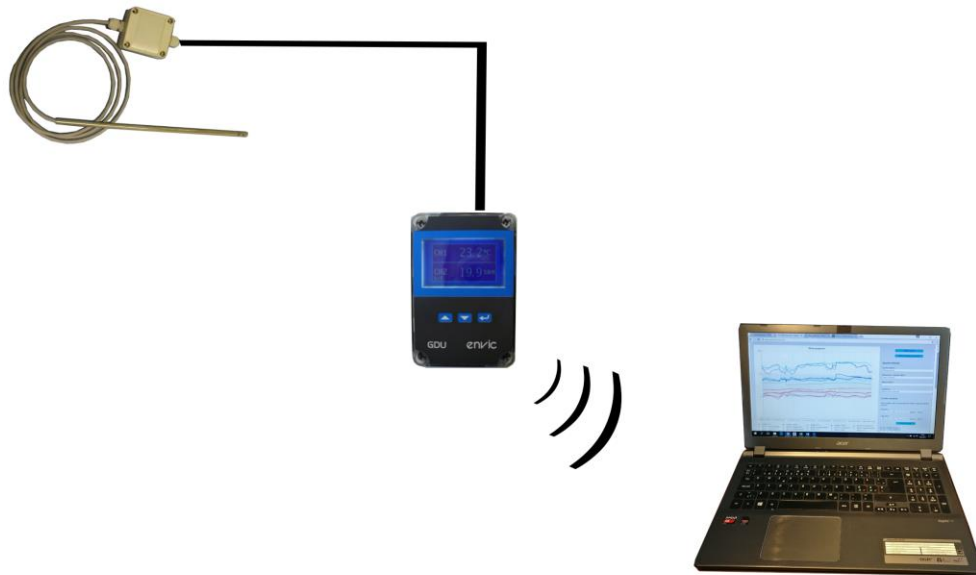
6.1 Mittauslaitteet

Ulko- ja sisätilojen lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittaamiseen käytettiin kuvassa 7 esitettyä käsimittaria. Ulko- ja sisäilmasta mitattuja arvoja käytettiin rakenteiden rakennusfysikaalisessa mallinnuksessa.



Kuva 10. Lämpötila- ja kosteusmittari.

Rakenteissa sijaitsevat anturit on yhdistetty tekniikkakaapeissa sijaitseviin GDU-yksiköihin sähköjohtolla. GDU-yksiköt lähettävät mitatun datan sähköisesti palvelimelle. Tietokoneella pystytään tarkastelemaan dataa internetin kautta langattomasti.



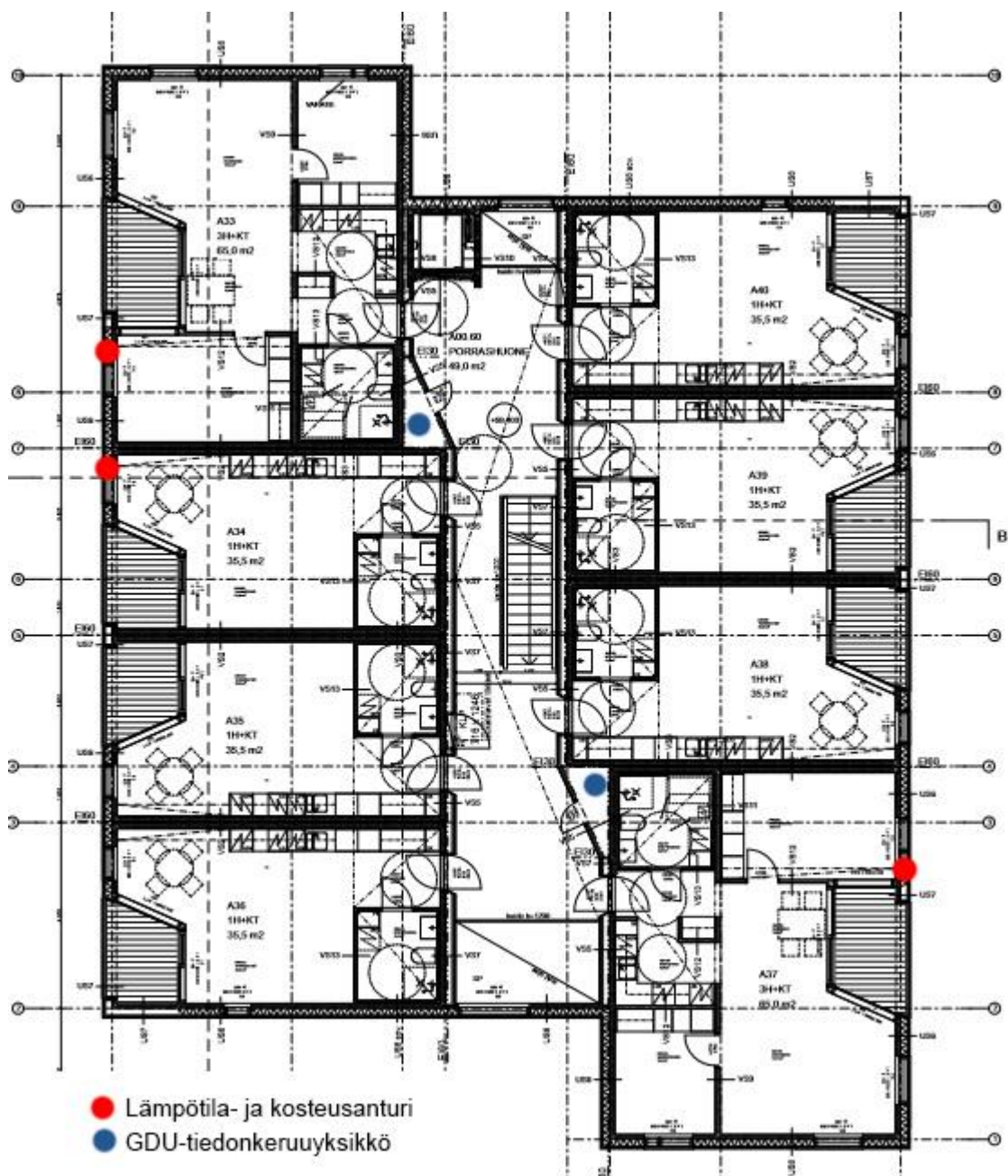
Kuva 11. Havainnekuva datan siirtymisestä.

6.2 Mittaussektorit

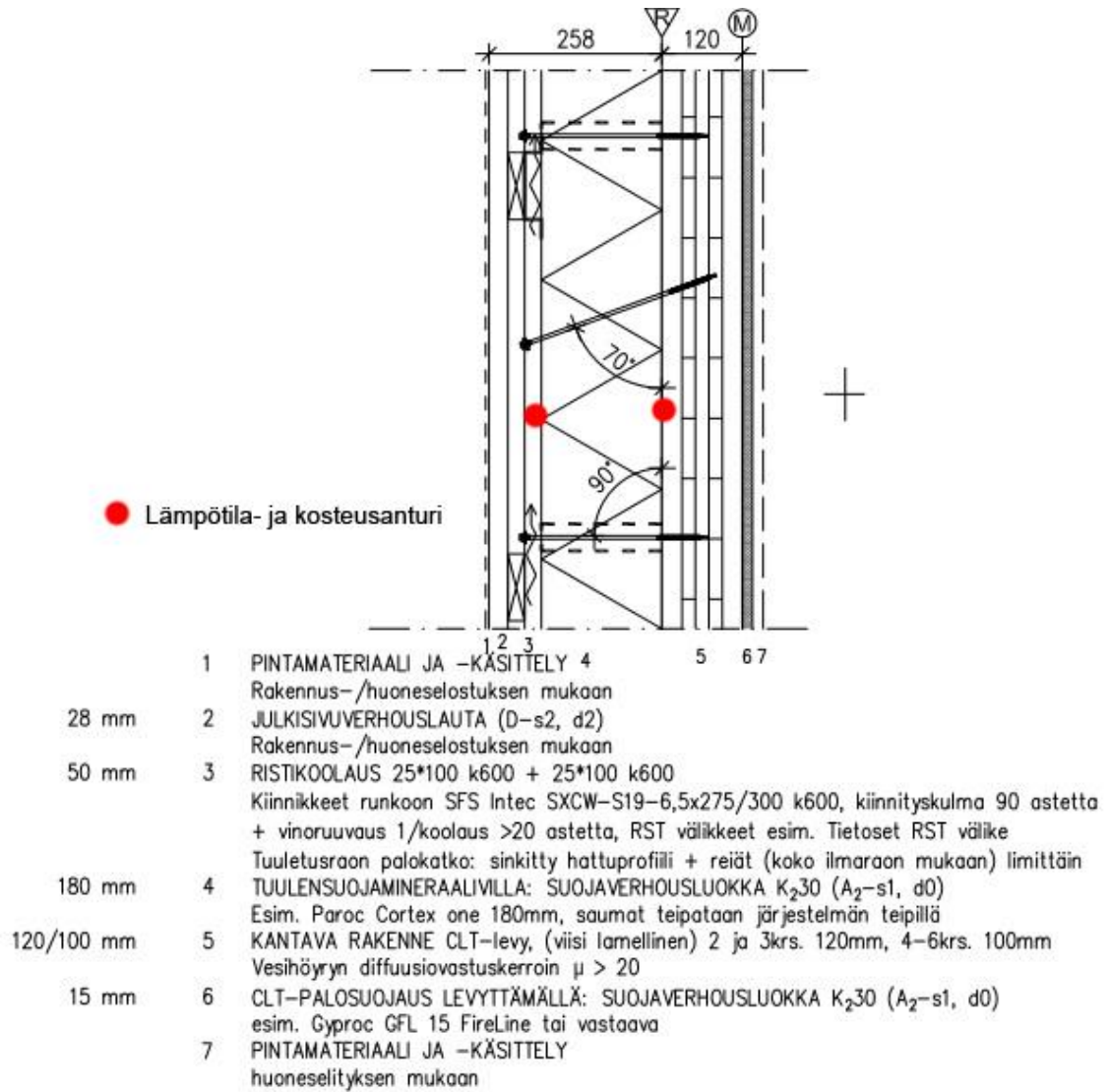
Lämpötila- ja kosteusanturit ovat sijoitettu kolmeen eri rakennetyyppiin: ulkoseinärakenteeseen, välipohjarakenteeseen ja yläpohjarakenteeseen. Tässä tutkimuksessa hyödynnettäviä rakenteen sisäisiä antureita on yhteensä 13 kappaletta. Lisäksi ulko- ja sisäilman mittaamiseen on käytetty erillistä lämpötila- ja kosteusmittaria. GDU-tiedonkeruuyksiköt ovat sijoitettu rakennuksen tekniikka-kaappeihin jotka sijaitsevat rappukäytävän kummassakin päädyssä.

6.2.1 Ulkoseinärakenne

Ulkoseinärakenteessa anturit ovat ensimmäisessä asuinkerroksessa, sekä kolmannessa asuinkerroksessa. Ulkoseinässä anturit ovat sijoitettu lämmöneristeen molemmille puolille. Antureiden ja GDU-yksiköiden tarkka sijainti on esitetty kuvassa 9 ja 10.



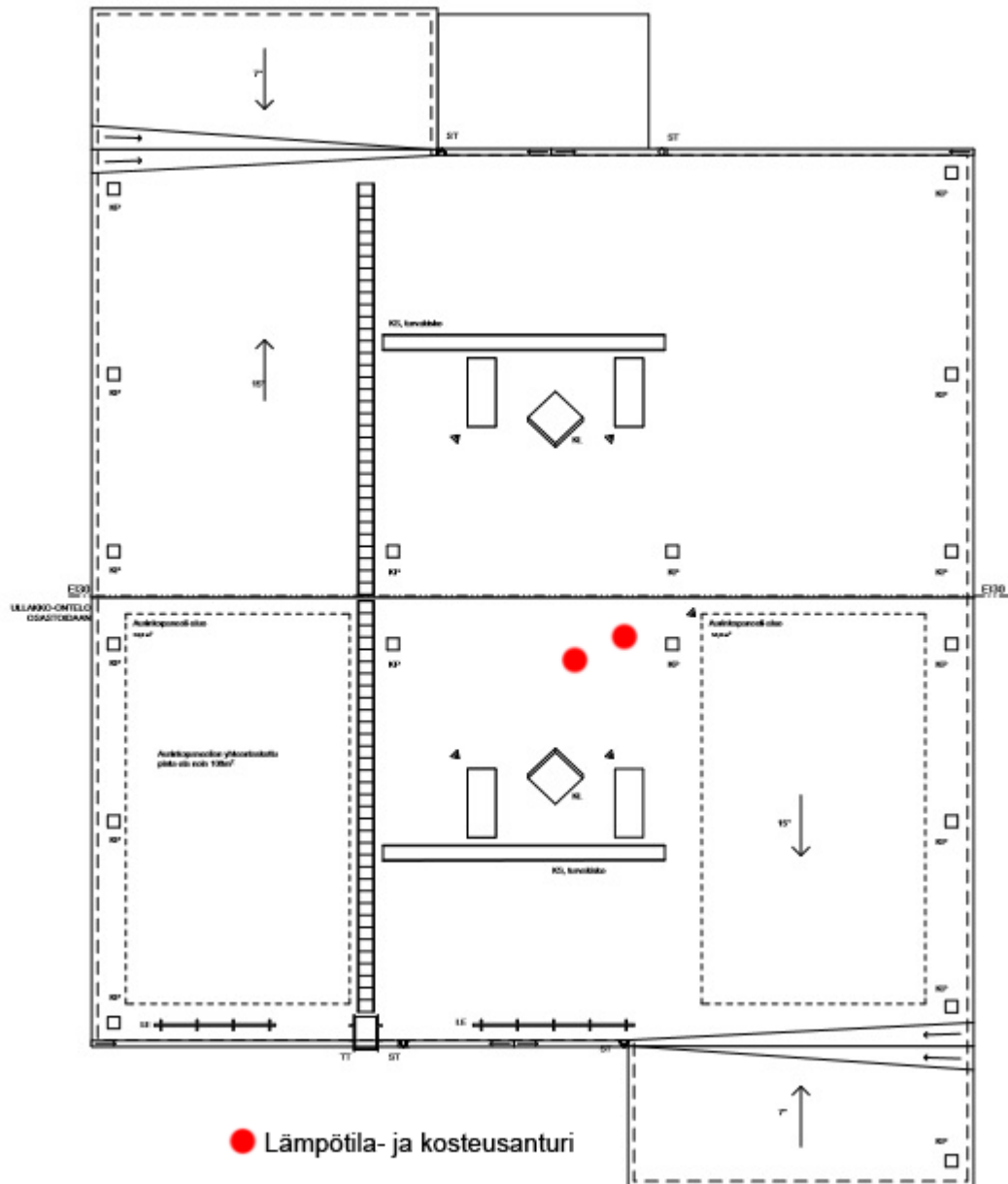
Kuva 12. Ulkoseinääntureiden ja GDU-yksiköiden sijainti pohjapiirroksessa. (Joensuun Juva Oy, 2016.)



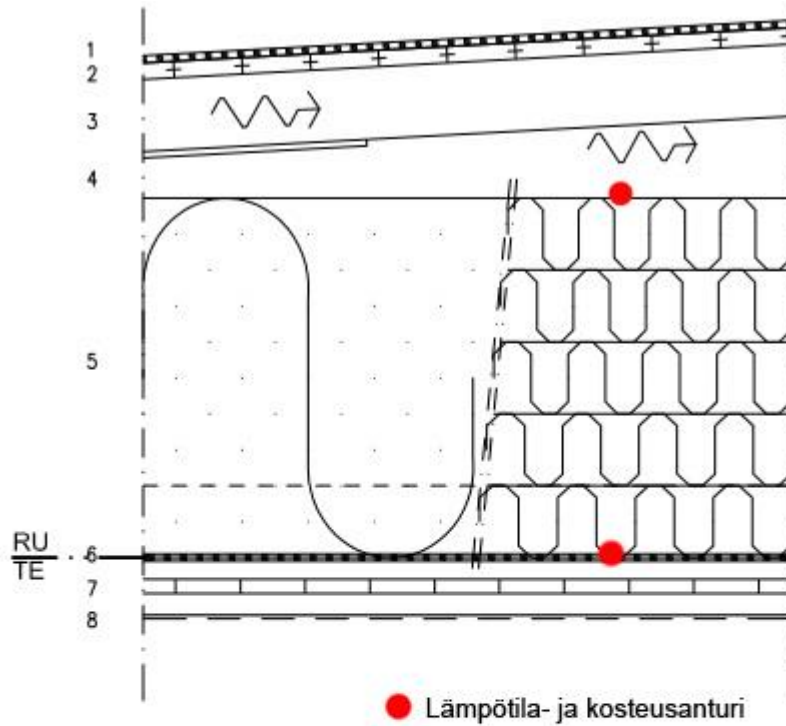
Kuva 13. Antureiden sijainti ulkoseinä rakenteessa. (Joensuun Juva Oy, 2016.)

6.2.2 Yläpohjarakenne

Yläpohjarakenteessa anturit ovat katon harjan läheisyydessä. Yläpohjassa anturit ovat sijoitettu lämmöneristeen ylä- ja alapintaan. Antureiden tarkka sijainti on esitetty kuvassa 11 ja 12.



Kuva 14. Yläpohja-antureiden sijainti kattokuvassa. (Joensuun Juva Oy, 2016.)

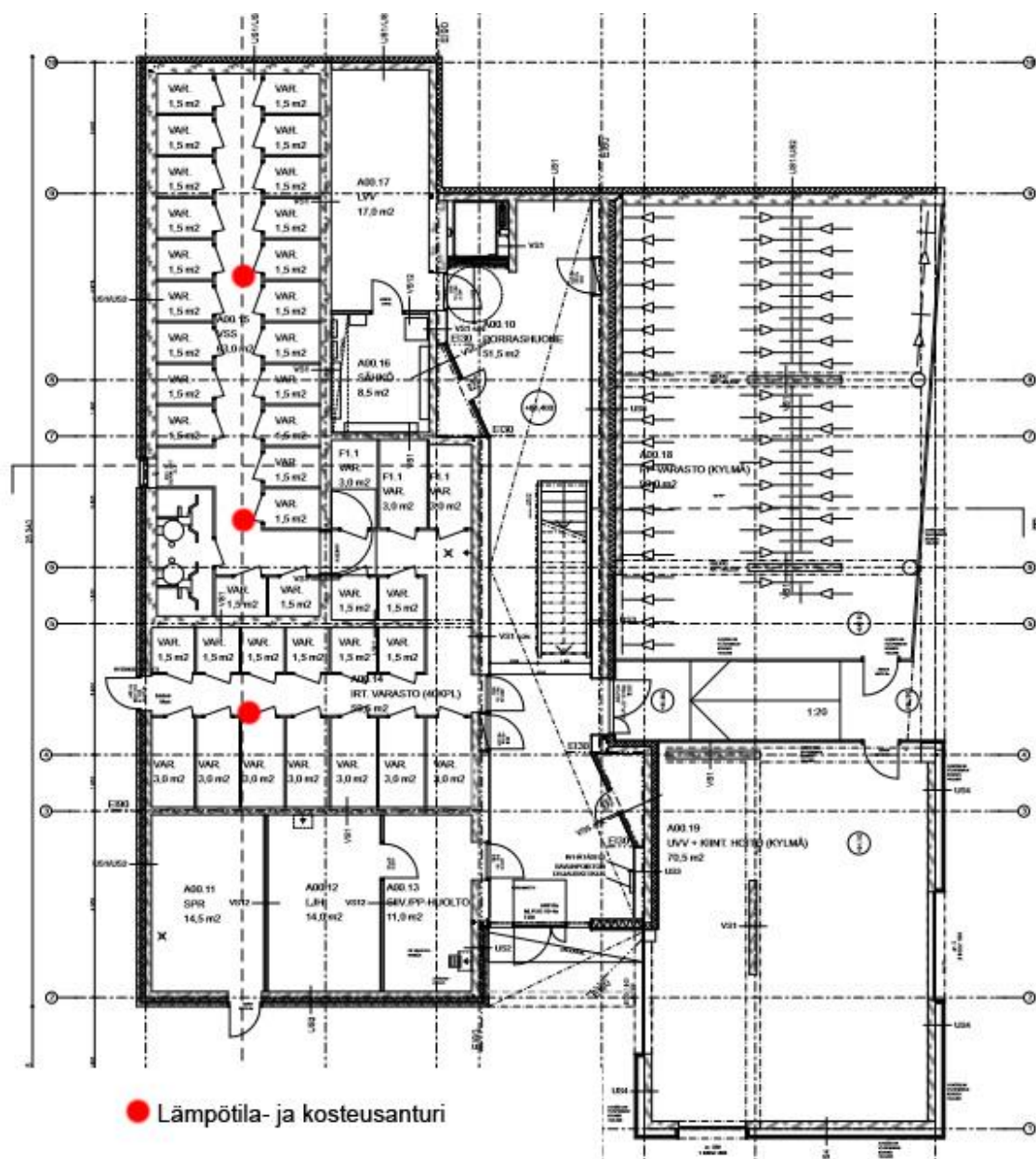


- | | |
|-------|--|
| 18 mm | 1 VESIERISTE
rakennetyypin VE1 mukaan
2 OSB-KATELEVY
3 KATTOKANNATAJAT
rakennesuunnitelmien mukaan
4 TUULETETTU ULLAKKOTILA
5 LÄMMÖNERISTYS
rakennetyypin LE1 mukaan
6 HÖYRYNSULKU (RU) CLT-YLÄPOHJALAATTOJEN SAUMOISSA LEV 0,5cm
Kumibitumikermi, luokka TL2, K-MS 170/3000
Kuumabitumiliimaus B-95/35 ja saumaliimaus
80 mm 7 ALAKATON KANTAVA RAKENNE CLT-levy
8 PINTAMATERIAALI JA -KÄSITTELY
huoneselostuksen mukaan |
|-------|--|

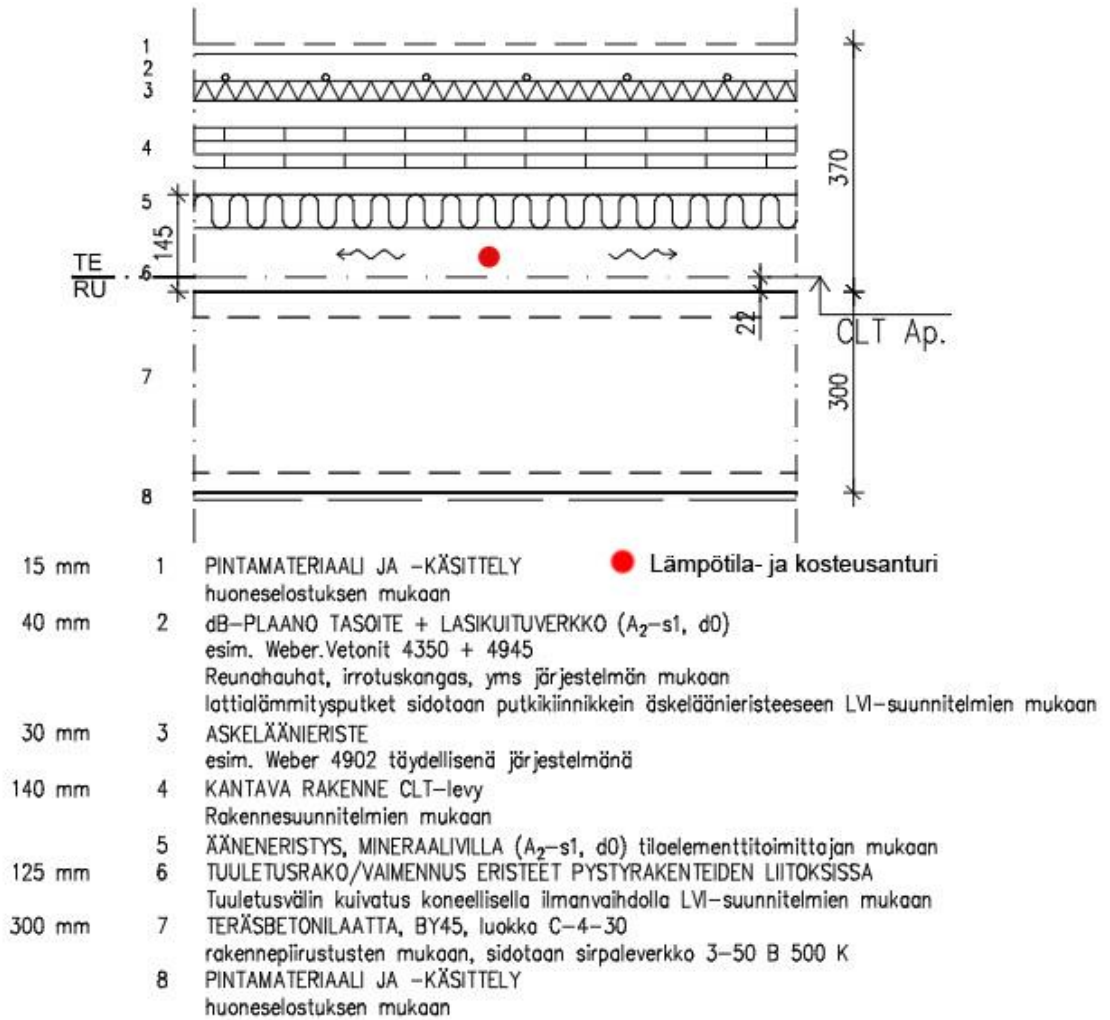
Kuva 15. Antureiden sijainti yläpohjarakenteessa. (Joensuun Juva Oy, 2016.)

6.2.3 Välipohjarakenne

Välipohjassa anturit ovat sijoitettu lämpimän kellarikerroksen, sekä ensimmäisen asuinkerroksen välipohjarakenteeseen. Anturit sijaitsevat tuulettuvassa ilmakerroksessa. Antureiden tarkka sijainti on esitetty kuvassa 13 ja 14.



Kuva 16. Välipohja-antureiden sijainti kellarikerroksen pohjapiirroksessa. (Joensuun Juva Oy, 2016.)

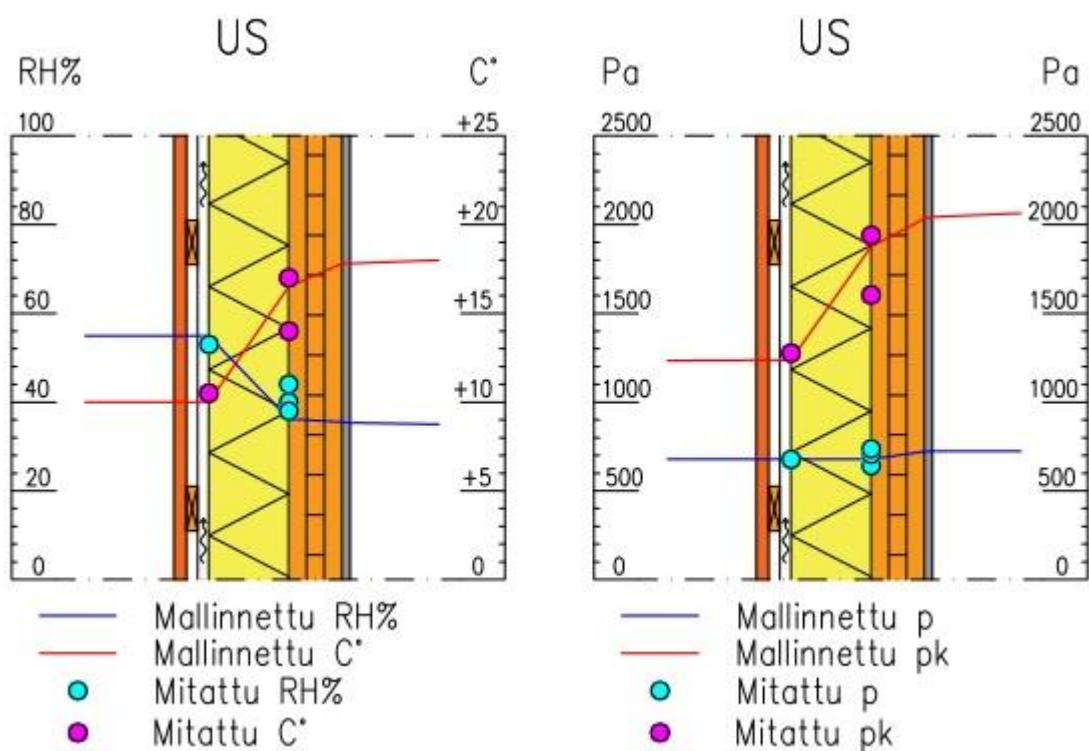


Kuva 17. Antureiden sijainti välipohjarakenteessa. (Joensuun Juva Oy, 2016.)

7 Tulokset

7.1 Ulkoseinärakenteen tulokset

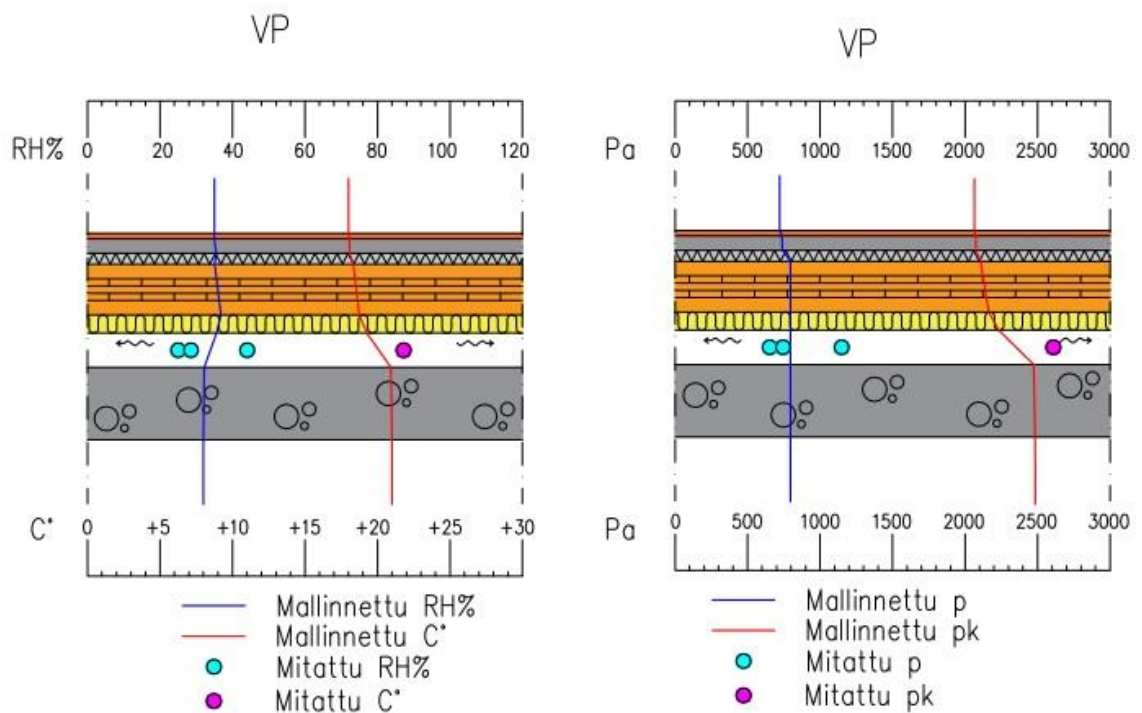
Kuvassa 18 on esitetty mallinnetut lämpö- ja kosteusarvot viivana, sekä mitatut arvot pisteinä ulkoseinärakenteessa. Mitattuja arvoja on otettu ulkoseinärakenteesta kolmesta eri kohtaa, joten mitattujen arvojen pisteitä on näkyvässä kolme kappaletta. Mitatuissa arvoissa on yhtäläisiä tuloksia, joten kaikkien arvojen pisteet eivät saata erottua kuvasta. Mittaus sektorit on esitetty sivulla 30 ja 31. Tarkat mitatut arvot esitetty liitteessä 4.



Kuva 18. Ulkoseinärakenteen mitatut lämpö- ja kosteusarvot.

7.2 Välipohjarakenteen tulokset

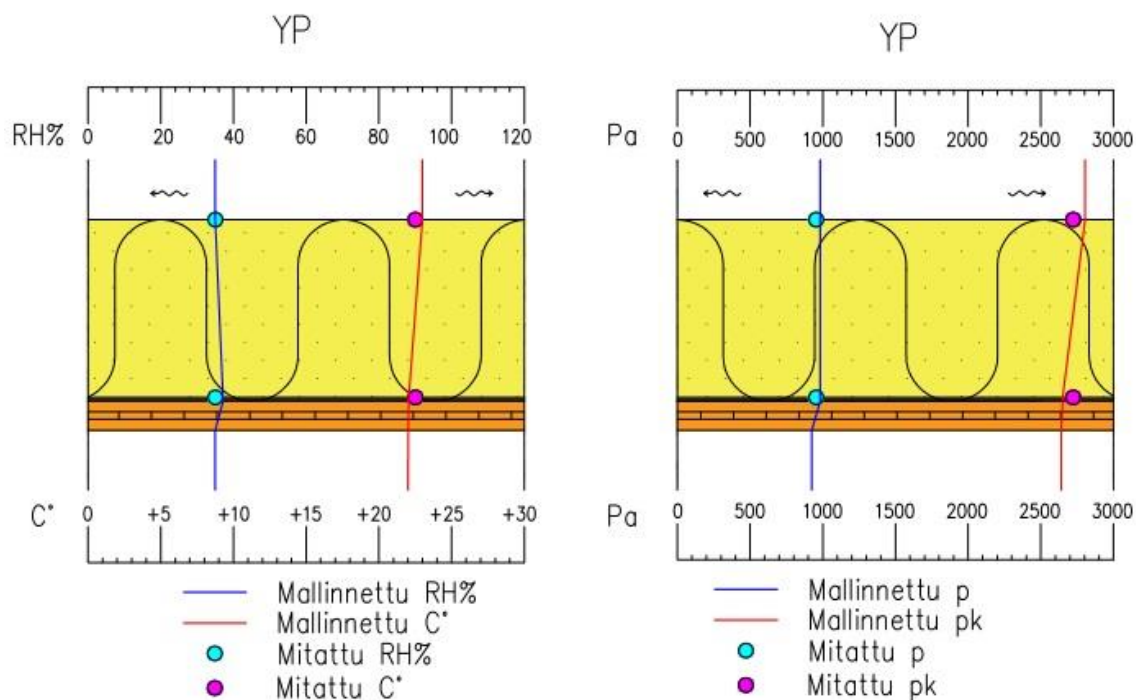
Kuvassa 19 on esitetty mallinnetut lämpö- ja kosteusarvot viivana, sekä mitatut arvot pisteinä välipohjarakenteessa. Mitattuja arvoja on otettu välipohjarakenteesta kolmesta eri kohtaa, joten mitattujen arvojen pisteitä on näkyvässä kolme kappaletta. Mitatuissa arvoissa on yhtäläisiä tuloksia, joten kaikkien arvojen pisteet eivät saata erottua kuvasta. Mittaus sektorit on esitetty sivulla 32 ja 33. Tarkat mitatut arvot esitetty liitteessä 5.



Kuva 19. Välipohjarakenteen mitatut lämpö- ja kosteusarvot.

7.3 Yläpohjarakenteen tulokset

Kuvassa 20 on esitetty mallinnetut lämpö- ja kosteusarvot viivana, sekä mitatut arvot pisteinä yläpohjarakenteessa. Mitattuja arvoja on otettu yläpohjarakenteesta yhdestä kohdasta, joten mitattujen arvojen pisteitä on yksi kappale. Mittaus sektorit on esitetty sivulla 34 ja 34. Tarkat mitatut arvot esitetty liitteessä 6.



Kuva 20. Yläpohja rakenteen mitatut lämpö- ja kosteusarvot.

8 Johtopäätökset

Kosteus- ja lämpömallintamalla rakenteet voidaan todeta, että CLT-rakenteiset rakenteet sopivat Suomen sääolosuhteisiin hyvin. Tilaelementti rakentamistapana on myös sopiva tämänkaltaisiin hankkeisiin.

Tutkimuksen tulokset ovat saatu Suomen kevään sääolosuhteissa, mutta mallintamalla voidaan selvittää rakennusfysikaalinen toimivuus missä olosuhteissa tahansa. Rakenteissa ei synny kondensioriskiä, eikä täten kosteusvaurioita pääse syntymään sääolosuhteiden takia.

Tilaelementti rakennusjärjestelmänä edesauttaa kosteudenhallintaa rakennusvaiheessa. Elementit kootaan valvotuissa tehdasolosuhteissa, joten myös rakennusaikaiset kosteusvauriot voidaan ehkäistä tehokkaasti.

Tulosten mittausajanjakso oli tätä opinnäytetyötä ajatellen lyhyt, pidemmällä datankeruujakolla voitaisiin tulosten luotettavuutta parantaa. Tulevaisuudessa onkin mahdollista seurata koetalon rakennusfysikaalista toimintaa eri vuodenaikoina. Tulosten luotettavuuteen vaikuttaa myös rakenteiden tuulettuvien ilmakerrosten todelliset lämpötila- ja kosteusarvot. Mallinnuksessa käytetyt arvot ovat teoreettiset, kun todellisuudessa arvoihin vaikuttaa eri tekijöitä, joita ei mallintamalla

voida ottaa huomioon. Tällaisia seikkoja ovat esimerkiksi tuulettuvien kerrosten ilmanvaihtuvuudet.

Tällä hetkellä mitattua dataa saadaan jokaisessa rakenteessa yhdestä ainekerroksen rajapinnasta, pois lukien ulkoseinä rakenne jossa antureita on kaksi kappaletta. Anturit ovat sijoitettu riskialttiiseen kohtaan rakenteessa, antureita voisi kuitenkin olla myös useimmissa ainekerroksien rajapinnoissa. Myös sisä- ja ulkoilmaan voitaisiin asentaa etäluettavat anturit, tämä helpottaisi tulosten tarkastelua ja verrattavuutta mallinnukseen.

Opinnäytetyössä ei ole otettu huomioon ilmansuunnan eikä ympäristön vaikutusta rakennusfysikaaliseen käyttäytymiseen, tätä voidaan kuitenkin tarvittaessa tutkia jatkossa. Tulevaisuudessa on myös mahdollista tutkia, kuinka rakennusfysikaalinen toimivuus muuttuu, kun talo on käyttötarkoituksensa mukaisessa toiminnassa.

Lähteet

- Björkholtz, D. 1997. Lämpö ja kosteus rakennusfysiikka. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- Siikanen, U. 2014. Rakennusfysiikka perusteet ja sovelluksia. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- SFS-EN 12086. 2013. Lämmöneristetuotteet rakentamiskäyttöön. Vesihöyrynläpäisyvyyden määrittäminen.
- Ympäristöministeriö, rakennetun ympäristön osasto. 2010 C3 Suomen rakentamismääräyskokoelma.
- Ympäristöministeriö, ohjeet. 2003. C4 Suomen rakentamismääräyskokoelma.
- Puuinfo Oy. 2011. CLT ristiinliimattu massiivipuulevy tekninen tiedote.
<http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/suunnitteluohjeet/clt-ristiinliimattu-massiivipuu-cross-laminated-timber/clt.pdf>.
14.01.2017.
- Puuinfo Oy. 2016. Yleisimmät rakennejärjestelmät.
<http://www.puuinfo.fi/puutieto/puusta-rakentaminen/yleisimm%C3%A4t-rakennej%C3%A4rjestelm%C3%A4t>. 22.02.2017.
- As Oy Joensuun Pihapetäjä. 2016. Joensuun Pihapetäjä.
<http://www.joensuunpihapetaja.fi/joensuun-pihapetaja/>. 14.01.2016.
- Pietiko Oy. 2017. Mittaustulosten raportointi.
<https://pieti.fi/report.php>. 10.05.2017.

Ulkoseinärakenteen mallinnetut arvot.

Rakenne	Ulkoilma			Sisäilma				
US		T [°C]	10	T [°C]	18			
		RH[%]	55	RH[%]	35			
Ainekerros	d [m]	λ [W/(mK)]	R [(m ² K)/W]	T [°C]	RH [%]	p_k [Pa]	δp [kg/msPa]	Z [m ² sPa/kg \cdot p [Pa]
Ulkoilma			0,04	10,0	55	1234,1		679,1
Paroc cortex	0,18	0,033	5,45	10,0	54,9	1238,0		679,1
CLT	0,12	0,11	1,09	16,5	36,2	1876,1	5E-09	4E+07
Gyproc	0,018	0,25	0,07	17,8	35,5	2033,8	2E-12	6E+10
Sisäilma			0,13	17,8	35,4	2044,6	2E-11	9E+08
Σ			6,79	18,0	35,0	2064,3		6E+10
U-arvo	0,147							

Ulkoseinärakenteen mitatut arvot.

Rakenne	Ulkoilma			Sisäilma			
US1 / 1		T [°C]	10	T [°C]		18	
		RH%:	55	RH%:		35	
Ainekerros	d [m]	λ [W/(mK)]	R [(m ² K)/W]	T [°C]	RH [%]	pk [Pa]	p [Pa]
				10,0	55,0	1234	679
Ulkoilma			0,04				
				10,5	53,0	1276	676
Paroc cortex	0,18	0,033	5,45				
				17,0	38,0	1939	737
CLT	0,12	0,11	1,09				
				-	-	-	-
Gyproc	0,018	0,25	0,07				
				-	-	-	-
Sisäilma			0,13				
				18,0	35,0	2064	722
Σ			6,79				
U-arvo	0,147						

Rakenne	Ulkoilma			Sisäilma			
US1 / 2		T [°C]	10	T [°C]		18	
		RH%:	55	RH%:		35	
Ainekerros	d [m]	λ [W/(mK)]	R [(m ² K)/W]	T [°C]	RH [%]	pk [Pa]	p [Pa]
				10,0	55,0	1234	679
Ulkoilma			0,04				
				10,5	53,0	1276	676
Paroc cortex	0,18	0,033	5,45				
				14,0	40,0	1603	641
CLT	0,12	0,11	1,09				
				-	-	-	-
Gyproc	0,018	0,25	0,07				
				-	-	-	-
Sisäilma			0,13				
				18,0	35,0	2064	722
Σ			6,79				
U-arvo	0,147						

Rakenne	Ulkoilma			Sisäilma			
US1 / 3		T [°C]	10	T [°C]		18	
		RH%:	55	RH%:		35	
Ainekerros	d [m]	λ [W/(mK)]	R [(m ² K)/W]	T [°C]	RH [%]	pk [Pa]	p [Pa]
				10,0	55,0	1234	679
Ulkoilma			0,04				
				10,5	53,0	1276	676
Paroc cortex	0,18	0,033	5,45				
				14,0	44,0	1603	705
CLT	0,12	0,11	1,09				
				-	-	-	-
Gyproc	0,018	0,25	0,07				
				-	-	-	-
Sisäilma			0,13				
				18,0	35,0	2064	722
Σ			6,79				
U-arvo	0,147						

Välipohjarakenteen mitatut arvot.

Rakenne						1 krs.	
VP/ 1						T [°C]	18
						RH%:	35
Ainekerros	d [m]	λ [W/(mK)]	R [(m ² K)/W]	T [°C]	RH [%]	pk [Pa]	p [Pa]
				21,0	32,0	2484	795
Kellari			0,17	-	-	-	-
Betoni	0,3	1,7	0,18	-	-	-	-
Ilmarako	0,125	0,025	5,00	21,8	28,5	2608	743
Mineraalivilla	0,05	0,033	1,52	-	-	-	-
CLT	0,14	0,11	1,27	-	-	-	-
Askeläänieriste	0,03	0,039	0,77	-	-	-	-
dB-plaano tasoite	0,04	0,8	0,05	-	-	-	-
1 krs.			0,17	18,0	35,0	2064	722
Σ			9,12				
U-arvo	0,110						
Rakenne						1 krs.	
VP/ 2						T [°C]	18
						RH%:	35
Ainekerros	d [m]	λ [W/(mK)]	R [(m ² K)/W]	T [°C]	RH [%]	pk [Pa]	p [Pa]
				21,0	32,0	2484	795
Kellari			0,17	-	-	-	-
Betoni	0,3	1,7	0,18	-	-	-	-
Ilmarako	0,125	0,025	5,00	21,8	44,0	2608	1148
Mineraalivilla	0,05	0,033	1,52	-	-	-	-
CLT	0,14	0,11	1,27	-	-	-	-
Askeläänieriste	0,03	0,039	0,77	-	-	-	-
dB-plaano tasoite	0,04	0,8	0,05	-	-	-	-
1 krs.			0,17	18,0	35,0	2064	722
Σ			9,12				
U-arvo	0,110						
Rakenne						1 krs.	
VP/ 3						T [°C]	18
						RH%:	35
Ainekerros	d [m]	λ [W/(mK)]	R [(m ² K)/W]	T [°C]	RH [%]	pk [Pa]	p [Pa]
				21,0	32,0	2484	795
Kellari			0,17	-	-	-	-
Betoni	0,3	1,7	0,18	-	-	-	-
Ilmarako	0,125	0,025	5,00	21,8	25,0	2608	652
Mineraalivilla	0,05	0,033	1,52	-	-	-	-
CLT	0,14	0,11	1,27	-	-	-	-
Askeläänieriste	0,03	0,039	0,77	-	-	-	-
dB-plaano tasoite	0,04	0,8	0,05	-	-	-	-
1 krs.			0,17	18,0	35,0	2064	722
Σ			9,12				
U-arvo	0,110						

Yläpohjarakenteen mitatut arvot.

Rakenne	Ullakko			Sisäilma			
YP1 / 1			T [°C]	23	T [°C]	22	
			RH%:	35	RH%:	35	
Ainekerros	d [m]	λ [W/(mK)]	R [(m ² K)/W]	T [°C]	RH [%]	pk [Pa]	p [Pa]
				23,0	35,0	2805	982
Ullakko			0,04				
				22,5	35,0	2722	953
Mineraalivilla	0,50	0,033	15,15				
				22,5	35,0	2722	953
Kumibitumikermi	0,01	0,11	0,09				
				-	-	-	-
CLT	0,08	0,11	0,73				
				-	-	-	-
Sisäilma			0,10				
				22,0	35,0	2640	924
Σ			16,11				
U-arvo	0,062						