

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Rakennustekniikan koulutus

Risto Kortelainen

PUUKERROSTALON RUNGON PAINUMAT JA
ULKOSEINÄRAKENTEEN RAKENNUSFYSIKAALINEN TOIMINTA

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2019



OPINNÄYTETYÖ
Maaliskuu 2019
Rakennustekniikan koulutus

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
+358 13 260 600

Tekijä
Risto Kortelainen

Nimike
Puukerrostalon rungon painumat ja ulkoseinärakenteen rakennusfysikaalinen toiminta

Toimeksiantaja
Karelia-amk, Joensuu Lighthouse – tutkimus- ja kehitystoimenpiteet

Tiivistelmä

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia LVL- ja CLT-rakenteisen puukerrostalon kantavan rungon painumista ja ulkoseinärakenteen lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa. Työn tutkimuskohteena toimi Joensuun Ellin rakennuttama 14-kerroksinen Joensuu Lighthouse. Kohde on valmistuessaan Suomen korkein puukerrostalo. Rungon painumista ja ulkoseinärakenteen rakennusfysikaalista toimintaa haluttiin tutkia kohteessa, koska vastaavanlaisen yli 8-kerroksisen puukerrostalon suunnittelusta tai rakentamisesta ei ole Suomessa toistaiseksi kokemuksia.

Tässä työssä käsitellään Joensuu Lighthousen rakentamiseen käytettyä suurelementtijärjestelmää ja sen kantavissa rakenteissa käytettäviä insinööripuutuotteita. Lisäksi työssä käydään lävitse puukerrostalorakentamista ja sen ympäristöhyötyjä, sekä oleellisimpia rakennusfysikaalisia lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan liittyviä asioita.

Puukerrostalon painumamittauksia varten työssä käytettiin Karelia-ammattikorkeakoulun valmistamia rungon painumaa mittaavia laitteita, joissa hyödynnettiin Novotechin valmistamia asentosensoreita. Ulkoseinän lämpötila- ja kosteusmittauksiin käytettiin Wiiste SolidRH -mittalaitteita. Tuloksista selvisi, että painuma oli alle 1,5 mm / kerros. Rakennusfysikaalisissa mittauksissa saatiin selville, että ulkoseinärakenne toimii kuten on suunniteltukin.

Kieli
suomi

Sivuja 45
Liitteet 4
Liitesivumäärä 5

Asiasanat
puukerrostalo, painuma, lämpö, kosteus



THESIS
March 2019
Degree Programme in Civil Engineering

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
FINLAND
+358 13 260 600

Author
Risto Kortelainen

Title
The Structural Settlement and the Physical Behavior of an Exterior Wall of a
Wooden High-Rise Building

Commissioned by
Karelia UAS / Joensuu Lighthouse – research and development

Abstract

The aim of this thesis was to study the settlement of load-bearing structures and the physical behavior of an exterior wall of a wooden high-rise building made from CLT and LVL elements. The research for this thesis was done in the Joensuu Lighthouse which is built by Student Housing Company Joensuun Elli. When completed it will be the highest wooden high-rise building in Finland. The reason for studying the settlement of load bearing structures and the physical functionality of an exterior wall wanted to be researched was the lack of experience in designing and constructing a wooden high-rise building taller than 8 floors.

The thesis describes a prefabricated element system used in Joensuu Lighthouse and engineered wood products used in the load-bearing structures of the building. In addition, the thesis deals with the construction of a wooden high-rise buildings and their environmental benefits as well as the most essential matters of building engineering physics.

The devices for the settlement measurements based on Novotech's position sensors and were built by Karelia University of Applied Sciences. Wiiste SolidRH sensors were used for the physical measurements of exterior wall. The results indicated that the settlement was less than 1.5 mm per floor. The physical measurements showed that the exterior wall structure is working as planned.

Language
Finnish

Pages 45
Appendices 4
Pages of Appendices 5

Keywords
wooden high-rise building, settlement, heat, humidity

Sisältö

1	Johdanto.....	6
1.1	Tausta.....	6
1.2	Tavoite.....	7
1.3	Rajaus	7
2	Puukerrostalot.....	8
2.1	Puukerrostalorakentaminen Suomessa	8
2.2	Rakentamisen tulevaisuus.....	9
2.3	Puukerrostalo suurelementeistä	10
2.4	Joensuun Pihapetäjä	11
2.5	Lighthouse - Suomen korkein puukerrostalo.....	12
3	Puukerrostalon rungon painuminen	15
3.1	Painuminen.....	15
3.2	Viilupuun (LVL)	15
3.2.1	Viilupuun valmistus	15
3.2.2	Viilupuun ominaisuudet	16
3.3	Monikerroslevy (CLT)	17
3.3.1	CLT:n valmistus	17
3.3.2	CLT:n ominaisuudet.....	18
4	Ulkoseinärakenteen rakennusfysikaalinen toiminta	20
4.1	Lämpö.....	20
4.1.1	Lämmön siirtymistavat	20
4.1.2	Lämmönläpäisykerroin	21
4.1.3	Lämmöneristys.....	22
4.2	Kosteus.....	23
4.2.1	Kosteuden siirtymistavat	24
4.2.2	Rakennekosteus	25
4.2.3	Kondensoituminen	27
4.2.4	Suhteellinen kosteus (RH %)	27
4.2.5	Höyrynsulku	30
4.2.6	Rakennusaikainen kosteudenhallinta.....	30
5	Tutkimukset.....	32
5.1	Rungon painuminen.....	32
5.1.1	Mittausmenetelmä.....	32
5.1.2	Mittaustulokset	33
5.1.3	Mittaustulosten luotettavuus.....	35
5.2	Rakennusfysikaalinen toiminta	36
5.2.1	Mittausmenetelmä.....	36
5.2.2	Mittaustulokset	38
5.2.3	Mittaustulosten luotettavuus.....	40
6	Pohdinta.....	41
	Lähteet.....	43

Liitteet

Liite 1	Rungon painumaa mittaavien laitteiden asennuspaikat
Liite 2	Rungon painumien mittaustulokset
Liite 3	T/RH % - mittalaite, Pro dual KLHJ 100
Liite 4	T/RH % - mittalaite, Wiiste SolidRH

1 Johdanto

1.1 Tausta

Sain opinnäytetyön aiheen Karelia-ammattikorkeakoulun rakennustekniikan koulutusohjelman erityisasiantuntija Timo Pakariselta, joka toimi myös tämän opinnäytetyön ohjaavana opettajana. Opinnäytetyö kuuluu Karelia-ammattikorkeakoulun ja ympäristöministeriön rahoittamaan Joensuu Lighthouse – tutkimus- ja kehystoimenpiteet -tutkimushankkeeseen. Hankkeen tarkoituksena on kerätä monenlaista informaatiota kohteesta, sillä Suomessa ei ole aikaisempaa kokemusta yli 8-kerroksisten puukerrostalojen suunnittelusta ja rakentamisesta.

Oma mielenkiintoni puurakentamista kohtaan ajoi omaa aiheen valintaa. Lisäksi kyseisen aiheen valitsemisen teki helpoksi se, että vain harva pääsee olemaan osana näin isoa puurakentamista edistävää hanketta. Hanke on merkittävä Suomen lisäksi koko maailman mittakaavassa. Oli mielenkiintoista huomata, että Suomen korkeimman puukerrostalon rakentaminen herätti laajaa kiinnostusta niin oppilaitoksella kuin esimerkiksi mediassa hyvissä ajoin ennen kuin kerrostalon rakentaminen oli vielä alkanutkaan.

Ilmastonmuutoksesta on oltu tietoisia pitkään, mutta silti siihen ollaan reagoimassa kunnolla vasta nyt. Sen takia myös rakentamisessa eletään tietynlaista murrosvaihetta. Tulevaisuudessa kasvihuonekaasupäästöjen ja energiankulutuksen vähentäminen vaikuttavat merkittävästi rakentamispäätöksiin. Nykyisin rakentamisessa käytetään vielä paljon uusiutumattomien luonnonvarojen, mutta tulevaisuudessa niiden kulutusta on vähennettävä. Samalla uusiutuvien raaka-aineiden ja materiaalien, kuten puun käyttöä tulee lisätä. Olen huomannut monien olevan tietämättömiä esimerkiksi siitä, että Suomessa puun käyttöä voidaan lisätä kestävästi, koska metsien käyttö on pienempää kuin kasvu. Rakentamisen suurimmat kasvumahdollisuudet Suomessa ovatkin juuri puurakentamisessa. Joensuussa on lähdetty rohkeasti mukaan puukerrostalorakentamisen edistämiseen.

1.2 Tavoite

Opinnäytetyössä tutkitaan Joensuun Penttilän kaupunginosaan rakennettavan 14-kerroksisen puukerrostalon rungon painumista ja ulkoseinärakenteen rakennusfysikaalista toimintaa. Rungon painumista halutaan tutkia, sillä näin suurta puukerrostaloa ei Suomeen ole aiemmin rakennettu. Lisäksi halutaan verrata tässä opinnäytetyössä käytettävää painuman mittaustapaa aiemmin toisessa Joensuussa sijaitsevassa puukerrostalossa (Joensuun Pihapetäjä) käytettyyn mittaustapaan.

Lämpötila- ja kosteusmittauksissa tutkitaan korkean puukerrostalon puurunkoisen ulkoseinärakenteen rakennusfysikaalista toimintaa itäsuomalaisessa tuulisessa ja kosteassa ympäristössä Pielisjoen rannassa. Tässä opinnäytetyössä ei tehdä mallintavia tuloksia tietokoneohjelmalla tai suoriteta mittaustulosten vertailua laskennallisiin tuloksiin. Mittaustuloksia arvioidaan ja vertaillaan aiemmin rakennettujen puukerrostalokohteiden tuloksiin.

1.3 Rajaus

Tavoitteena on saada mittauksissa tuloksia useamman kuukauden ajalta, jotta voitaisiin seurata painuman kehittymistä pidemmällä aikavälillä ja nähdä sääolosuhteiden vaihtelun merkitys ulkoseinärakenteelle lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittauksissa. Painumamittaukset suoritetaan siten, että yksi mittalaite asennetaan puukerrostaloon aina kolmen kerroksen välein hissikuilun yhteyteen. Poikkeuksen tekee toiseksi ylin mittaustulolinja, jossa yksi laite mittaa ainoastaan 11. kerroksen painumia. Yhteensä kerrostaloon asennetaan 5 painumia mittaavaa mittalaitetta. Mittaustulokset raportoidaan jokaiselta mittalaitteelta.

Ulkoseinärakenteen rakennusfysikaalisia mittauksia varten ulkoseinien eri rakennekerrokseen asennetaan mittalaitteita Karelia-ammattikorkeakoulun ja Opiskelijasunnnot Oy Joensuun Ellin toimesta. Mittalaitteet on tarkoitus asentaa seinän neljään eri rakennekerrokseen, jotta saadaan mahdollisimman laajaa dataa rakenteen toimivuudesta.

2 Puukerrostalot

2.1 Puukerrostalorakentaminen Suomessa

Puukerrostalojen historia ulottuu Suomessa 1990-luvun puoleen väliin, jolloin Ylöjärvellä, Oulussa ja Helsingissä käynnistettiin ensimmäiset koerakentamishankkeet. Hankkeilla tavoiteltiin hyvälaatuisia kerrostaloja, joissa käytettäisiin puuta rungon lisäksi myös julkisivussa. Lisäksi haluttiin kehittää uusia ratkaisuja arkkitehtuuriin sekä rakennusteknisiin suunnitteluratkaisuihin. Vuonna 1997 paloturvallisuusmääräykset uudistettiin hyvien kokemusten perusteella. 2000-luvun puolella välissä puukerrostalorakentaminen väheni huomattavasti, mutta vuoden 2009 alusta sitä lähdettiin edistämään uudelleen Ruotsista kuultujen hyvien kokemusten ansiosta. Uutta alkua vauhditti muun muassa isojen metsäyhtiöiden innostus kehittämään puurakentamisen järjestelmiä sekä nopea puurakentamisen teollistuminen. [1,16–18.]

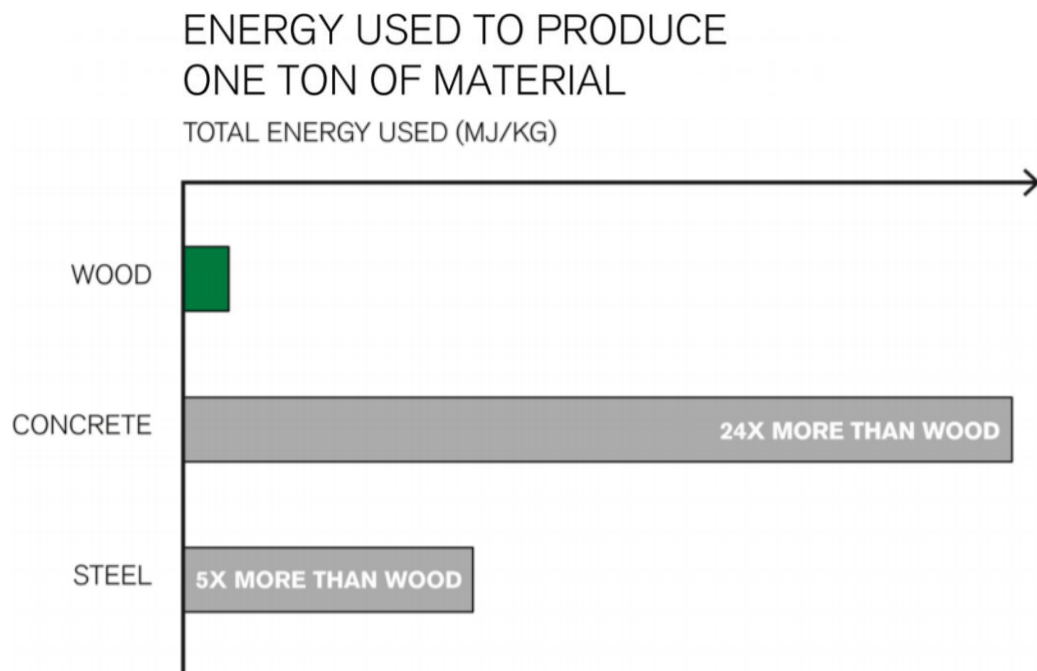
Innustus jatkoi kasvuaan, ja vuonna 2011 palomääräykset uudistettiin. Uudistuksen myötä puukerrostalot sallittiin rakennettavaksi jopa 8-kerroksisiksi. Energia- tehokkuuteen, ympäristöön ja ekologisuuteen liittyvät kysymykset tuntuvat kiinnostavan toimijoita ja asiakkaita yhä enemmän. Puukerrostalorakentaminen on ollut näkyvästi esillä mediassa, ja myös suuri yleisö on kiinnostunut tästä rakentamistavasta. [1, 19.]

Suomeen on 2018 marraskuuhun mennessä valmistunut yhteensä 65 asuinpuukerrostaloa, joissa on yhteensä 1 673 asuntoa. Asuinpuukerrostalojen lisäksi Suomeen on rakennettu 4 puukerrostaloa toimitiloiksi. [2.] Suomessa on tällä hetkellä vireillä yhteensä 51 puukerrostalohanketta, jotka ovat joko yksittäisiä kerrostaloja tai useammista kerrostaloista koostuvia puukerrostalokokonaisuuksia. [3.] Uutta puurakentamisinnostusta kuvaa myös se, että Suomeen vuosina 1995–2018 rakennetusta 65 asuinpuukerrostalosta peräti 34 on valmistunut vuoden 2010 jälkeen. [4.]

2.2 Rakentamisen tulevaisuus

Uusiutuvien raaka-aineiden ja keveiden rakenteiden käyttöä tulisi suosia rakentamisessa, mutta valitettavasti ainakin vielä tällä hetkellä rakentamiseen käytävistä raaka-aineista suurin osa on uusiutumattomia. Puun raaka-aineisuus rakentamisessa on Suomessa 40 %. Se on paljon verrattuna esimerkiksi koko Eurooppaan, jossa puun osuus on ainoastaan 4 %. Euroopan teollisuudessa rakentaminen kuluttaa painon mukaan raaka-aineita jopa 50 %, mikä tekee rakentamisesta Euroopan teollisuuden suurimman raaka-aineiden kuluttajan. [5.]

Rakentamisen synnyttämä jätekuorma tuottaa Euroopan unionin tekemän tutkimushankkeen mukaan jopa 40–50 % Euroopan kokonaisjätteistä. Suuri osa hiilidioksidipäästöistä ja energiankulutuksesta aiheutuu rakennusten käytöstä. Suomessa jopa yli 10 % energiankulutuksesta ja hiilidioksidipäästöistä aiheutuu rakennustuotteiden valmistuksesta. Peräti yli 90 % syntyy pelkästään teräksen ja sementin valmistuksesta. [5.] Kuvassa 1 on esitettyä Georgian metsäyhdistyksen mallintama pylväskuvaaja energiankulutuksesta eri materiaalien valmistuksessa.



Kuva 1. Energiankulutus puun, betonin ja teräksen tuotannossa [6, 7].

Maapallon muuttuvien ympäristöolosuhteiden vuoksi ihmisiä ohjataan kohti pienempää hiilijalanjälkeä, jota voidaan edesauttaa esimerkiksi lisäämällä puukerrostalorakentamista. Suomessa kerrostalorakentamiseen käytetään tällä hetkellä pääasiassa betonia.

Puutalot ovat ympäristöystävällisiä, sillä ne tuottavat elinkaarensa aikana selvästi vähemmän päästöjä kuin esimerkiksi betoniset tai teräksiset talot. Puutalon rakenteet varastoivat hiilidioksidia itseensä pitkäksi aikaa. Esimerkiksi tavanomainen puusta rakennettu suomalainen pientalo sitoo rakenteisiinsa ilman hiilidioksidia jopa 30 tonnia. [5.]

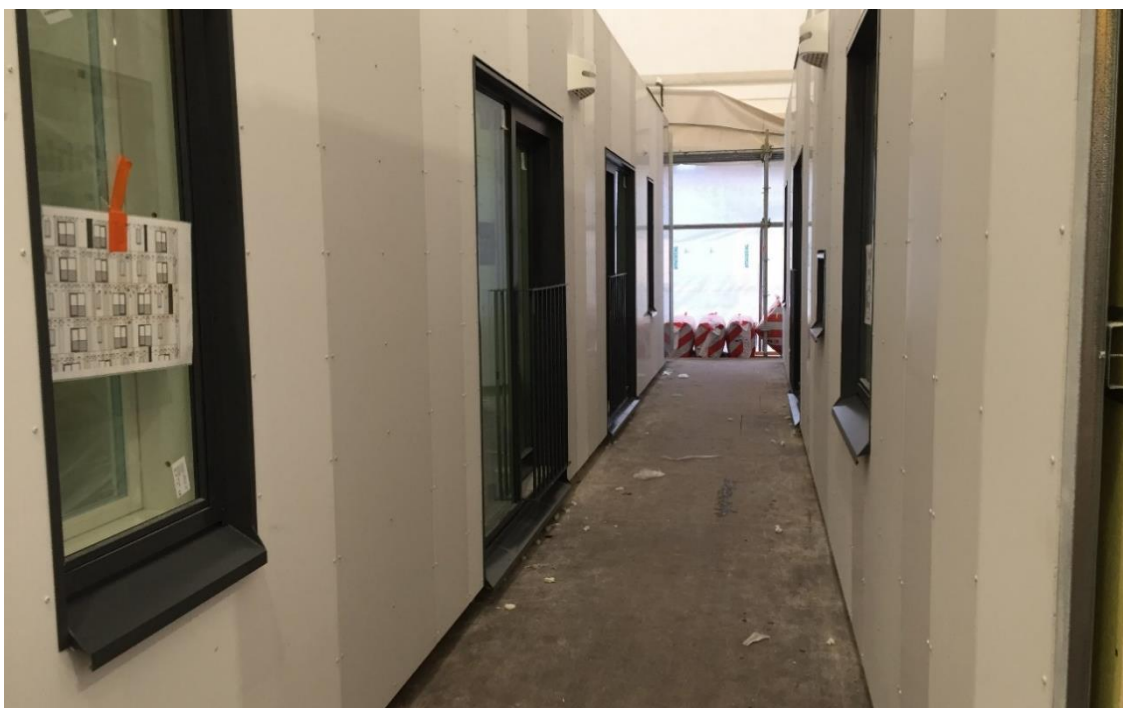
Yli 75 % Suomen pinta-alasta on metsää. Suomessa metsät kasvavat vuosittain yli 100 miljoonalla m³:llä. Vaikka suomalaisen metsäteollisuuden käyttämä kotimaisen raakapuun määrä on viime vuosina ollut keskimäärin noin 55 miljoonaa m³, on metsiemme hoito kestävä. Metsiemme käyttöä voitaisiin tällä hetkellä lisätä kestävästi noin 20 miljoonalla m³:llä. Samalla puun käyttö työllistää, ja tätä työllistävää vaikutusta voidaan lisätä esimerkiksi jalostusarvon kasvattamisella, puutuotteiden viennillä ja puurakentamisen määrää lisäämällä. [1, 11–12.]

Ruotsissa on todettu puukerrostalon tulevan betonikerrostaloon verrattuna jopa 10 % halvemmaksi rakentaa. Ruotsissa puukerrostalojen markkinaosuus olikin vuonna 2012 noin 20 % koko kerrostalorakentamisesta. [1, 21.]

2.3 Puukerrostalo suurelementeistä

Suurlevyjärjestelmä on puuelementtijärjestelmä, jossa rakennuksen vaipan osat kasataan suurikokoisista levyelementeistä (kuva 2). Ulkoseinäelementin enimmäispituus on 14 metriä, ja enimmäiskorkeus on huoneen korkeus. Vaikka puu on kevyt rakennusmateriaali, voi yksittäinen ulkoseinäelementti painaa jopa 4000 kg. Yleensä ylä-, väli- ja alapohjaelementtien pituus on rungon syvyyden mittainen, mikä on noin 10 metriä, mutta pisimmillään ne saattavat olla 18–22-metrisiä. Ylä-, väli- ja alapohjaelementtien leveys on yleensä 2,4 metriä. [7, 328.]

Massiivipuuelementtien liitokset, aukot ja muut työstöt sahataan levyihin jo tehtaalla. Valmistaja voi toimittaa elementit halutulla valmiusasteella, ja ne voidaan nostaa ja asentaa paikalleen valmiiksi kasattuina. Elementit sisältävät tällöin jo esimerkiksi lämmöneristeet ja pintamateriaalit sekä ovet ja ikkunat. Levyyn on mahdollista tehdä koolaus teknisiä asennuksia varten. Koolaukset voidaan korvata suoraan levyyn jyrstävillä urilla. Kantavana rakenteena toimiva puu voidaan jättää näkyviin tai peittää. Useimmiten palo- ja ääniteknisten syiden takia seinät levytetään. Lämmöneristeet asennetaan aina levyn ulkopintaan. Lämmöneristevaatimus on massiivipuulevyissä rungoissa muihin runkotyypeihin verrattuna hieman ohuempi, koska puulevyt toimivat osin myös lämmöneristeinä. [1, 44–45.] Joensuu Lighthouse suunniteltiin rakennettavaksi suurelementtijärjestelmällä.



Kuva 2. Valmistuvia ulkoseinäelementtejä Joensuu Lighthousen työmaalla.

2.4 Joensuun Pihapetäjä

Karjalaisen Kulttuurin Edistämissäätiö (KKES) rakennuttama Joensuun kaupungin ensimmäisen asuinpuukerrostalo valmistui Joensuun Penttilän kaupunginosaan vuonna 2017. Kuusikerroksinen puukerrostalo rakennettiin CLT-runkoisista tilaelementeistä [8.].

Joensuun Pihapetäjässä jätettiin näkyviin puupintaa sisäkattoihin sekä huoneistojen välisiin seiniin. Lisäksi kerrostalossa voidaan nähdä puuverhoilua esimerkiksi lattioissa, ikkunoissa ja ovissa sekä pesuhuoneiden alakatoissa. Puisen asuinkerrostalon kantavat puupinnat suojattiin palosuojakipsilevyillä määräysten mukaan. Lisäksi kerrostalo varustettiin automaattisella sammutusjärjestelmällä. Kohteessa on yhteensä 40 asuntoa, joista 30 on yksiöitä (35,5 m²) ja 10 kolmioita (65 m²). [8.]

Pihapetäjästä suunniteltiin energiatehokas puukerrostalo, jolloin energialuokaksi muodostui B ja energialuvuksi 100. Energiatehokkuutta parannettiin esimerkiksi jäteveden lämmöntalteenottojärjestelmän avulla ja asentamalla aurinkopaneeleita rakennuksen katolle. [8.] KKES käynnisti yhteistyössä Karelia-ammattikorkeakoulun ja Itä-Suomen yliopiston kanssa rakennusprojektin yhteyteen Energiatehokas puukerrostalo EAKR-kehityshankkeen, jonka tarkoituksena oli tukea puukerrostalokohteen suunnittelua ja tuottaa lisäksi monipuolista tietoa puurakentamisesta. [9, 10.]

Pihapetäjässä suoritettiin mittauksia vuonna 2018. Karelia-ammattikorkeakoulun opiskelija Riku Varonen teki kohteessa opinnäytetyön ”CLT-runkoisen puukerrostalon painumat”. Lighthousesta poiketen Pihapetäjän rakenteissa käytettiin tärinäneristimiä. Painumamittaukset suoritettiin takymetrilaitemittauksin, jonka toleranssi oli +/-1,5 mm. Mittaustuloksista kävi ilmi, että painuma oli noin 1 mm/kerros. [10, 33–34.] Mittaustavan todettiin jälkikäteen olevan epätarkka mittaustapa tarpeeksi tarkkojen painumatietojen saamiseksi. Lisäksi Tero Leinonen teki Pihapetäjä-puukerrostalolla opinnäytetyön ”Puukerrostalon rakennusfysikaalinen toiminta”. Johtopäätöksenä opinnäytetyössä todettiin CLT-rakenteisten puukerrostalojen rakenteiden sopivan Suomen olosuhteisiin hyvin. [11, 38.]

2.5 Lighthouse - Suomen korkein puukerrostalo

Pielisjoen rantaan, Joensuun Penttilän kaupunginosaan vuonna 2019 valmistuva 14-kerroksinen ja 50 metriä korkea Joensuu Lighthouse (kuva 3) tulee valmistuessaan olemaan Suomen korkein puukerrostalo. 117 opiskelija-asunnon puukerrostalon arkkitehtisuunnittelusta on vastannut Arcadia Oy arkkitehtitoimisto.

Rakennesuunnittelusta vastaa Joensuun Juva Oy. Kerrostalon rakennuttaa Opiskelija-asunnot Oy Joensuun Elli ja pääurakoitsijana kohteessa toimii Rakennustoimisto Eero Reijonen Oy.



Kuva 3. Joensuu Lighthouse, havainnekuva [12].

Joensuu Lighthouse tekee osaltaan myös historiaa, sillä se on ensimmäinen yli kahdeksankerroksinen puukerrostalo Suomessa. Kerrosalaltaan 4800 k-m²:n kokoisen puukerrostalon seinissä kantavana rakenteena käytetään LVL-viilupuuta, ja välipohjissa CLT-liimapuuta. Rakennuksen jäykistämiseen käytetään esijännitetyjä vetotankoja. Sen elementit rakennetaan säältä suojattuna, millä saadaan estettyä rakennusaikaiset kosteusvauriot. Betonista rakennettua pohjakerrosta (kuva 4) ja perustuksia lukuun ottamatta kerrostalo on kokonaan puurakenteinen.

Valmistuttuaan puukerrostalo sitoo suuren määrän hiilidioksidia. Määrä vastaa 700 henkilöauton vuotuisia hiilidioksidipäästöjä. Kevyen materiaalin ansiosta puurakentaminen myös vähentää kuljetuksia työmaalle. Materiaalin kuljetukseen olisi tarvittu jopa 270 kuorma-autokuormaa, mikäli kerrostalo olisi valmistettu betonista. Puurakentamisen ansiosta tarvittavan materiaalin kuljettamiseen tarvitaan alle 50 kuormaa. [13.]

Joensuu Lighthouse sai rakennusluvan kesäkuussa 2017. Rakentaminen alkoi joulukuussa 2017 ja kohteen on määrä valmistua syksyllä 2019. Rakennus on haastava hankkeeseen ryhtyneille suunnittelijoille ja rakentajille, koska vastaavanlaisen kerrostalon rakentamisesta ei ole Suomessa aiemmin kokemusta. Kohteella on laaja työllistävä vaikutus, minkä lisäksi se toimii tutkimuskohteena ja siitä tehdään useita ammattikorkeakouluopiskelijoiden opinnäytetöitä.



Kuva 4. Joensuu Lighthousen betoninen pohjakerros ja ensimmäinen puurakenteinen asuinkerros [12].

3 Puukerrostalon rungon painuminen

3.1 Painuminen

Rakennukset tulee suunnitella siten, että rakennuksen runko painuisi tasaisesti. Rakennuksen rungon painumista ei tule sekoittaa rakennuksen painumiseen. Rakennuksen rungon painumisessa tarkastellaan tässä ainoastaan rakennuksen kantavan rungon pystysuuntaista muodonmuutosta, kun taas rakennuksen painumisessa tarkastellaan koko rakennuksen painumista esimerkiksi maaperässä tapahtuvien muutosten takia.

Rungon pystysuoran painuman suuruutta voidaan arvioida laskelmin, mutta se on haastavaa. Yleensä puisen rungon painuminen johtuu siitä, että runkopuutavara kuivuu kutistuessaan tai viruu kuormituksesta. Rakennustyön edetessä myös liitosten tiivistyminen puuosien välisten kuormitusten kasvaessa voi aiheuttaa painumista. [1, 87.]

Ristiin viilutettujen LVL- ja CLT-tuotteiden käyttöä suositellaan, sillä painuman suuruus kasvaa, mitä enemmän syysuunnaltaan vaakasuuntaista puumateriaalia käytetään rakennuksen pystyrakenteissa. LVL- ja CLT-tuotteet ovat suositeltuja myös niiden mittatarkkuuden ansiosta. Nykypäivän rakentamistavoilla valmistetun puukerrostalon keskimääräinen rungon painuminen on 2–5 mm/kerros. [1, 87–88.]

3.2 Viilupuu (LVL)

3.2.1 Viilupuun valmistus

Viilupuun (kuva 5) valmistusprosessin alussa tukkeja haudutetaan vedessä tai vaihtoehtoisesti höyrytetään 60–80 °C:ssa vuorokaudesta viikkoon puuaineksen pehmenemiseksi. Alkukäsittelyprosessin jälkeen viilut sorvataan tai leikataan, minkä jälkeen ne kuivataan kuivauslinjalla muutamien minuuttien ajan. Viilun

oikeanlainen kuivatus helpottaa työstettävyyttä ja on tärkeää sen halkeilun sekä homehtumisen estämiseksi. Jotta viilusta saadaan tehtaalla mahdollisimman tasaista, sitä taivutellaan kuivauksen aikana. Viilut jälkikäsitellään tasaamalla ne reunoista ja päistä siisteiksi, minkä jälkeen ne niputetaan narulla nippuihin ja varastoidaan. [14.]

Suomessa käytetyt, vähintään 1200 mm pitkät viilut liimataan viilupuulevyiksi säänkestävällä fenoliformaldehydiliimalla. Viilupuu päätetään halutun leveäksi ja pitkäksi 1800 mm leveästä ja 27–75 mm:n paksuisesta päättymättömästä levystä. Yli 63 mm paksut elementit valmistetaan liimaamalla valmiita viiluelementtejä yhteen. [7, 108–109.] Joensuu Lighthouse puukerrostalon kantavana seinärakenteena käytettävät viilupuurunkoelementit valmistettiin Varkaudessa Stora Enson LVL-tehtaalla. [13.]



Kuva 5. LVL by Stora Enso [15].

3.2.2 Viilupuun ominaisuudet

LVL (laminated veneer lumber) on kevyt ja erittäin luja rakennusmateriaali. Sitä voidaan käyttää myös yhdessä muiden puutuotteiden, kuten CLT:n kanssa. Sen valmistaminen on ympäristöystävällistä ja siitä syntyvä materiaalihukka on vähäistä. [16, 5.]

Viilupuu on suoraa ja mittapysyvää, ja sen laatu on tasaista. Se ei kierry tai vääntyile, ja se on helposti työstettävissä. Yleisimmin viilupuuta käytetään palkeissa ja pilareissa, I-palkeissa, kattotuoleissa, rakennuselementeissä ja puurunkorakentamisessa. Tulevaisuudessa viilupuulle voidaan löytää käyttökohteita esimerkiksi kuljetus- ja laivanrakennusteollisuudesta tai vaikkapa tuulivoimaloiden rakentamisesta. [17.] Taulukossa 1 on esitelty LVL-viilupuun perustietoja.

Taulukko 1. LVL by Stora Enso - yleistietoa. [16, 4.]

LVL by Stora Enso – yleistietoa	
Käyttö	Runko-, seinä-, katto- ja lattiarakenteet
Käytettävä puulaji	Kuusi
Kosteuspitoisuus	8–10 % (valmistuksen jälkeinen)
Pintalaatu	Tarkoitettu ei näkyväksi. Tavallisesti viimeistelemätön, hiomaton pinta. (tilauksesta myös viimeisteltyinä)
Tiheys	$\rho = 510 \text{ kg/m}^3$ (LVL S & X)
Lämmönjohtavuus	$\lambda = 0,13 \text{ W/(mK)}$
Ominaislämpökapasiteetti	$c = 1600 \text{ (kgK)}$
Paloluokka	D-s1, d0 (EN 13501-1)

3.3 Monikerroslevy (CLT)

3.3.1 CLT:n valmistus

CLT:n valmistus alkaa sormijatkamalla sahatavara yksittäisiksi lamelleiksi, minkä jälkeen ne höylätään. Tämän jälkeen lamelleista kootaan levyn suuruisia ristikäin liimattuja kerroksia. Levyt laitetaan puristukseen liiman kuivumisen ajaksi. Valmiiksi puristetusta levystä saadaan työstettyä asiakkaan vaatimusten

mukainen mittatarkalla CNC-koneella. Hyvän suunnittelun avulla yksittäisestä levyistä voidaan leikata useampi puuelementti, jolloin sahaamisessa syntyvää hukkaa voidaan vähentää. [18.]

3.3.2 CLT:n ominaisuudet

CLT (cross laminated timber) on monipuolinen monikerroslevy (kuva 6). CLT-levy tehdään laudoista kerroksittain ristiin liimalla. Yksittäisten levyjen tyypillinen paksuus on 51–297 mm, mutta jopa 400 mm:n paksuisia levyjä valmistetaan. Levyn leveys on enintään 4,8 m ja pituus 20 m. [7, 105.]

CLT:n monipuolisuus perustuu sen käytettävyyteen seinä-, katto- ja välipohjarakenteissa. Alkujaan Sveitsistä lähtöisin oleva rakennusmateriaali on yleistynyt myös Suomessa. CLT-tilaelementtitekniikalla on Suomessa valmistettu esimerkiksi Jyväskylän Puukuokka-puukerrostalo. [7, 105.]



Kuva 6. Monikerroslevy (CLT) [19].

CLT sopii käytettäväksi muiden materiaalien kanssa. Sen millitarkka työstettävyys tuo vapauksia arkkitehti- ja rakennesuunnitteluun. CLT-seinärakenteisessa talossa voidaan saada jopa 6–10 % enemmän asuintilaa tiiliseinäiseen taloon verrattuna, sen tilaa säästävän mitoituksen ansiosta (perustuu asuntoon, jossa asuintilaa 100 m²). Pien- ja kerrostalojen lisäksi CLT:tä voidaan käyttää

rakennusmateriaalina teollisuus- ja urheiluhalleissa, päiväkodeissa, kouluissa, kauppakeskuksissa ja muissa rakennuskohteissa. [20, 5.]

CLT:n käytön etuja ovat korkea esivalmistusaste, nopea pystytys ja helppo asennus. Se on esimerkiksi betoniin ja tiileen verrattuna kevyt materiaali, mikä tarkoittaa kevyempiä perustuksia. Se on ympäristöystävällistä, ja se tarjoaa rakennuksiin terveellisen sisäilman. VTT:n ja itävaltalaisen tutkimuslaitos Holzforchung Austrian tutkimusten mukaan CLT:n palonkestävyys on erittäin hyvä. [20, 12.]

CLT-levyä voidaan käyttää jäykistävänä ja kantavana rakenteena. CLT-levyrakenteissa ei tarvitse käyttää erillistä ilman- tai höyrynsulkukerrosta, mikäli lamelleissa on käytetty syrjäliimausta. [1, 44.] Joensuu Lighthouse puukerrostalon välipohjissa käytetään CLT-levyjä. CLT-rakenteita käytettiin myös Joensuun ensimmäisessä puukerrostalossa, Joensuun Pihapetäjässä. Taulukossa 2 on esitetty CLT:n perustietoja.

Taulukko 2. Stora Enso CLT. [20, 7.]

Stora Enso CLT – yleistietoa	
Käyttö	Pääasiallinen käyttö seinä-, välipohja- ja kattorakenteina
Käytettävä puulaji	Kuusi, mänty
Kosteuspitoisuus	12 % +/-2 %
Pintalaatu	Hiottu viimeistelemätön (tehdaslaatu) tai hiottu viimeistely pinta
Tiheys	$\rho = 470 \text{ kg/m}^3$
Lämmönjohtavuus	$\lambda = 0,13 \text{ W/(mK)}$
Ominaislämpökapasiteetti	$c = 1600 \text{ J/(kgK)}$

4 Ulkoseinärakenteen rakennusfysikaalinen toiminta

4.1 Lämpö

Lämpö siirtyy aina lämpimästä kohti kylmää, eli korkeammasta lämpötilasta matalampaan. Lämpötilaero pyrkii tällöin tasoittumaan. Lämpö aiheutuu atomien ja molekyylien liikkeestä, ja on kolme eri tapaa, joilla siirtyminen tapahtuu: johtamalla, säteilemällä ja konvektion avulla [7, 143.].

4.1.1 Lämmön siirtymistavat

Johtumisella tarkoitetaan molekyylien liike-energian siirtymistä molekyylistä toiseen. Tällöin lämpö siirtyy aineessa lämpimästä kohti kylmää. [8, 143.] Puussa lämmön johtuminen aiheutuu vierekkäisten molekyylien energian vaihtamisesta. Metalleissa se aiheutuu elektronien liikkeestä. Metallit johtavat lämpöä puuta paremmin, koska elektronien liike on tehokkaampi energian siirtotapa kuin atomien värähtelyn avulla tapahtuva. [21, 165–166.]

Säteily on valon nopeudella tapahtuvaa energian siirtymistä sähkömagneettisen aaltoliikkeen avulla. Rakennustekniikassa on kahdenlaista säteilylämpöä: lyhytaaltoista auringonsäteilyä ja pitkäaaltoista kappaleiden lämpösäteilyä. Säteilylämpöä voidaan tarkastella esimerkiksi ikkunoissa. Ikkunalasi läpäisee hyvin lyhytaaltoisen auringon säteilyn, mutta huonosti sisältä ulos pyrkivän pitkäaaltoisen lämpösäteilyn. [7, 143.]

Konvektiolla tarkoitetaan lämmön siirtymistä nesteen tai kaasun virtauksen välityksellä. Konvektio ilmenee kahdella tavalla: pakotettuna tai luonnollisena. Jos jokin ulkopuolinen voima vaikuttaa kaasun tai nesteen liikkumiseen, puhutaan pakotetusta konvektiosta. Esimerkiksi koneellisessa ilmanvaihdossa tapahtuu pakotettu konvektio. Luonnollisessa konvektiossa liikkeen saa aikaan lämpötilaerojen aiheuttama tiheysero. [7, 143–144.] Esimerkiksi ilman kierto ikkunalasien välissä tai veden virtaaminen lämpöpattereissa veden lämmityksen takia on luonnollista konvektiota. [21, 173.]

4.1.2 Lämmönläpäisykerroin

Rakenteiden lämmöneristyskykyä mitataan lämmönläpäisykertoimella (U [$W/(m^2K)$]). Lämmönläpäisykerroin määritellään Suomen rakentamismääräyskoelman osassa C4 seuraavasti: ”Lämmönjohtavuus ilmoittaa lämpövirran tiheyden jatkuvuustilassa pituusyksikön paksuisen tasa-aineisen ainekerroksen läpi, kun lämpötilaero ainekerroksen pintojen välillä on yksikön suuruinen.” [22, 3.]

Lämmönläpäisykerroin (U) lasketaan kaavalla (1) [22, 5.]

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

jossa

R_T on rakennusosan kokonaislämmönvastus.

Mitä pienempi U -arvo rakenteella on, sitä paremmin se eristää lämpöä. Taulukossa 3 on nähtävissä eri rakenteille asetettuja lämmönläpäisykertoimien vertailuarvoja, jotka suunnittelussa ja rakentamisessa eivät saa ylittyä.

Taulukko 3. Lämmönläpäisykertoimien vertailuarvot. [23, 7.]

U-arvojen vertailuarvot (W/m^2K)		
Rakenne	Lämmin, erityisen lämmin tai jäähdytettävä kylmä tila	Puolilämmin tila
seinä	0,17	0,26
hirsiseinä	0,40	0,60
yläpohja ja ulkoilmaan rajoittuva alapohja	0,09	0,14
ryömintätilaan rajoittuva alapohja	0,17	0,26
maata vastaan oleva rakennusosa	0,16	0,24
ikkuna, kattoikkuna, ovi	1,0	1,4

4.1.3 Lämmöneristys

Asumisen ja elämisen kannalta sisätilojen tulee olla lämpimät ja kuivat. Tämän takia lämpimien tilojen rakenteiden on eristettävä hyvin lämpöä. Rakenteet on myös suunniteltava ja rakennettava niin, että ne ovat ilmatiiviitä. Yleisiä lämpökamerakuvauksissa havaittavia ongelmakohtia rakennuksissa ovat muun muassa läpiviennit, nurkat ja liitokset. Vanhojen rakennusten lämpötekniistä toimivuutta tehostetaan jälkikäteen rakenteiden tiiviyyttä parantamalla ja esimerkiksi yläpohjan eristepaksuutta kasvattamalla.

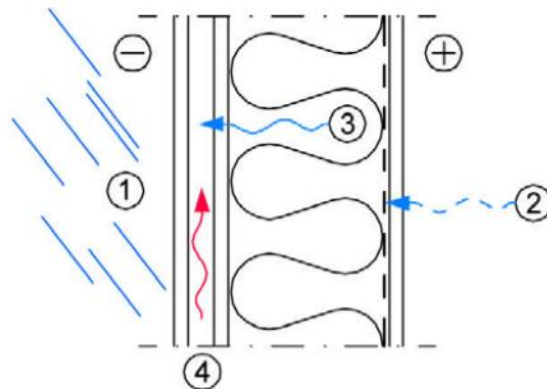
Lämmöneristyksen suunnittelussa ja asennuksessa tulee ottaa huomioon, millainen runkorakenne kohteessa on. Mikäli seinärungon sisäpuolinen levytys riittää rungon jäykistämiseksi, voidaan käyttää mineraalivillasta valmistettua tuulensuojaa. Ulkoseinärakenteet, joissa on sisäpuolinen ristikoolaus, toimivat hyvin ilmatiiviiden ja lämmöneristyksen kannalta. Tällöin ilma- ja höyrynsulku voidaan asentaa syvemmälle rakenteeseen, jolloin se on vähemmän altis reikiintymiselle. Ristikoolaus helpottaa myös sähköasennusten sijoittamista. CLT-runkoisen ulkoseinän lämmöneristekerros asennetaan aina puulevyrunгон ulkopuolelle, jotta kosteus ei vahingossa pääsisi tiivistymään rakenteiden väliin. [1, 56.]

Rakentaessa lämmöneristeet suojataan niin, että ne eivät kastu tai vahingoitu. Mikäli eristeet poikkeavat alkuperäisistä suunnitelmista, pitäisi niiden laatu varmistaa suunnitelmia vastaaviksi ennen niiden asennusta. Eristeille rakenteisiin varatut kohdat tulee tarkistaa ja korjata, ennen kuin eristeet asennetaan. Lämmöneristeiden tulee täyttää eristetila mahdollisimman hyvin. Rakenteiden lämmöneristeet tulisi asentaa vasta sen jälkeen, kun niitä suojaavat ympäröivät rakenneosat ovat valmiit. Eristettä ei saa kuormittaa tai painaa niin, että se vahingoittuu tai litistyy. [22, 7.]

4.2 Kosteus

Ilman kosteus (absoluuttinen ja suhteellinen), diffuusio, konvektio, rakennekosteus, rakenteiden vuodot, sisäpuolinen vedenpaine (esimerkiksi suihku), sade ja sen aiheuttamat roiske- ja pintavedet, vajovesi, pohjavesi, kapillaarinen vedenliike, maasta haihtuva kosteus ja tuuli ovat luonnollisia rasituksia, jotka vaikuttavat oleellisesti rakennuksen kosteustekniseen toimintaan. [7, 160.]

Näkyvin kosteuslähde on sadevesi, mikä rasittaa erityisesti rakennuksien vaakapintaisia rakenteita, kuten vesikattoa. Kaikista kastelevin sadetyyppi on räntä, sillä se jää vaikuttamaan pintoihin usein pidemmäksi ajaksi. Suunnitellessa seinärakenteita on tärkeää ottaa huomioon viistosade. Se kohdistuu tuulen paineen aiheuttamana vaakasuorien rakenteiden lisäksi rakennusten pystysuoriin rakenteisiin, kuten seiniin. [24, 9.] Kuvassa 7 on esitettyä puurankaisen ulkoseinä-rakenteen kosteustekninen toiminta.



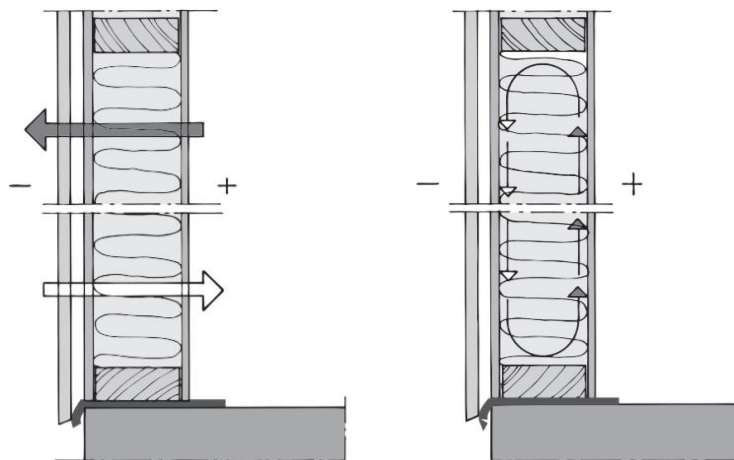
- 1 Tiivis julkisivu estää viistosateen pääsyn rakenteeseen
- 2 Lämmöneristein lämpimällä puolella oleva vesihöyry- ja ilmatiivis kerros estää sisäkerrosten haitallisen siirtymisen diffuusiolla ja konvektiolla rakenteen kylmiin osiin
- 3 Rakennekerrosten vesihöyrynvastukset pienenevät seinän ulkopintaa kohti, jolloin rakenteessa oleva kosteus siirtyy diffuusiolla pois rakenteesta
- 4 Tuuletusväliin joutunut kosteus tuulettuu ja vesi ohjataan rakenteesta pois

Kuva 7. Kerroksellisen, rankarakenteisen ulkoseinän kosteustekninen toiminta [25, 158].

4.2.1 Kosteuden siirtymistavat

Vesihöyryn luonnollisella konvektiolla tarkoitetaan ilmanpaine-eroista johtuvaa vesihöyryn siirtymistä rakenteessa ilmavirtausten mukana. Ilmavirta suuntaa aina kohti alenevaa kokonaispainetta. Kylminä vuodenaikoina rakenteissa olevien reikien, rakojen ja halkeamien jne. lävitse kulkevan ilman virtauksien kuljettama kosteus määrä voi olla moninkertainen verrattuna diffuusioon. [7, 160.]

Pakotetussa konvektiossa (savupiippuilmiö) huoneilman lämpeneminen aiheuttaa ilman tiheyden pienenemisen, jolloin kevyt ilma nousee ylöspäin. Sen takia huoneen yläosaan muodostuu ylipaine ja huoneen alaosaan alipaine. Kun rakennusta lämmitetään, pyrkii lämmin ja kostea sisäilma rakenteiden lävitse ulos huoneen yläosista, kun samalla kylmä sekä kuiva ulkoilma pyrkii sisälle huoneen alaosista. [24, 2.] Kuvassa 8 on havainnollistettu luonnollista ja pakotettua konvektiota ulkoseinärakenteessa.



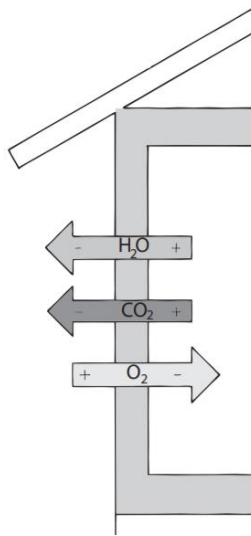
Kuva 8. Luonnollinen ja pakotettu konvektio [24, 1-2].

Mineraalivillakerroksen paksuuden ja seinien korkeuden kasvattaminen suurentaa konvektiovirtausta seinärakenteen sisällä, mikä heikentää seinän lämmöneristyskykyä ja voi aiheuttaa kosteuden tiivistymistä lämmöneristeen ulkopintaan ulkoseinän yläosissa. Mikäli ulkoseinärakenne katkaistaan välipohjien kohdalta kerroksittain, katoavat rakenteen sisäinen konvektio ja savupiippuilmiö. Pystysuuntaisia ja hyvin vesihöyryä läpäiseviä konvektiokatkoja (esimerkiksi

rakennuspaperi) suositellaan käytettävän, mikäli rakennuksen ulkoseinärakenteen paksuus ylittää 200 mm ja on yhtä kerrosta korkeampi. [1, 58–59.]

Diffuusiolla tarkoitetaan jakautuneen kaasuseoksen kaasumolekyylien pyrkimystä liikkumaan seoksessa sen tasaantumiseksi. Vesihöyryn liikkuminen rakenteen lävitse on vesihöyryn diffuusiota (kuva 9). Mikäli ilmassa olevan vesihöyryn osapaine seinän eri puolilla on erilainen, pyrkii vesihöyry kulkemaan seinämän läpi kohti pintaa, jossa on pienin vesihöyryn osapaine. [7, 162.]

Diffuusio on yleisimmin hidasta nykyisin rakennettavissa seinärakenteissa. Oikein suunnitellut ja toteutetut rakenteet eivät aiheuta kosteushaittoja kuivissa tiloissa. Pienet reiät sisäpuolisessa höyrynsulussa eivät lisää diffuusiota merkittävästi, mutta mikäli ne antavat mahdollisuuden ilmavirtaukselle kulkea seinämän läpi sisältä ulos (konvektio), ilmavirran mukana kulkeutuu rakenteeseen moninkertainen määrä kosteutta verrattuna diffuusioon. [7, 163.]



Kuva 9. Diffuusio rakenteessa [24, 13].

4.2.2 Rakennekosteus

Rakennukset suunnitellaan ja rakennetaan siten, että rakenteet olisivat kuivia, jotta kosteudesta mahdollisesti aiheutuvat haitat voitaisiin ennaltaehkäistä. Lähes kaikki rakennusmateriaalit kuitenkin läpäisevät jonkin verran vesihöyryä, minkä takia rakenteissa on aina jokin määrä kosteutta [24, 12.].

Rakennekosteudella tarkoitetaan ylimääräistä valmistuksen, varastoinnin ja rakentamisen aikana materiaaleihin ja tarvikkeisiin varastoitunutta kosteutta. Liiallisesta kosteudesta puutavaraan voi syntyä hometta ja muita vaurioita, minkä takia ne tulee säilyttää kuivana varastoitaessa ja rakentaessa. Kastunut puutavara voi muodostaa ongelmia myöhemmin myös rakennuksen rakenteissa, kun puu kutistuu kuivuessaan. [7, 164.]

Ruotsalainen tutkimus osoittaa, että rakennekosteus on kolmanneksi yleisin kosteuslähde maakosteuden ja putkivuotojen jälkeen. Puutavara kastuu yleensä sen takia, että ne varastoidaan rakennustyön aikana ulkotiloissa ilman suojaa tai ne suojataan ainoastaan peitteillä. Puutuotteet tulisi aina varastoida katettuun ja tuuletettavaan tilaan, kuten autotalliin tai varastoon. On järkevää ajoittaa puutavaran toimitus työmaalle siten, että minimoidaan varastointiaika. Kosteuspitoisuus kuivatulla puutavaralla on noin 10–20 %. [7, 164–165.]

Esimerkiksi liimatut puulevyt, sisäverhouksessa käytetyt laudat ja listat sekä portaat ovat toimitettaessa kosteudeltaan enintään 16 %. Ellei toisin ole määrätty, lattialautojen kosteuspitoisuus on puun kuivapainosta enintään 10 %. Puutavaran kosteusprosentti voidaan mitata työmaalla kosteusmittarilla tarpeen mukaan. Asennettaessa sisäverhousta tulee ottaa huomioon, että rakennuksen lämpötilan ja ilman kosteuden tulisi olla asettunut suurin piirtein lopullista käyttöä vastaaviin arvoihin. Puurakenteisissa uudisrakennuksissa on tärkeä ottaa huomioon myös muiden rakennusmateriaalien vaikutus, koska ne voivat nostaa huonetilan suhteellista kosteutta. [7, 165.]

Jos rakennusaikana rakennuksen kuivumista nopeutetaan lämmittämällä, olisi hyvä välttää seinärakenteita, joissa sisäpuolisen lämmöneristeen alle on asennettu muovinen höyrynsulku. Lämmityksestä aiheutuvan poikkeuksellisen korkean lämpötilan ja rakennusaikaisen korkean kosteuspitoisuuden takia höyrynsulun sisäpinnalle voi tiivistyä vettä, mikä aiheuttaa lämmöneristeiden ja muiden rakenteiden kastumisen. [7, 165–166.]

Mikäli seinärakenteeseen halutaan asentaa lämmöneriste höyrynsulun sisäpuolelle, on järkevää asentaa eriste ja pintalevytys vasta kun rakenne on kuivunut tarpeeksi ja huoneen lämpötila ja kosteus ovat asettuneet normaaleihin

käyttöolosuhteisiin. Tällöin on lisäksi muistettava, että höyrynsulkumuovin sijaan käytetään kosteutta läpäisevää ilmansulkupaperia. [7, 165–166.]

4.2.3 Kondensoituminen

Vesihöyryn tiivistymistä vedeksi kutsutaan kondensoitumiseksi. Vesihöyry voi tiivistyä joko rakenteen pinnassa tai sen sisällä, ilman suhteellisen kosteuden ollessa 100 %. Mikäli vesihöyryn kyllästymiskosteus ylittyy, vesihöyry tiivistyy rakenteissa kovalle pinnalle, joka on kylmempi kuin ympäröivän ilman lämpötila. Kosteuden tiivistymistä aiheuttaa monesti liian kylmä rakenteen sisäpinta, joka rajautuu lämpimään huonetilaan, kuten kylmä ikkunalasi. Muita kosteuden tiivistymistä aiheuttavia tekijöitä ovat kylmäsillat, höyrynsulun puutteellisuus tai sen väärä sijainti ja höyrynsulussa olevat reiät. [7, 167–168.]

4.2.4 Suhteellinen kosteus (RH %)

RH (Relative Humidity) kertoo, kuinka lähellä ilman absoluuttinen kosteus on maksimikosteutta. ”Ilman absoluuttisella kosteudella tarkoitetaan ilmassa olevan vesihöyryn massaa tilavuusyksikköä kohden.” Absoluuttinen kosteus on suoraan verrannollinen vesihöyryn osapaineeseen, joten suhteellinen kosteus voidaan laskea kaavalla 2. [21, 221.]

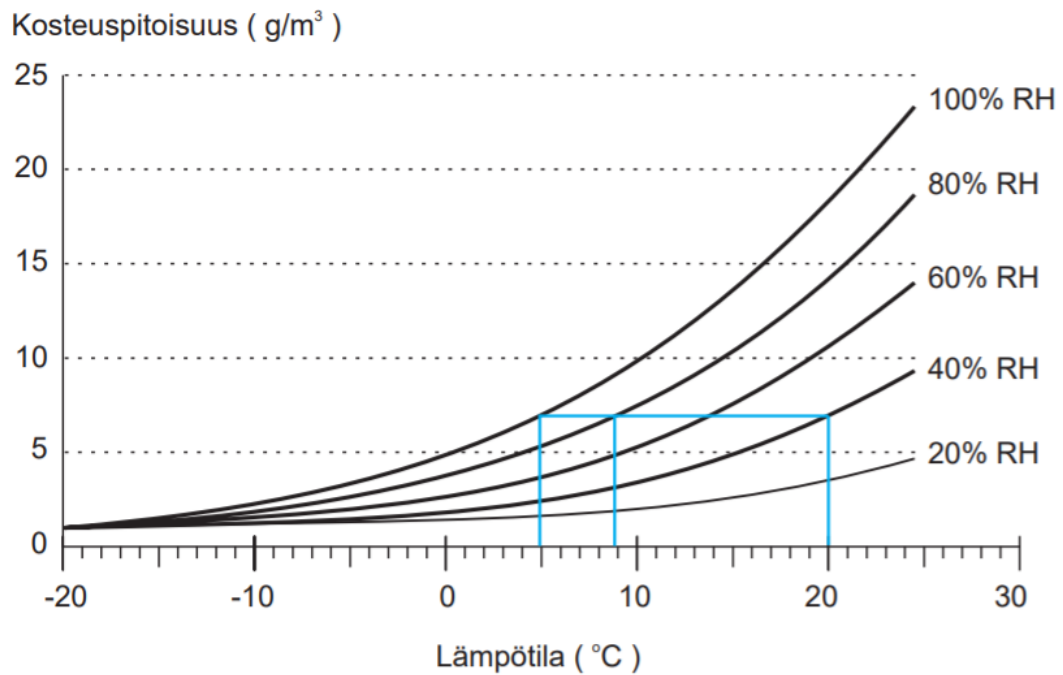
$$RH = p_v / p_{kyl} \cdot 100 \% \quad (2)$$

jossa

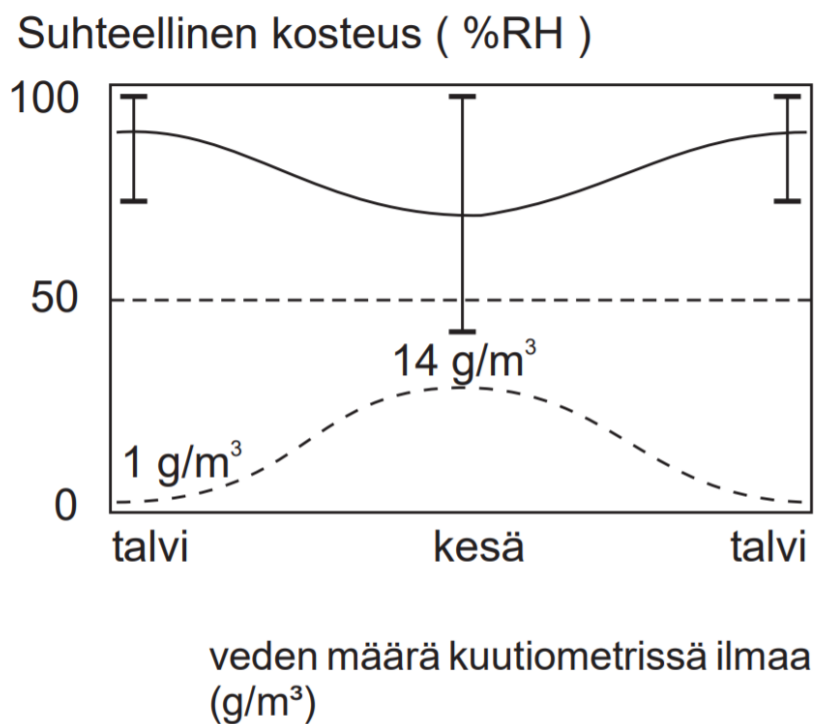
p_v on kyseisen vesihöyryn osapaine

p_{kyl} on kylläisen vesihöyryn osapaine tarkastelulämpötilassa.

Kuvaajasta 1 todetaan, että mikäli 20 °C lämpötilassa suhteellinen kosteus on 40 %, niin tällöin vesihöyry kondensoituu 5 °C lämpötilassa. 9 °C lämpötila ja 80 % suhteellinen kosteus aiheuttavat jo mikrobiriskin. Kuvaajasta 2 huomataan, että talvisin ulkoilman suhteellinen kosteus on korkeampi kuin kesällä. Talvisin ilmassa on vähemmän vesihöyryä kuin kesällä. [26, 1–2.]



Kuvaaja 1. Suhteellinen kosteus (RH %) [26, 2].



Kuvaaja 2. Ulkoilman keskimääräinen suhteellinen kosteus ja kosteuspitoisuus (g/m^3) eri vuodenaikoina [26, 2].

Taulukko 4. Ohjeelliset arvot materiaalin kosteuspitoisuuden, lämpötilan ja ajan merkityksestä rakenteen homehtumisriskiin. [24, 6.]

Rakennusosa	Homehtumisriski			
	RH < 70%	RH 70...80 %	RH 80...90 %	RH > 90%
Rakennuksen ulkovaipan sisäosat, väliseinät ja välipohjat	Pieni, vaikka kosteusrasitus on jatkuva	Pieni, jos kosteusrasitus esiintyy lyhyinä jaksoina	* Pieni, jos kosteusrasitus esiintyy lyhyinä jaksoina	Rakennusosa on pääsääntöisesti korjattava, ellei kosteuspitoisuus esiinny vain lyhyinä jaksoina, esimerkiksi märkätilojen sisäpinnoilla
Rakennuksen ulkovaipan ulko-osat	Pieni, vaikka kosteusrasitus on jatkuva	Pieni, jos kosteusrasitus esiintyy lyhyinä jaksoina tai pidempiaikaisesti vuoden kylmimpänä aikana	* Pieni, jos kosteusrasitus esiintyy lyhyinä jaksoina tai kylminä vuodenaikoina	* Rakennusosa on pääsääntöisesti korjattava, jos kosteuspitoisuus esiintyy pitkänä jaksoina, ellei rakenteen lämpötila ole samanaikaisesti alle 0 °C.

* Edellyttää laskennallista analyysiä

Taulukossa 4 on esitetty, kuinka suhteellinen kosteus vaikuttaa materiaalin homehtumisriskiin. Puurunkoisten ulkoseinärakenteiden julkisivun ja tuuletusvälin takana olevien rakennekerrosten tavanomaisena suhteellisen kosteuden arvona voidaan pitää 75 %. Jotta välttyttäisiin mikrobivaurioilta, suhteellisen kosteuden ei kuitenkaan tulisi lämpimässä tilassa (yli 0 °C) nousta pitkiksi ajoiksi yli tämän arvon. Mikäli käytetään kosteudenkestäviä tuulensuojia, saa suhteellinen kosteus olla tätäkin korkeampi. [25, 159.]

Rakenteen ulko-osissa voi silloin tällöin olla jopa 80–100 % suhteellisia kosteuksia. Tämän kosteuden tulee kuivua tuuletusvälistä ja julkisivusta ulkoilmaan, jotta se ei siirry sisään rakenteeseen. Rakenteen ulkopinnassa käytettyjen materiaalien tulisi pysyä niin kuivina kuin mahdollista, jotta varmistetaan niiden kestävyys pitkällä aikavälillä. [25, 157.]

4.2.5 Höyrinsulku

Ulkoseinien sisäpintaan, sisäpuolisen rakennuslevyn alle tulee asentaa höyrinsulkumuovi, jolla taataan ulkoseinärakenteen vesihöyrytiiviyys. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää rakennustiivistyspaperia. On myös huolehdittava, että epäjatkuvuuskohtia ei tule kyseiseen kerrokseen. Perustusten ja ulkoseinien liittymissä on tärkeää estää kapillaarisesti tapahtuva alajuoksupuun kastuminen sekä perustusten ja rungon välinen ilmavirtaus esimerkiksi käyttämällä umpisoluista polyeteenivaahtomuovinauhaa tai bitumikermikaistaa. [1, 58–60.]

Puurakenteille käytetään höyrinsulkuna muovikalvoa, muovitiivistyspaperia ja vuorauspaperia. Kuivissa tiloissa normaalioloissa riittävän kosteus- ja ilmansulun muodostavat rakennuspaperi ja pinnoitettu pintalevytykset. Kuivissa tiloissa höyrinsulku toimii oikeastaan vain ilmansulkuna. Rakennuspaperi on ainakin joiltakin osin muovia parempi vaihtoehto, sillä sen avulla kaasut voivat vaihtua seinän lävitse, mikä parantaa sisäilmaa. [7, 283.]

Höyrinsulku asennetaan joko heti sisäverhouksen taakse tai lämmöneristeiden väliin, noin 50 mm päähän sisäpuolisesta pintaverhouksesta. Kosteiden huone-tilojen höyrinsulukuksi suositellaan käytettäväksi höyrinsulkevaa muovitiivistyspaperia, muovialumiinipaperia tai muovikalvoa. Kosteissa tiloissa höyrinsulun sijainti on joko heti rakenteen pintakerrosten alla tai sen pinnassa. Muovikalvojen käyttöikä on noin 30–50 vuotta. Tämä tulee ottaa huomioon, mikäli puurakennus suunnitellaan kestäväksi kauemmin. 15–20 vuoden välein tehtävän kosteiden tilojen rakenteiden huollon yhteydessä uusitaan myös höyrinsulut. Kosteissa tiloissa ja laatoitettavissa seinissä käytetään nykyisin siveltävää vedeneristyskerrosta. On tärkeää huomata, ettei näissä rakenteissa ole muita vesihöyrytiivittä kerroksia. [7, 283.]

4.2.6 Rakennusaikainen kosteudenhallinta

Rakennushankkeeseen ryhtyvän tulee huolehtia, että rakennus suunnitellaan ja toteutetaan siten, ettei kosteusongelmia syntyisi. Tämän takia hankkeeseen laaditaan kosteudenhallinta-asiakirja. Siinä määritellään rakennushankkeen

kosteudenhallinnan tavoitteet ja toimintaperiaatteet. Kosteudenhallinta on pohja rakennussuunnittelun kosteudenhallintasuunnitelmalle ja edelleen työmaan kosteudenhallintasuunnitelmalle. Suunnittelijan tulee ottaa suunnitellessa huomioon rakennusaikainen kosteus. Rakentajan tulee suunnitella toimenpiteet kosteudenhallintaa varten ohjeiden ja tavoitteiden mukaisesti, jotka rakennuttaja on asettanut. Kosteudenhallintasuunnitelman toteutumista valvotaan rakennusaikana. [27.]

Työmaan kosteudenhallintasuunnitelmassa on kerrottu eri toimenpiteitä mitä työmaalla tulee tehdä asetettujen tavoitteiden saavuttamiseksi. Pääurakoitsija esittää ja myöhemmin hyväksyy tilaajalla kriittisten rakenteiden kuivumisaikariviot, kosteusmittaus suunnitelman, sääsuojasuunnitelman, varastointitilat, kosteus- ja sääsuojauksen tarvikkeille niiden varastoinnin ajaksi sekä työmaan olosuhteiden hallinnan. [28.] Kuvassa 10 on Lighthousen työmaa-aikainen elementtien sääsuoja.



Kuva 10. Joensuu Lighthousen työmaa-aikainen suojateltta.

5 Tutkimukset

5.1 Rungon painuminen

5.1.1 Mittausmenetelmä

Rakennuksen painumien seuranta aloitettiin elokuussa 2018, kun ensimmäinen mittalaitteisto saatiin asennettua kohteeseen. Anturin mittaamat tulokset rekisteröi Linux-käyttöjärjestelmäpohjainen korttitietokone, joka on kytketty langattomaan verkkoyhteyteen tulosten etälukua varten. Karelia-ammattikorkeakoulun Rakentamisen digitalisaatio -projektin henkilöstö suunnitteli asennuksen Novotechnicin valmistamille asentosensoreille.



Kuva 11. Rungon painumista mittaava laite Joensuu Lighthousen hissikuilussa.

Ensimmäisen laitteiston asennus aloitettiin kiinnittämällä asentosensori pystyasentoon mitattavan seinärakenteen alareunaan (kuva 11). Lisäksi asentosensorin päähän säädettiin nojaamaan teräslankaan ripustettu punnus. Mittalaitteet

rekisteröivät rakennuksen kantavan rungon painumaa jopa millimetrin sadasosien tarkkuudella. Sensorit tuottavat tietokoneelle csv-muotoista (comma-separated values) dataa. Jotta tuloksista saadaan lukemiskelpoisia, siirretään saatu raakadata Microsoft Excel ohjelmaan. [29, 10–11.] Excelin kautta tuloksista voidaan muodostaa esimerkiksi kuvaajia tulosten tulkitsemisen helpottamiseksi.

Laitteet suunniteltiin sijoitettavaksi kerroksiin siten, että yksi mittalaite mittaa painumat aina kolmen kerroksen alalta toisesta kerroksesta alkaen. Kerrosmäärän takia toiseksi ylimmän mittalaitteen mittaus kohdistettiin poikkeuksellisesti ainoastaan 11. kerrokseen (liite 1). Laitteet asennettiin hissikuilun yhteyteen, millä mittalaitteille taattaisiin tasainen lämpötila ja muuttumattomat olosuhteet.

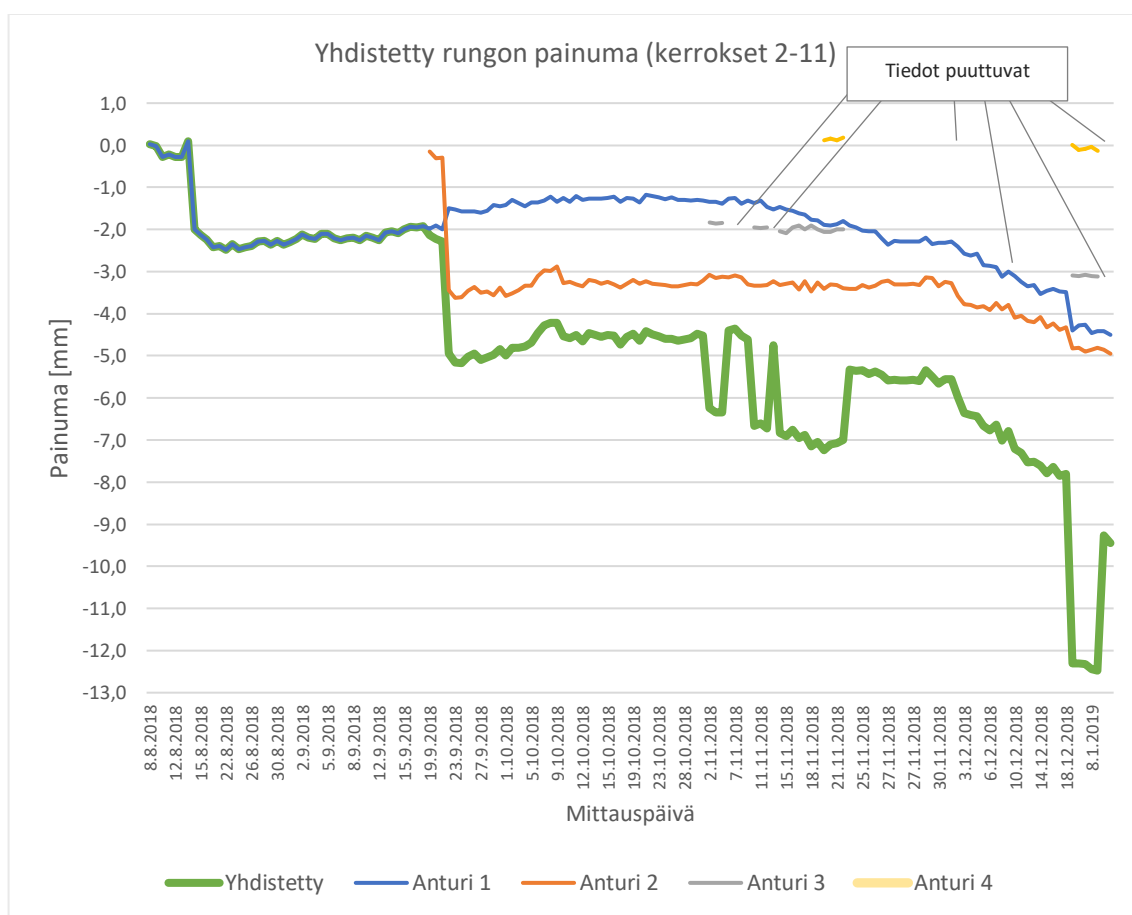
5.1.2 Mittaustulokset

Ensimmäiset mittaustulokset painuma-antureilta saatiin syyskuussa 2018 ensimmäisen anturin asennuksen jälkeen. Mittalaitteet on asetettu rekisteröimään yhden tuloksen päivittäin tiettyyn kellonaikaan. Valitettavasti mittalaitteiden irrottelu ja siirtely aiheutti tuloksiin katkoksia, ja täten vaikutti mittatulosten tasaiseen saantiin. Tämän takia pidempiaikaista painumatietoa saatiin tähän opinnäytetyöhön ainoastaan 1. ja 2. antureilta (kerrokset 2–7). Lisäksi Lighthousen hissikuilun levytystyöt pakottivat irrottamaan hissikuiluun asennetut painumaa mittaavat laitteet tammikuussa 2018, minkä takia viides mittalaite (kerrokset 12–14) ei ehtinyt rekisteröimään painumia tätä opinnäytetyötä varten. Kuvaajassa 4 on havainnollistettu mittalaitteiden yhdistettyä painumaa.

Alimman mittalaitteen rekisteröimät rungon painumat ovat pieniä: keskimäärin kolmen alimman puukerroksen (2.–4. krs) yhteispainumat olivat 1–5 mm. Suurin painuma-arvon heilahdus elokuussa johtunee rungon jäykistämiseen käytettyjen vetotankojen jännittämisestä. Painuman suuruus lähti syksyllä palautumaan kohti nollaa oletettavasti puun kosteuspitoisuuden kasvun takia. Lähempänä talvea runkorakenteet alkoivat kuivumaan ja painuma alkoi jälleen kasvaa (liite 2). Toiseksi alin mittalaite ei myöskään osoita isoja painuman muutoksia lukuun ottamatta syyskuussa tapahtunutta suurempaa painumaa, minkä syy oli silloinkin

rungon jännittäminen. Toiseksi alimman laitteen mittaaman painuman suuruus on kuitenkin alimpaan anturiin verrattuna suurempi (liite 2).

Kolmas mittalaite osoitti tasaista painumaa loka-marraskuussa tapahtuneen vetotankojen kiristyksen jälkeen. Kolmen kerroksen (kerrokset 5–7) painuma oli yhteensä keskimäärin noin 2 mm. Mittaustuloksiin tuli pidempikestoinen katkos 22.11.–4.1., minkä takia painuman kehittymistä voidaan kyseiseltä ajalta ainoastaan arvioida (liite 2). Alempien mittalaitteiden tuloksista voidaan kuitenkin päätellä, ettei painuman suuruudessa ole tapahtunut suurempia muutoksia myöskään kolmannen anturin kohdalla, vaan painuma on kasvanut tasaisen hitaasti kohti tammikuussa mitattuja arvoja. Kuvaajassa 3 on mallinnettu kaikkien mitaustulosten yhdistetty painumakuvaaja.



Kuvaaja 3. Yhdistetty rungon painuma, elokuu-tammikuu.

Nykyisillä tekniikoilla valmistetun puukerrostalon painuma on siis noin 2–5 mm/kerros. [1, 87.] Pihapetäjä-puukerrostalolla mitattiin vuonna 2017 rungon

painumaksi noin 1 mm/kerros. [9, 34.] Lighthouse pääsee tuloksillaan melko lähelle Pihapetäjän mittaustuloksia. Kerrosten 2–10 mittalaitteiden rekisteröimissä tuloksissa ei ole havaittavissa yksittäisiä isoja eroja, joten painumisen voidaan olettaa olleen tasaista. Rungon painuman voidaan laskea olevan alle 1,5 mm/kerros.

5.1.3 Mittaustulosten luotettavuus

Yhdistetty painumakuvaaja (kuvaaja 3) osoittaa, että 3. ja 4. anturien tulosten saanti oli katkonaista, jolloin mittaustuloksista ei voi laatia yhtämittaista kuvaajaa. Neljäs anturi (kerros 11) oli asennettuna kohteeseen ainoastaan hetken ennen sen levytystöistä aiheutunutta väliaikaista purkua. Sen harvat mitatut painumat ovat myös erikoisen pieniä, ja osittain jopa viruman puolella. Tästä syystä on todennäköistä, että neljännen anturin antamat tulokset eivät välttämättä ole täysin luotettavia.

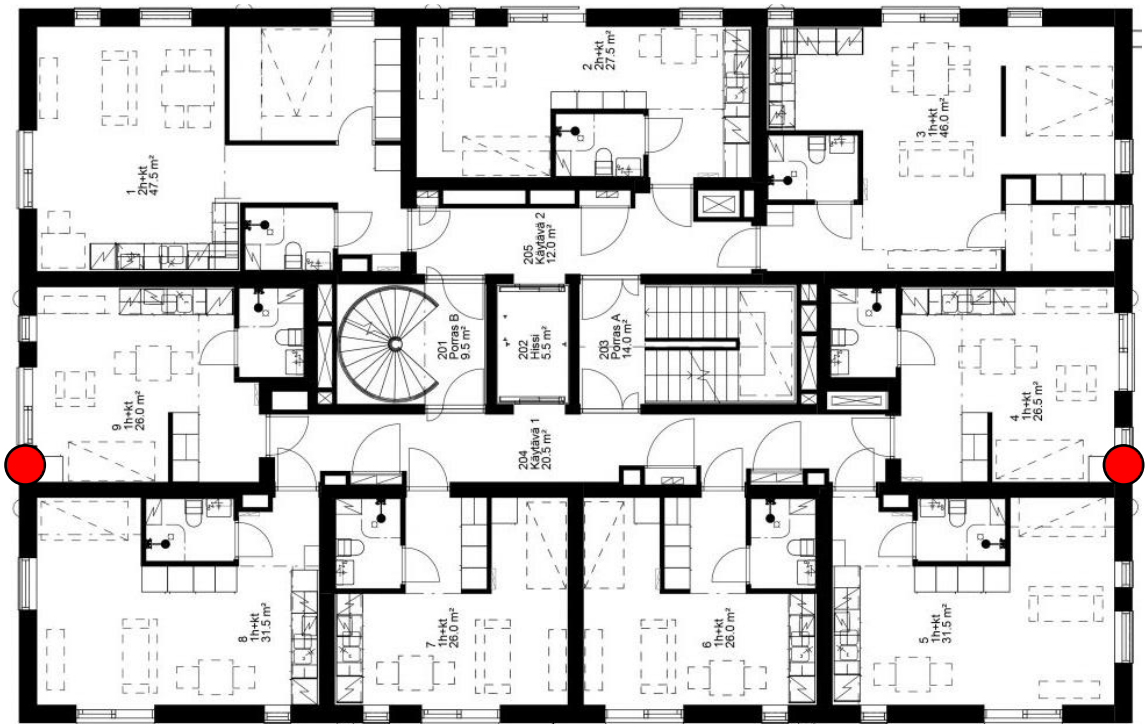
Lisäksi puukerrostalon viidettä, eli ylintä mittalaitetta (kerrokset 12–14) ei valitettavasti ehditty tätä tutkimusta varten asentaa kuin hetkeksi ja se ei myöskään rekisteröinyt raportointikelpoisia tuloksia. Tätä opinnäytetyötä viimeistellessä hisikuilun levytystyöt ovat vielä käynnissä eikä päätöksiä lopullisista painuman mitauslaitteiden asennuspaikoista ole vielä tehty.

Pidemmältä ajalta rekisteröidyt tulokset kerroksissa 2–10 ovat varsin johdonmukaisia, joten niitä voitaneenkin pitää luotettavina. Jos tämä pitää paikkansa, ja oletetaan ylempien kerroksien mittalaitteiden rekisteröimien rungon painumien olevan samaa suuruusluokkaa, niin voidaan arvioida, että koko kerrostalon osalta rungon painuman suuruus on keskimäärin noin 1–1,5 mm/kerros. On kuitenkin tärkeää ottaa huomioon, että Lighthousen mittaukset aloitettiin jo rakennustyön alkuvaiheessa, joten myöhemmissä työvaiheissa kerrokseen tulevat lisäkuormat, kuten lopullinen vesikatto, välipohjiin valettava betoni, ja kiintokalusteet vaikuttavat vielä jonkin verran painuman suuruuteen. Onkin mielenkiintoista nähdä, millaisiksi rungon painumat muodostuvat mittalaitteiden lopulliseen sijaintiin asentamisen jälkeen, mutta on hyvin oletettavaa, että painuman suuruusluokka ei tule muuttumaan.

5.2 Rakennusfysikaalinen toiminta

5.2.1 Mittausmenetelmä

Rakennuksen lämpötilan ja suhteellisen kosteutta (RH-%) seurataan rakennukseen sijoitettavien antureiden avulla. Karelia-ammattikorkeakoulun anturit sijoitetaan siten, että puukerrostalon kolmeen kerrokseen (2, 7, 12) asennetaan jokaiseen kaksi mittalaitetta kerroksen vastakkaisille ulkoseinille (kuva 12). Opiskelija-Asunnot Oy Joensuun Ellin 2 laitetta asennetaan 7. kerrokseen pitkille päätyseinille kerroksen vastakkaisiin huoneistoihin (kuva 14).

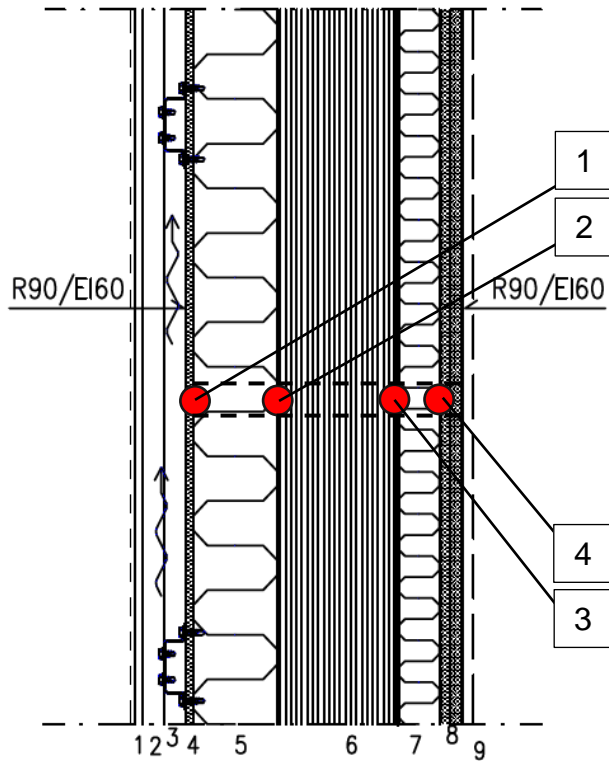


Kuva 12. Karelia-ammattikorkeakoulun mittalaitteiden sijoittaminen [12].

Suunnitelmien mukaan anturit sijoitetaan huoneistoihin korkeiden nurkkakaappien yläkoteloinnin sisään. Mittalaitteina käytetään Produalin valmistamia KLHJ 100 -antureita (liite 3). Tämän opinnäytetyön tutkimusten lisäksi mittaustuloksia seurataan ja rekisteröimään 5–10 vuoden ajan.

Suunnitelmien mukaan jokaista Karelia-ammattikorkeakoulun anturia varten mitauspisteisiin porataan ulkoseinään reikä. Laitteet sijoitetaan ulkoseiniin kuvan 12

mukaan. Niiden sijainnit ovat ulkopuolisen eristeen kylmäpinnassa (1), ulkopuolisen eristeen ja kantavan rungon rajapinnassa (2), kantavan rungon ja sisäpuolisen eristeen rajapinnassa (3) sekä sisäpuolisen eristeen ja sisäverhouksen rajapinnassa (4).

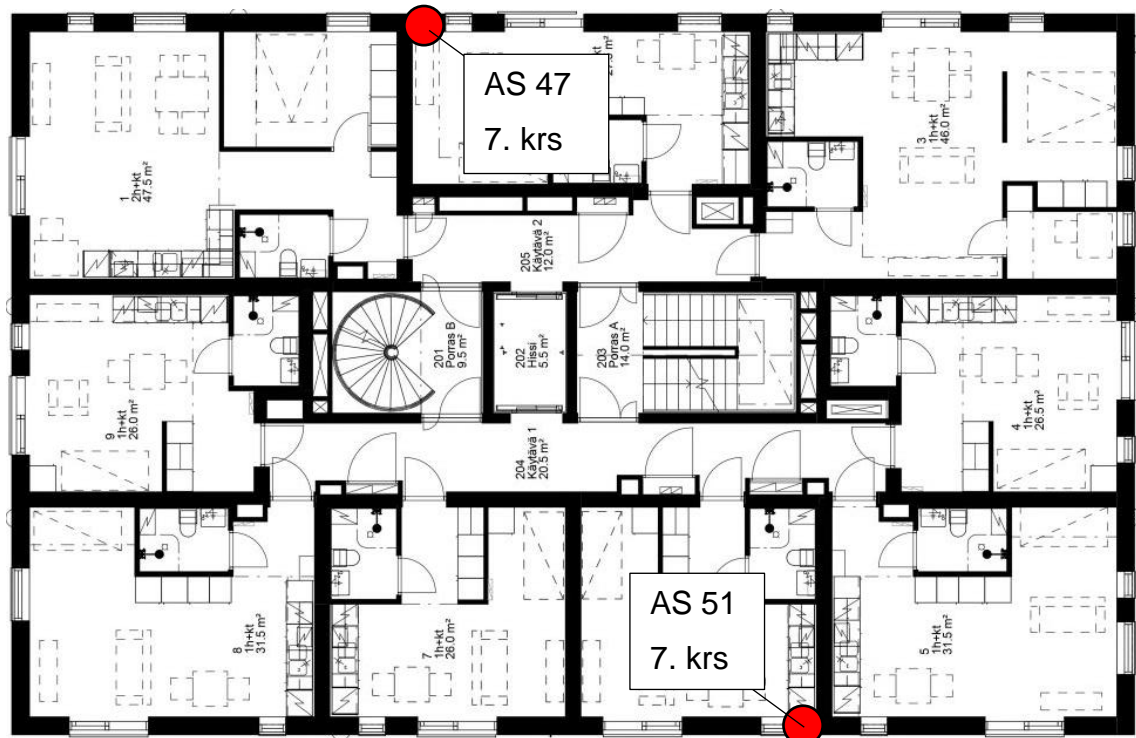


- | | | |
|--------------|---|--|
| | 1 | PINTAMATERIAALI JA -KÄSITTELY
Rakennus-/huoneselostuksen mukaan |
| 8 mm | 2 | JULKISIVULEVITYYS, kiinnitys asennusjärjestelmän mukaan, orret laajenemissaumoin.
Rakennus-/huoneselostuksen mukaan. Pystysaumojen tiivistys ARK ja valm. ohj. muk. |
| 50 mm | 3 | RISTIKOOLAUS/TUULETUSRAKO, Kuumasinkitty teräshatturanka h=25mm, lev=70mm
paksuus 1.0mm (esim. Aulis Lundell HTL25/70*1.0) |
| 9,5 mm | 4 | TUULENSUOJAKIPSILEVY K ₂ 10, esim. Glasroc 9,5 mm Storm tai Cembit Windstopper
levytys pystyyn ja levyn pystysaumot teipataan järjestelmän mukaisella teipillä
levyjen kiinnitys ruuvaamalla k200 esim. Gyproc QSTW Quick |
| 98 mm | 5 | Runko 98x48 k600+kivivilla >30 kg/m ³ . Materiaali vähintään A2-s ₁ , d0, lambda= 0,036 W/mK |
| 126...162 mm | 6 | KANTAVA RAKENNE LVL-X kerrannaisliimattu, suurelementti, höyrynsulku |
| 48 mm | 7 | PUURANKA 48mm ~k600+KIVIVILLA 50 mm, tiheys vähintään 30 kg/m ³ |
| 13+15 mm | 8 | PALOSUOJAUS JA ÄÄNIERISTYS: SUOJAVERHOUSLUOKKA YHDISTETTY K ₂ 30 (A ₂ -s ₁ , d0)
esim. Gyproc GN 13+Gyproc GFL 15 FireLine (huoneen puoleinen levy) |
| | 9 | PINTAMATERIAALI JA -KÄSITTELY
Rakennus-/huoneselostuksen mukaan |

Kuva 13. Lighthousein kantava ulkoseinärakenne [30, 37] ja mittalaitteiden sijoitus rakenteeseen.

Joensuun Elli asennutti mittalaitteet siten, että molemmille 7. kerroksen pitkille ulkoseinille asennettiin kaksi anturia asuntoihin 47 ja 51 (kuva 14). Sisäpuoliset anturit asennettiin ulkoseinärakenteeseen kantavan LVL-rungon ja sisäpuolisen

lämmöneristeen rajapintaan ja ulkopuoliset anturit tuulensuojalevyn ja ulkopuolisen eristeen rajapintaan. Antureiden sijainnit rakenteessa ovat samat kuin kuvassa 12 esitettyjen Karelia-ammattikorkeakoulun antureiden asennuspaikat 2 ja 4. Joensuun Elli käyttää mittauksiinsa Wiisteen valmistamia SolidRH RH/T -mittalaitteita (liite 4). Mittaustulokset rekisteröidään erillisellä laitteella luennan jälkeen Wiisteen Relia -palveluun, josta niitä voidaan jälkikäteen seurata.

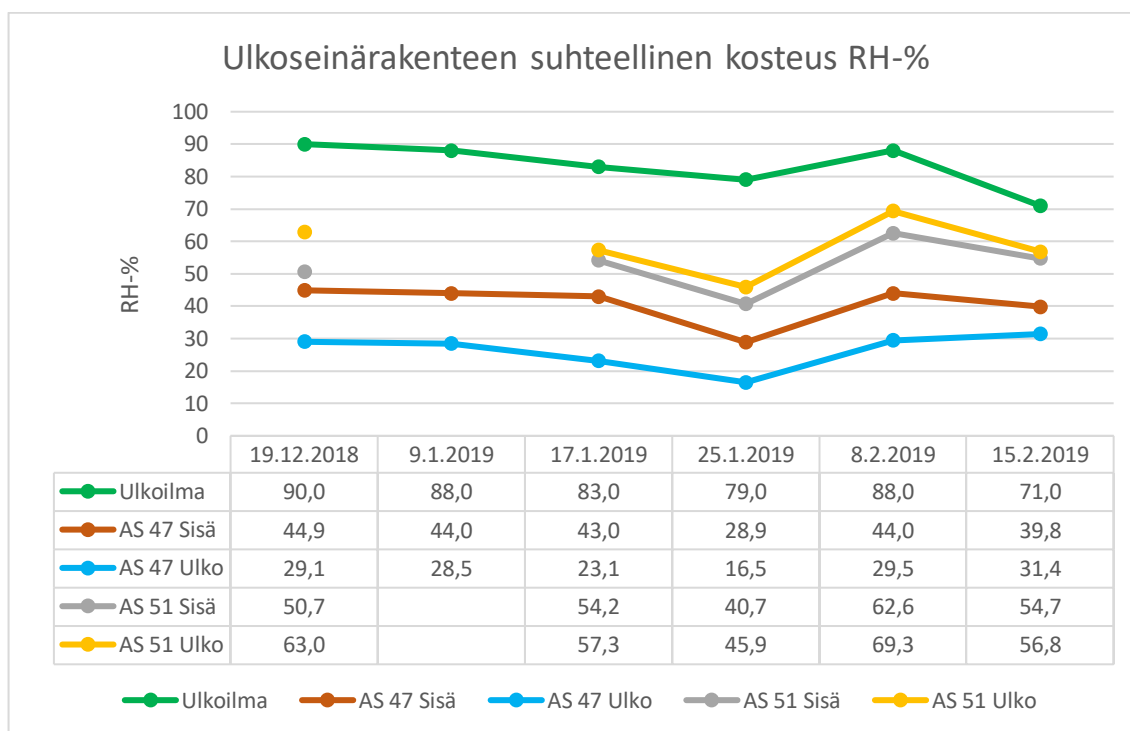


Kuva 14. Joensuun Ellin mittalaitteiden sijoittaminen asuinkerroksessa [12].

5.2.2 Mittaustulokset

Ulkoseinärakenteen lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittaamisen osalta Karelia-ammattikorkeakoulun mittalaitteet eivät ehtineet tätä opinnäytetyötä varten vielä siihen valmiuteen, että ne olisivat pystyneet rekisteröimään tuloksia. Mittalaitteet vaativat tulosten etäkiraamista varten tietoliikenneyhteyden, ja se oli saatavissa kerrostalossa aikaisintaan loppukeväästä. Opinnäytetyön tiedonsaannin kannalta oli onni, että Joensuun Elli asennutti vastaavaa seuranta varten kerrostaloon omat mittalaitteet. Joensuun Elli antoi luvan käyttää heidän antureiden rekisteröimiä tuloksia tätä opinnäytetyötä varten. Dataa tätä opinnäytetyötä varten ei valitettavasti saatu niin laajasti kuin alun perin oli tarkoitus saada Karelia-ammattikorkeakoulun omilla mittalaitteilla. Kuvaajissa 4 ja 5 on esitetty lämpötilan

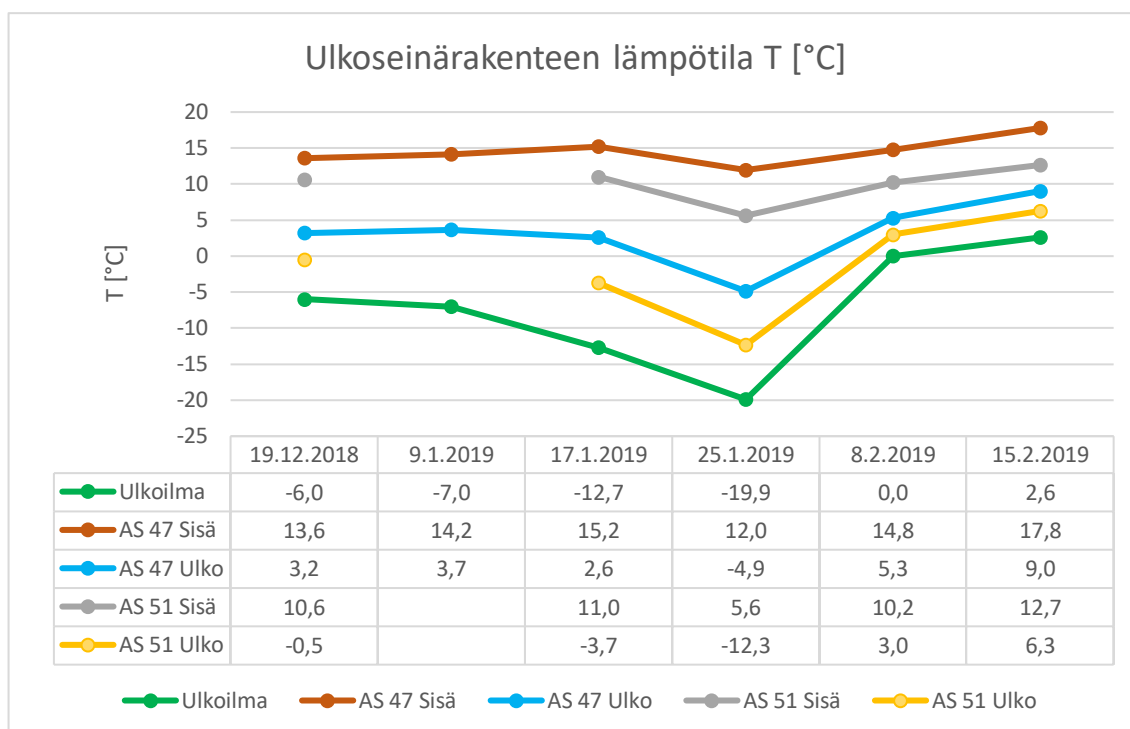
ja suhteellisen kosteuden mittaustulokset. Pisteet kuvaavat mitattuja arvoja. Viivat hahmottavat tulosten kehittymistä.



Kuvaaja 4. Ulkoseinärakenteen suhteellinen kosteus.

Kuvaajasta 4 on havaittavissa, että Pielisjoen puolella sijaitsevan asunnon (AS 51) ulkoseinän mitattu suhteellinen kosteus on kerrostalon vastakkaisella puolella sijaitsevaa asuntoa (AS 47) korkeampi niin rakenteen sisä- kuin ulkopinnasta mitattuna. Mittausajan korkein suhteellinen kosteus mitattiin 8. helmikuuta, kun asunnon 51 ulkoseinän ulkopinnan anturi mittasi suhteellisen kosteuden arvoksi 69,32 %. Rakenteen ulkopuoliset osat pääsevät tuulettumaan, eikä kondensioriskiä pääse syntymään. Mittaustulosten perusteella ulkoseinäelementtejä varten työmaalle hankittu työmaa-aikainen sääsuojateltta on osoittautunut toimivaksi, eivätkä elementit ole päässeet kastumaan (kuva 9).

Kuvaajasta 5 havaitaan, että Pielisjoen puolella olevan asunnon (AS 51) ulkoseinärakenteen mitatut lämpötilat ovat jonkin verran matalampia verrattuna toisella ulkoseinällä sijaitsevaan asuntoon (AS 47) molemmilta antureilta mitattuna. Ulkoilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvoina käytettiin Ilmatieteenlaitoksen rekisteröimiä Joensuun Linnunlahden mittausaseman tuloksia.



Kuvaaja 5. Ulkoseinärakenteen lämpötila.

5.2.3 Mittaustulosten luotettavuus

Lämpötilan ja RH:n mittaustuloksiin vaikuttaa aina päivittäinen ulko- ja sisäilmaolosuhteiden vaihtelu. Näissä tuloksissa on huomioitava myös se, että rakennuksessa ei ollut sisällä vielä tähän opinnäytetyöhön hyödynnettyjen tuloksien mittausaikana käyttöaikaiset lämpö- ja kosteusolosuhteet. Ulkoilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta mitanneet Joensuun Ellin mittalaitteet antoivat sen verran erikoisia tuloksia, että työssä päädyttiin käyttämään Ilmatieteenlaitoksen mittaustuloksia. Jää siis epäselväksi, että ovatko Joensuun Ellin ulkoseinärakenteeseen asennettujen saman valmistajan mittalaitteiden antamat tulokset luotettavia.

Lisäksi mittaustuloksia tässä tutkimuksessa sen verran vähän ja lyhyen aikaa, että lopullisia johtopäätöksiä ei ulkoseinärakenteen toimivuudesta vielä voida tehdä. Myöhemmin pitkällä aikavälillä rekisteröitävät mittaustulokset ja niistä tehtävät yhteenvedot osoittavat varmasti jo paremmin, miten hyvin rakenne toimii kyseisessä kohteessa.

6 Pohdinta

Puukerrostalorakentaminen on varmasti saanut Suomessa lisäpuhtia Joensuu Lighthousen rakentamisesta. Esimerkiksi puukerrostalolla järjestetyt avoimien ovien päivät ovat olleet menestys, ja sisäänpääsyä on joutunut kyseisinä päivinä jopa jonottamaan. Vieraita on saatu kohteeseen jopa Japanista saakka. Suomalaisia kiinnostavat puukerrostalojen mahdollisuudet ja rakentamisen toteutus sekä myös rakentamisen riskit ja niiden välttäminen. Korkeiden puukerrostalojen rakentamisesta opitaan jatkuvasti lisää. Ympäristötavoitteiden kannalta olisi tärkeää, että puu yleistyisi kerrostalojen runkovaihtoehtona ja että puukerrostalorakentamiseen ryhdyttäisiin jatkossa rohkeammin.

Lighthousen rakennuskustannukset nousivat suunnitelluista, mikä on ymmärrettävää kohteen haasteellisuuden takia. Toistaiseksi puukerrostalojen rakentamisen on todettu Suomessa olevan kalliimpaa kuin betonisten kerrostalojen. Vaikka puukerrostalon rakentaminen on nopeampaa, on kustannussyyt todettu suurimmaksi esteeksi puukerrostalojen rakentamiselle. Uskon kuitenkin vakaasti, että tulevaisuudessa rakennettavista puukerrostaloista saatavien kokemusten avulla puukerrostalosta muodostuu kustannuksiltaan kilpailukykyinen vaihtoehto betonikerrostalolle.

Puukerrostalojen kantavan rungon painumisen osalta voidaan Lighthousen ja Pihapetäjän avulla päätellä, että painuman suuruutta on saatu pienennettyä viime vuosina. Eteenpäin vievää kehitystä on siis tapahtunut puukerrostalon rungon suunnittelussa ja toteutuksessa. Kevyen mutta erittäin lujan puurunkonsa ansiosta Joensuu Lighthousen kerrosmäärällä ja korkeudella ei näyttäisi olevan sen suurempaa vaikutusta kerroksittaisen painuman suuruuteen. Käytetty mittaus-tapa ja mittalaitteet sekä niissä hyödynnetyt Novotechin asentosensorit osoittivat tulosten saannin kannalta laadukkaiksi ja tarkoiksi. Lisäksi laitteen rekisteröimien csv-muotoisten tulosten muuntaminen ja tulkitseminen oli lopulta kohtuullisen helppoa. Tulevia tutkimuksia varten olisi kuitenkin suositeltavaa, että mittalaitteille mietittäisiin jo tutkimuksen suunnitteluvaiheessa sellainen sijainti puukerrostalossa, ettei niitä tarvitsisi irrottaa ennen mittausten päättymistä.

Ulkoseinärakenteen rakennusfysikaaliset mittaukset eivät menneet aivan niin kuin alun perin opinnäytetyössä suunniteltiin, mutta lopulta yhteistyö Joensuun Ellin kanssa auttoi pääsemään hyvään lopputulokseen, vaikkakaan mittaustuloksia ei saatu niin paljoa ja laajasti kuin oli tarkoitus. Saaduista tuloksista voidaan kuitenkin todeta, että ulkoseinärakenne, jossa runkorakenteena on käytetty viilupuulevyä, toimii hyvin myös korkeassa puukerrostalossa, kunhan sille kohdistuvat kosteusrasitukset otetaan tarpeeksi tarkasti huomioon suunnittelussa ja rakenteet pidetään kuivina rakentamisen aikana.

Opinnäytetyötä varten suoritettavat mittaukset sujuivat mielestäni melko hyvin. Omat vierailuni puukerrostalolle eivät kertaakaan tuottaneet pettymystä, ja lisäksi tuntui, että kohteesta ja puukerrostalorakentamisesta oppi jokaisella vierailukerralla jotain uutta. Lisäksi yhteistyö eri toimijoiden kanssa sujui opinnäytetyötä tehdessä erittäin hyvin ja nopeasti.

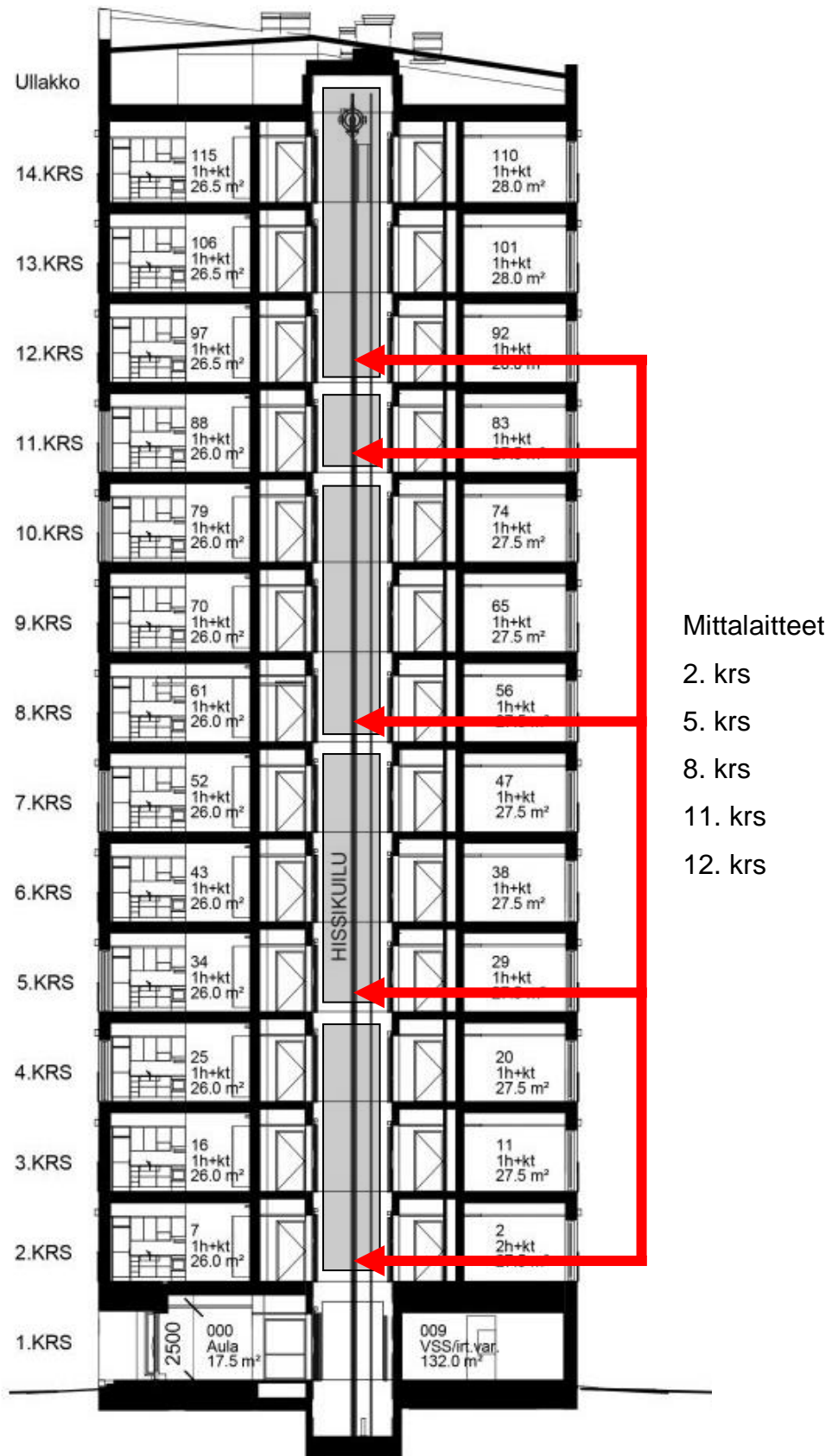
Lähteet

1. Tolppanen, J. Karjalainen, M. Lahtela, T. Viljakainen, M. 2013. Suomalainen puukerrostalo – Rakenteet, suunnittelu ja rakentaminen. Helsinki. Opetushallitus, Puuinfo Oy.
2. Puuinfo. 2018. Valmistuneet puukerrostalot. <https://www.puuinfo.fi/articles/valmistuneet-puukerrostalot>. 10.11.2018.
3. Puuinfo. 2018. Suomalainen puukerrostalohankekanta. <https://www.puuinfo.fi/suomalainen-puukerrostalohankekanta>. 12.11.2018.
4. Puuinfo. 2018. Lukuja ja laskelmia. <https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/lukuja%20ja%20laskelmia%20121118.pdf>. 12.11.2018.
5. Puuinfo. 2019. Puurakentaminen ja ekologinen kestävyys. <https://www.puuinfo.fi/node/1505>. 20.1.2019.
6. Parker, J.M. Kim, Y. Itakura, T. 2018. CLT Guide. Georgia Forestry Association. <http://gfgrow.org/wp-content/uploads/2018/06/CLT-Guide-PDF.pdf>. 22.1.2019.
7. Siikanen, U. 2016. Puurakentaminen. Helsinki. Rakennustieto Oy.
8. Joensuun Pihapetäjä. 2018. Joensuun Pihapetäjä. <http://www.joensuunpihapetaja.fi/joensuun-pihapetaja/>. 20.11.2018.
9. Joensuun Pihapetäjä. 2018. Hanke ja toimijat. <http://www.joensuunpihapetaja.fi/hanke-ja-toimijat/>. 20.11.2018.
10. Varonen, R. 2017. CLT-runkoisen puukerrostalon painumat. Karelia-ammattikorkeakoulu. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/138882/Varonen_Riku.pdf?sequence=1&isAllowed=y. 21.11.2018.
11. Leinonen, T. 2017. Puukerrostalon rakennusfysikaalinen toiminta. Karelia-ammattikorkeakoulu. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/130093/Leinonen_Tero_2017_05_31.pdf?sequence=1&isAllowed=y. 21.11.2018.
12. Arcadia. 2018. Lighthouse. <http://www.arcadia.fi/referenssit/lighthouse>. 12.11.2018.

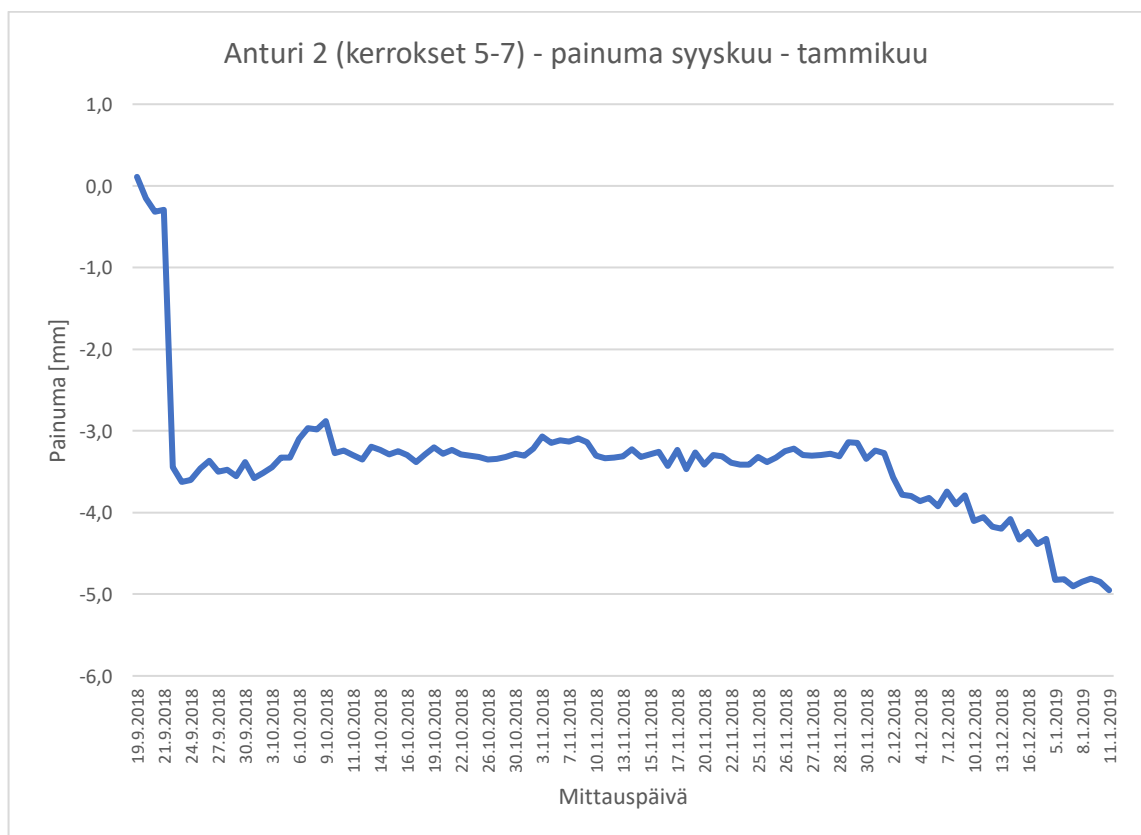
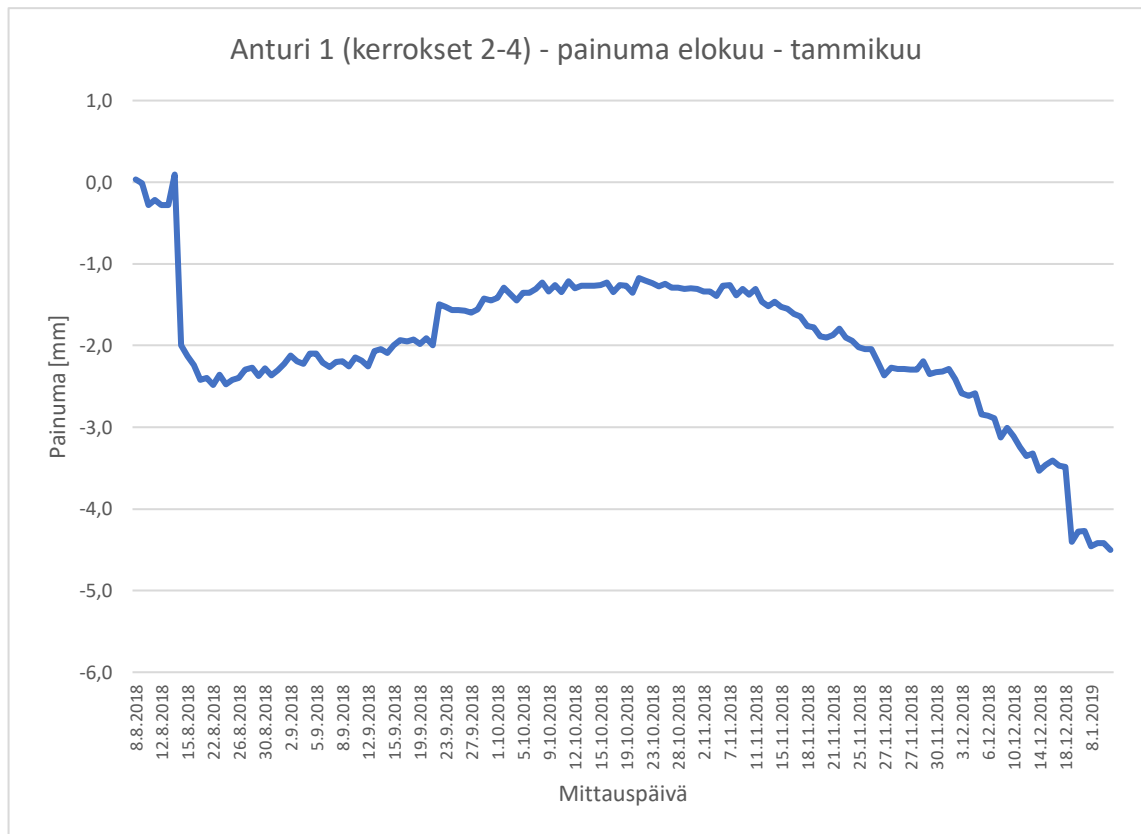
13. Puuinfo. 2018. Lighthouse Joensuu hyödyntää puuta täysimääräisesti. <https://www.puuinfo.fi/tiedote/lighthouse-joensuu-hy%C3%B6dynt%C3%A4%C3%A4-puuta-t%C3%A4ysim%C3%A4%C3%A4r%C3%A4isesti>. 2.12.2018.
14. Puuproffa. 2015. Viilun valmistus. http://www.puuproffa.fi/Puu-Proffa_2012/fi/puujalosteet/viilun-valmistus. 3.12.2018.
15. Puuinfo. 2018. LVL-020-Stora%20Enso_web.jpg. <https://www.puuinfo.fi/tuote/lvl-stora-enso-laminated-veneer-lumber>. 3.12.2018.
16. Stora Enso. 2018. LVL by Stora Enso – Technical brochure. https://www.storaenso.com/-/media/Documents/Download-center/Documents/Product-brochures/Wood-products/LVL_by_Stora_Enso_Technical_brochure_032018_EN_light.ashx. 4.12.2018.
17. Puuinfo. 2016. Esittelyssä uusi LVL by Stora Enso. https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/LVL%20General%20Fact%20Sheet_FI_05052016_light.pdf. 4.12.2018.
18. CrossLam. 2014. CLT-levyn valmistus. <https://www.crosslam.fi/tuotteet/valmistus.html>. 7.12.2018.
19. Stora Enso. 2016. CLT-3.jpg. <https://www.clt.info/fi/tuote/clt-massivipuukurakentaminen/>. 7.12.2018.
20. Stora Enso. 2017. Stora Enso CLT - Puu – maailman vanhin ja myös modernein rakennusmateriaali. <http://www.clt.info/wp-content/uploads/2017/09/Image-brochure-FI.pdf>. 14.12.2018.
21. Hautala, M. Peltonen, H. 2003. Insinöörin (AMK) Fysiikka Osa 1. Jyväskylä. Lahden Teho-Opetus Oy.
22. Ympäristöministeriö. 2002. Suomen rakentamismääräyskokoelma C4 - lämmöneristys, ohjeet 2003. Helsinki.
23. Ympäristöministeriö. 2008. Suomen rakentamismääräyskokoelma C3. Rakennuksen lämmöneristys, määräykset 2010. Helsinki.
24. Siikanen, U. 2012. Rakentajan kalenteri 2012 - Rakennusten lämpö- ja kosteusfysikaalisia näkökohtia. Rakennustietosäätiö RTS, Rakennustieto Oy, Rakennusmestarit ja insinöörit AMK RKL ry. <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK120401.pdf>. 4.2.2019.

25. Pitkäranta, M. 2016. Ympäristöopas 2016. Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus. Ympäristöministeriö. http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/75517/YO_2016_Kuntotutkimus-opas.pdf?sequence=1&isAllowed=y. 13.2.2019.
26. Rakennustieto. 1999. RT 05-10710 Kosteus rakennuksissa. Rakennustietosäätiö.
27. Kosteudenhallinta.fi. 2019. Kosteudenhallintasuunnitelma. <http://www.kosteudenhallinta.fi/index.php/fi/toimet/kosteudenhallintasuunnitelma>. 15.2.2019.
28. Kosteudenhallinta.fi. 2019. Työmaan kosteudenhallinnan suunnittelu. <http://www.kosteudenhallinta.fi/index.php/fi/rakennushankkeen-vaiheet/rakentamisen-valmistelu/162-tyoemaan-kosteudenhallinnan-suunnittelu>. 15.2.2019.
29. Laitinen, P. Korhonen, M. 2018. Opiskelija-asunnot Oy Joensuun Elli - Lighthouse-puukerrostalo olosuhdemittaus – Järjestelmän rakenne, asennus ja käyttöohje. Rakentamisen digitalisaatio -projekti. Joensuu. Karelia-ammattikorkeakoulu. 22.11.2018.
30. Joensuun Juva Oy. 2018. Lighthouse Joensuu rakennetyypit. Joensuu.

Rungon painumaa mittaavien laitteiden asennuspaikat



Rungon painumien mittaustulokset



Rungon painumien mittaustulokset

