



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Sami Musakka

PUUKERROSTALOJEN LÄMPÖTILA- JA KOSTEUSOLOSUHTEI-
DEN MITTAUKSET TYÖMAAVAIHEESSA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Juha Vinha
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
24. huhtikuuta 2017

TIIVISTELMÄ

SAMI MUSAKKA: Puukerrostalojen lämpötila- ja kosteusolosuhteiden mittaukset työmaavaiheessa

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 85 sivua, 48 liitesivua

Joulukuu 2017

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: professori Juha Vinha

Avainsanat: puurakentaminen, puukerrostalo, kosteusmittaus, viilupuun, LVL

Diplomityössä tutkimuskohteena oli puurunkoinen kahdeksankerroksinen asuinkerrostalo Helsingin Jätkäsaaren Wood City -korttelissa. Puurungon kantavat seinät rakennettiin massiivista viilupuulevyistä (LVL) tasoelementteinä ja välipohja viilupuisista ripalaatoista. Kohde rakennettiin ilman sääsuojatelttaa, jollaista on käytetty ainakin puukerrostalokohteissa Suomessa. Rakennustapa ilman sääsuojaa altistaa puurakenteet sään aiheuttamalle rakennusaikaiselle kosteusrasitukselle. Lämmöneristeet puurunkoon asennettiin erillisissä julkisivuelementeissä vesikaton rakentamisen jälkeen.

Kohteeseen toteutettiin lämpötila- ja kosteusolosuhteiden rakennemittauksia, dokumentoitiin muiden mittausten tulokset ja menetelmät sekä arvioitiin mittaustuloksia. Rakennemittauksia kohdistettiin työmaalla tehtyjen kosteushavaintojen ja mittaustulosten seurannan perusteella. Kirjallisuudesta tarkasteltiin puun kosteuskäyttäytymistä, vaurioitumista ja kosteuspitoisuuden mittaamista. Mittauksen kannalta oleellista olivat puun tasapainokosteus eri lämpötiloissa ja vesihöyrynläpäisevyys. Kosteusvaurioitumisen osalta tarkasteltiin olosuhteiden raja-arvoja sekä homeenkasvun riskiä Suomalaisen homemallin avulla. Myös oleellisimmat puun kosteuspitoisuuden mittaamenetelmät ja niiden periaatteet on esitetty työssä.

Viilupuun (LVL) kosteuspitoisuuden porareikämittauksen toteutuksesta on esitetty diplomityön rakennemittauksissa käytetty menetelmä, johon on sovellettu betonin porareikämittaukseen tehtyä ohjekorttia. Työmaan laadunhallintaan kuuluvia olosuhde- ja näytepalamittausten tuloksia käsiteltiin työssä oleellisilta osin. Mittaustuloksia arvioitiin kosteusvaurion syntymisen näkökulmasta sekä tarkastelemalla lämpötila- ja vesihöyrypitoisuuseroja. Kosteuslisää tarkasteltiin ulko- ja sisäilman vesihöyrypitoisuuksien avulla. Säähavaintoja verrattiin paikallisen ilmaston vertailukauteen 30 vuoden ajanjaksolta.

Ilman kattavaa sääsuojaa rakennettaessa suunnittelussa huomiota tulee kiinnittää erityisesti puutuotteen sekä puulajin valintaan, riittävään suojaukseen kosteudelta ja detaljien kosteusriskeihin. Detaljeissa tärkeää on veden ohjautuminen pois rakenteista ja niiden kuivuminen. Työmaalla tulee pyrkiä vähentämään pitkäaikaista rakenteiden kosteusrasitusta esimerkiksi poistamalla lumi ja irtonainen vesi. Olosuhde- ja rakennemittausten riittävän kattavuuden varmistamiseksi on hyvä tehdä kartoitettavia mittauksia kohteessa. Työmaalla jatkuvan olosuhdemittauksen kattavuudesta tulisi varmistua hetkellisillä mittauksilla eri huonetiloissa ja nurkkakohdissa.

ABSTRACT

SAMI MUSAKKA: Field measurements of temperature and humidity in wooden apartment buildings during construction

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 85 pages, 48 Appendix pages

December 2017

Master's Degree Programme in Construction Technology

Major: Structural Design

Examiner: Professor Juha Vinha

Keywords: timber construction, wooden apartment building, humidity measurement, moisture measurement, laminated veneer lumber, LVL

In this master's thesis temperature and moisture conditions were studied in a wooden 8-storey apartment building part of the Wood City block located to Jätkäsaari in Helsinki. Bearing walls were built from massive wood plates made of laminated veneer lumber (LVL) and intermediate floors were constructed with prefabricated wooden ribbed and massive slabs. Building was constructed without whole building covering weather protection, which has been used at least for some wooden apartment buildings in Finland. Construction without weather protection exposes timber structures to rain during installation phase. Thermal insulation was installed with prefabricated façade panels after finishing construction of roof structures.

The main objective of this thesis was to study temperature and moisture conditions in the apartment building with measurements. Measurements of temperature and moisture conditions were executed, results and methods of other similar measurements at construction site were documented and results were evaluated. Points of measurement were determined based on visual observations of conditions at construction site.

Wood moisture behaviour, deterioration and measurement of moisture content was studied from literature. Relevant methods for measurement of wood moisture content are presented in this thesis. Measurement results were analysed using the limit values of conditions that cause moisture damage in wooden materials. The Finnish improved mould growth model was used to evaluate risk of mould growth.

In this thesis method is presented for moisture measurement of laminated veneer lumber by measuring conditions in borehole air. Method was applied from guidelines created for similar measurements in concrete. Apart from this thesis also quality control measurements were made at construction site and relevant results are presented. Measurement results were also evaluated by observing differences in temperature and absolute humidity between different points. Especially increase in absolute humidity of air inside building frame during construction was studied. Also data from weather observations during construction was compared to average local climate from years 1981-2010.

ALKUSANAT

Työ tehtiin osana puukerrostalon kosteusolosuhteiden ja -hallinnan tutkimusta, joka toteutettiin pääasiassa kahtena diplomityönä. Diplomitöiden tekijät olivat työsuhteessa Stora Ensolla ja työskentelivät Tampereen teknillisellä yliopistolla rakennusfysiikan tutkimusryhmän tiloissa.

Haluan kiittää professori Juha Vinhaa diplomityöni tarkastamisesta sekä ohjauksesta. Lisäksi haluan kiittää tohtorikoulutettava Anssi Laukkarista kommentoinnista ja näkökulmista työn sisältöön liittyen sekä avusta kenttämittausten suunnittelussa. Työn suoritukseen sain paljon apua myös muilta rakennusfysiikan tutkimusryhmän jäseniltä ja erityisesti rakennushallin henkilökunnalta.

Tutkimuksen aiheesta ja rahoituksesta kiitän Stora Enson Juha Siebergiä sekä Ympäristöministeriötä. Yhteistyöstä haluan kiittää myös SRV:n työntekijöitä ja erityisesti työnjohtaja Jarkko Liikkasta. Mittausyhteistyöstä haluan kiittää myös RF SensIT Oy:n työntekijöitä ja Aimtec Finland Oy:n Matti Kaartista, joka lainasi pintakosteusmittarin testattavaksi.

Tampereella, 26.11.2017

Sami Musakka

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	LÄMPÖ JA KOSTEUS RAKENNUKSISSA SEKÄ PUUMATERIAALISSA	4
2.1	Lämmön ja kosteuden siirtyminen sekä varastoituminen rakennuksessa	4
2.2	Veden olomuodon eli faasin muutokset	6
2.3	Kosteus puumateriaalissa	7
2.3.1	Lämpötilan vaikutus puun tasapainokosteuteen	10
2.3.2	Kosteustekniset ominaisuudet	11
2.4	Puumateriaalin kosteusvauriot	14
2.4.1	Homeen kasvun riskin arviointi Suomalaisella homemallilla	15
2.4.2	Raja-arvoja ja tavanomaiset olosuhteet puulle	16
2.5	Puun kosteuspitoisuuden mittaamenetelmät	18
3.	MITTAUSSUUNNITELMA JA MITTAUSTEN TOTEUTUS	21
3.1	Tutkimuskohteen esittely	21
3.1.1	Kohteen rakennetyyppejä ja detaljeja	23
3.2	Mittauslaitteisto ja -menetelmät	27
3.2.1	Betonin porareikämittauksen soveltaminen viilupuuhun	28
3.3	Kosteusriskipaikkojen arviointi lähtötiedoista ja havainnoimalla	31
3.3.1	Viilupuulevyn kastumis- ja kuivumiskoe	32
3.3.2	Havainnot olosuhteista työmaalla	33
3.3.3	Kosteusolosuhteiden havaintoja työmaalta	33
3.4	Mittauspisteiden valinta	40
3.5	Muiden mittausten menetelmät ja toteutus	44
4.	MITTAUSTULOSTEN ESITTELY	46
4.1	Säähavainnot	46
4.2	Olosuhdemittaukset toisessa kerroksessa	49
4.3	Rakennemittausten yhteenveto	52
4.4	Mittaustulokset RF SensIT:in toteuttamista mittauksista	55
4.5	Näytepalat	59
5.	TULOSTEN ARVIOINTI	61
5.1	Mittaustulosten luotettavuus	61
5.2	Lämpötila- ja kosteusolosuhteet pinnan lähellä	65
5.3	Kosteuslisän arviointi	66
5.4	Säähavaintojen arviointi	68
5.5	Sääolosuhteet ja homeen kasvun riski	70
6.	JOHTOPÄÄTÖKSET	76
	LÄHTEET	80

LIITE A: Näytepalojen uunikuivausmenetelmän tulokset

LIITE B: Havainnot B-talon puurungon rakentamisen edistymisestä

LIITE C: Mittaustulokset diplomityössä toteutetuista mittauksista B-talossa

LIITE D: Mittaustulokset RF SensIT:in toteuttamista mittauksista B-talossa

LIITE E: Kalibrointitestien mittaustulokset

MÄÄRITELMÄT

Työssä kutsutaan ilman vesihöyrypitoisuutta vesihöyrypitoisuudeksi ja materiaalien kosteuspitoisuutta kosteuspitoisuudeksi.

CLT

Monikerroslevy (eng. cross laminated timber) on massiivipuulevyä, joka valmistetaan kerroksittain liimatuista rimoista tai laudoista. Tyypillinen paksuus noin 5 – 30 senttimetriä. (Puuinfo 2017) Kutsutaan myös ristiinlaminoiduksi puuksi.

Insinööripuutuotteet

Insinööripuutuotteiksi (eng. engineered wood product) on määritelty yleisesti puusta liimamalla tehdyt rakennustuotteet. Insinööripuutuotteita ovat esimerkiksi liimapuu, CLT, LVL ja I-palkit. (Suomen metsäyhdistys 2017)

Massiivipu

Massiivipuulla viitataan perinteisesti hirsirakentamiseen ja nykypäivänä erilaisiin liimatuihin puutuotteisiin. Massiivipuukurakenteissa puumateriaalia käytetään huomattavasti enemmän verrattuna rankarunkoon. Perinteinen rankarunko ei ole kantavuudeltaan ja jäykistysominaisuuksiltaan riittävä korkeaan kerrostalorakentamiseen.

Viilu

Viilu (eng. veneer) on ohut pyörivästä pölkystä sorvattu siivu. (Suomen metsäyhdistys 2017)

Vaneri

Vaneri (eng. plywood) valmistetaan liimaamalla viiluja päällekkäisiksi kerroksiksi. Viilut liimataan yleisimmin ristiin ja puun syyt ovat tällöin myös ristikkäin. (Suomen metsäyhdistys 2017) Yksittäisen viilun paksuus on 1,4-3,2 mm (Puuinfo 2017).

Viilupuu, LVL

Viilupuu (eng. laminated veneer lumber) valmistetaan noin kolme millimetriä paksuista viiluista, jotka laminoidaan eli liimataan yhteen puristamalla ja lämmittämällä. Viilut sorvataan tukeista kerroksina vastaavalla tavalla kuin vanerin valmistuksessa (Stora Enso 2016). Palkeissa ja pilareissa viilut ovat pääasiassa samansuuntaisia ja levytuotteissa yleensä osa viiluista liimataan ristiin. Viilupuu valmistetaan pohjoismaissa havupuusta, mutta muualla maailmassa myös muista puulajeista. Viilupuuta valmistetaan myös esimerkiksi tuotenimillä Pohjois-Amerikassa Microllam LVL ja Keski-Euroopassa Steico LVL ja Suomessa Kerto LVL, johon pohjautuu usein kirjallisuudessa käytetty nimitys kertopuu.

1. JOHDANTO

Viime vuosina Suomessa ja maailmalla kiinnostus puurakentamista kohtaan on kasvanut merkittävästi. Useat suunnitteilla ja viime vuosina rakennetut puukerrostalokohteet ovat aiempia kohteita korkeampia. Puukerrostalojen ja erityisesti korkeampien kohteiden rakentaminen vaatii uusia ratkaisuja ja menetelmiä rakentamisessa. Vaatimukset rakentamiselle vaihtelevat maailmalla sekä jossakin määrin myös Pohjoismaiden välillä, mikä vaikuttaa oleellisesti puukerrostalon rakenteisiin ja rakentamiseen. Suomessa vaatimuksia rakennukselle ovat esimerkiksi terveellisyys, paloturvallisuus, energiatehokkuus ja ääneneristävyys, jotka omilta osiltaan vaikuttavat puukerrostalon toteutukseen. Rakentamisen kosteudenhallintaan on kiinnitetty erityistä huomiota viime vuosina ja sen yhtenä tärkeänä tavoitteena on välttää kosteusvaurioiden syntymistä. Kosteudenhallinnan vähimmäistason määrittää käytettyjen rakennusmateriaalien kosteudensietokyky ja niiden sääaltistus työmaalla sekä varastoinnissa. Osana kosteudenhallintaa voidaan käyttää erilaisia sääsuojia, jotka toteutuksensa laajuudesta riippuen voivat olla merkittävä kustannus rakennusvaiheessa. Ainakin Suomessa puukerrostalokohteissa on käytetty koko talon kattavia sääsuojia. Hyvällä kosteudenhallinnalla voidaan myös säästää kustannuksissa työmaan kuivatuksen toimenpiteiden ja keston osalta. Sääsuojan käyttö sallii myös kosteudelle herkkien materiaalien käytön työmaalla aikaisessa rakennusvaiheessa.

Wood City on Helsingin Jätkäsaareen rakennettava puukerrostalojen kokonaisuus, johon kuuluu kaksi kahdeksankerroksista asuinrakennusta, toimistorakennus ja hotelli. Kohdetta toteutetaan SRV:n ja Stora Enson yhteishankkeena. Asuinrakennusten tilaaja on Helsingin kaupungin Asuntotuotantotoimisto ATT (nyk. asuntotuotanto) ja kohteen arkkitehtisuunnittelija on Anttinen Oiva Arkkitehdit Oy. Asuinrakennusten runko hissikui-lineen on Stora Enson valmistamaa massiivista viilupuulevyä (LVL) Varkauden uudelta tehtaalta. Kohteessa massiivipuulevyt asennetaan ilman kattavaa kokoaikaista sääsuojasta tavoitteena yhden kerroksen asentaminen viikossa (Kuva 1.1). Rakennuksen sivuille asennettavien puulevyjen ja valmiiden välipohjien on tarkoitus suojata alempia kerroksia säärasitukselta. Vesikaton asentamisen jälkeen aloitetaan julkisivun asennus lämmöneristeineen.



Kuva 1.1. Julkisivuasennusta ensimmäiseen asuintaloon eli B-taloon itäpuolelta. (15.6.2017)

Diplomityö tehdään osana Puukerrostalotyömaan kosteusolosuhteet ja kosteudenhallinta -tutkimusta, joka toteutetaan pääosin kahtena Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laboratorion (ent. laitos) diplomityönä. Tutkimuksen yleisenä tavoitteena on seurata puurakenteisten asuinkerrostalojen työmaatoteutusta sekä lämpö- ja kosteusolosuhteita, dokumentoida ne ja antaa niiden perusteella suosituksia puukerrostalojen työmaavaiheen kosteudenhallintaa varten. Diplomitöiden lisäksi hankkeesta ja sen tuloksista laaditaan Rakennusfysiikka 2017 –seminaariin kaksi artikkelia, joista yksi käsittelee ensisijaisesti toteutettuja mittauksia sekä mittaustuloksia ja toinen työmaan kosteudenhallinnan prosessia. Diplomityön kosteudenhallinnasta tekee Olavi Penttilä.

Kerrostalorakentamisessa on käytetty Suomessa perinteisesti materiaalina eniten betonia. Betonirakentamisen kosteudenhallinnasta on saatu paljon käytännön kokemuksia, jonka pohjalta on laadittu myös ohjeistusta. Nykyaikaisesta massiivipuurakentamisesta on vähemmän kokemuksia eikä betoni ole puumateriaaleja vastaavalla tavalla herkkä kosteusvaurioille. Erilaisesta rakenteesta johtuen viilupuun kosteuskäyttäytyminen kastumisen ja kuivumisen osalta todennäköisesti eroaa muista puutuotteista. Viilupuun on uusi materiaali massiivipuuelementtinä käytettynä. Massiivipuurakentamista ristiin liimatulla puulevyllä (CLT) on useammassa kohteessa maailmalla tehty ilman sääsuojia. Liimapuusta ja CLT:stä poiketen viilupuussa liimakerrokset ovat huomattavasti tiheimmin eivätkä muihin puutuotteisiin toimivat kosteuden mittausten menetelmät välttämättä ole toimivia. Tämän diplomityön päätavoitteena on tarkastella rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa työmaavaiheen aikana mittausten avulla. Työtä ohjaa ja valvoo professori Juha Vinha.

Diplomityön osatavoitteet ovat:

- 1) rakenteiden kenttämittausten toteutus
- 2) muiden työmaalla olevien kenttämittausten toteutuksen seuranta sekä niiden kehittäminen ja etujen arviointi
- 3) mittaustulosten seuranta ja analysointi sekä
- 4) dokumentoida tehtyjen kenttämittausten toteutustavat ja tulokset sekä antaa ohjeita myöhemmin tehtäviä vastaavia mittauksia varten.

Kenttämittauksilla tarkastellaan erityisesti viilupuurakenteiden lämpö- ja kosteusolosuhteita. Mittaukset pyritään kohdistamaan kosteusrasitettuihin paikkoihin. Työmaalla toteutetaan myös muita kenttämittauksia ja kaikkia mittauksia tarkastellaan kokonaisuutena, jotta huomioitaisiin hyvin erilaiset rakenteet. Mittaustuloksista tarkastellaan esimerkiksi lämpötila- ja vesihöyrypitoisuuseroja, ilman suhteellisen kosteuden eri raja-arvojen ylitymistä sekä rakenteiden kastumista ja kuivumista. Soveltuvien osin määritetään Suomalaisen homemallin mukaisia homeindeksejä, jotka kuvaavat homeen kasvun riskiä. Mittaustuloksia verrataan lähimmän sääaseman havaintoihin sekä pidemmän ajan paikalliseen ilmastoon. Kenttämittausten dokumentoinnissa kuvataan käytetyt mittausten menetelmät, mittauspisteet, tulokset ja niiden tulkinta. Lisäksi työssä annetaan ohjeita mittaustulosten järjestelmän suunnitteluun.

Työssä käsitellään rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa rakennusaikaisten mittausten avulla. Rakenteiden rakennusfysikaalista toimintaa valmiin rakennuksen käyttöaikana ei tarkastella, mutta selkeisiin havaittaviin ongelmakohtiin kiinnitetään huomiota ja tuodaan ne esille työmaalla sekä diplomityössä. Kosteuspitoisuuksien raja-arvoja tarkastellaan rakenteiden kuivumisen näkökulmasta, jotta kosteusvaurioita ei synny rakentamisen tai myöhemmin käytön aikana. Rakennustuotannon osa-alueella ja siihen kuuluvaa työmaan toiminnan arviointia on käsitelty tutkimusprojektiin liittyvässä toisessa diplomityössä. Tutkimuksessa selvitetään kirjallisuudesta lämmön- ja kosteuden siirtymisen ilmiöt, puun kosteuden mittausten menetelmät ja kosteusvaurioiden syntymisen raja-arvot. Kosteusmittaukset toteutetaan olosuhte- ja porareikämittauksina ilman suhteellisen kosteuden sekä lämpötilan mittaustuloksilla. Mittaustuloksia verrattiin näytepalojen uunikuivausmenetelmällä määritettyihin kosteuspitoisuuksiin. Työmaalla testattiin myös pinta- ja piikkikosteusmittarien toimintaa viilupuumateriaaliin.

Tutkimuskohteena olevan asuinrakennuksen B-talon rakentaminen aloitettiin syksyllä vuonna 2016 marraskuussa ja puurungon rakentaminen joulukuussa. Tutkimus ajoittuu kuuden kuukauden jaksolle tammi-kesäkuulle vuoden 2017 puolelle. Tammikuussa perhdyttiin mittalaitteiden käyttöön, työmaan suunnitelmiin ja alustavasti aihepiirin kirjallisuuteen. Tammikuussa testattiin ja säädettiin käytettävät mittalaitteet. Ensimmäiset mittaukset toteutettiin helmikuun alussa. Mittauksia toteutettiin ja seurattiin kevään aikana työmaalla lähes viikoittain. Mittaukset purettiin kesäkuun alussa ja mittalaitteille tehtiin jälkitestaus.

2. LÄMPÖ JA KOSTEUS RAKENNUKSISSA SEKÄ PUUMATERIAALISSA

Tarkasteltaessa rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa on oleellista tuntea eri ilmiöt lämmön ja kosteuden siirtymisessä sekä varastoitumisessa. Määritettäessä puumateriaalin kosteuspitoisuutta on oleellista ymmärtää mittausmenetelmän toimintaperiaate, tarkkuus ja erilaiset virhelähteet. Kappaleessa on käsitelty lämmön ja kosteuden siirtymistä sekä varastoitumista, veden faasin eli olomuodon muutoksia ja kosteutta puumateriaaleissa. Erityisesti on tarkasteltu puumateriaalien kosteuspitoisuutta erilaisissa olosuhteissa sekä vertailtu viilupuulle ja kuusen sahatavaralle kirjallisuudessa esitettyjä kosteuspitoisuuksien arvoja. Viimeisenä kappaleessa on käsitelty eri menetelmiä puun kosteuspitoisuuden määrittämiseen.

2.1 Lämmön ja kosteuden siirtyminen sekä varastoituminen rakennuksessa

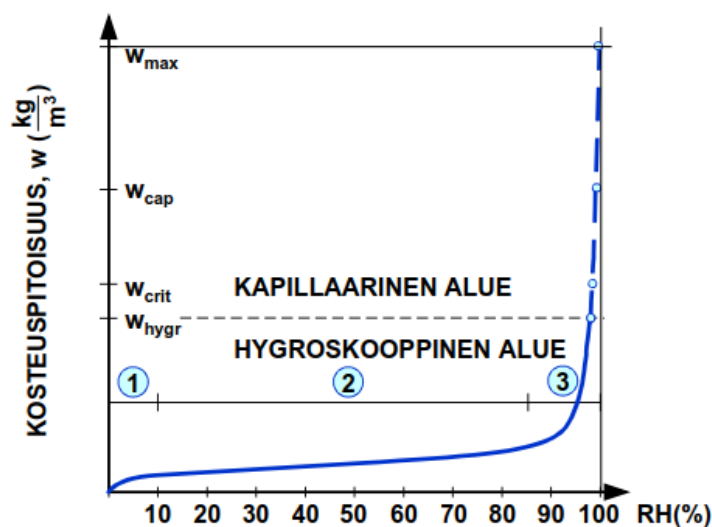
Kosteudella tarkoitetaan vettä eri olomuodoissaan kaasumaisena, nestemäisenä ja kiinteänä aineena. Lämmöllä tarkoitetaan lämpöenergiaa, jonka siirtyminen eroaa oleellisesti aineen siirtymisestä. Fysikaalisia ilmiöitä voidaan yksinkertaisesti tarkastella hallituissa koeolosuhteissa, mutta todellisissa käytännön olosuhteissa useat ilmiöt vaikuttavat samanaikaisesti tarkasteltaviin muuttujiin, joita ovat esimerkiksi lämpötila, ilman vesihöyrypitoisuus ja materiaalin kosteuspitoisuus. Ulkona olosuhteisiin ja eri muuttujiin vaikuttavat esimerkiksi ilmasto, vuodenaika, tuuli, auringon paiste ja sade.

Lämmön siirtymisellä tarkoitetaan lämpöenergian siirtymistä korkeammasta lämpötilasta matalampaan. Lämmön kolme siirtymistapaa ovat: johtuminen, konvektio ja säteily. Johtuessa lämpö kulkeutuu aineessa molekyylien värähtelyn välityksellä. Konvektiossa lämpö kulkeutuu väliaineen virtauksen mukana joko ilmassa tai vedessä. Säteilemällä lämpöenergia siirtyy ilman väliainetta eri kappaleiden välillä. (Hagentoft 2001)

Aineen siirtyminen rakennusfysiikassa keskittyy käsittelemään ilman ja veden siirtymistä. Ilmavirtoja rakennuksessa aiheuttavat lämpötilaeroista johtuvat ilman tiheyden muutokset sekä tuulen ja koneellisen ilmanvaihdon aiheuttamat paine-erot. Rakennuksessa vesi siirtyy nesteenä tai höyrynä. Veden siirtymistapoja ovat diffuusio, konvektio ilman mukana, kapillaarinen imu sekä tuulenpaineen tai painovoiman aiheuttama vedenpaine. Diffuusio tarkoittaa erilaisten vesihöyrypitoisuuksien tasoittumista vesimolekyylien siirtyessä suuremmasta pitoisuudesta pienempään. Konvektiolla tarkoitetaan tässä tapauksessa virtaavan ilman mukana kulkevaa vesihöyryä. Kapillaarinen veden imu aiheutuu huokosten synnyttämistä kapillaarivoimista. (Hagentoft 2001) Kapillaarinen imu voi aiheuttaa voimakasta nestemäisen veden kulkeutumista materiaaliin.

Eri materiaalit rakennuksessa pystyvät varastoimaan lämpöä sekä kosteutta. Aineen ominaisuutta varastoida lämpöä kutsutaan ominaislämpökapasiteetiksi, joka määrittelee lämpöenergian määrän aineessa lämpötilan ja massan suhteen. Suuren ominaislämpökapasiteetin omaavat materiaalit tasapainottuvat hitaasti ympäristön lämpötilan muutoksiin, mikä aiheuttaa lämpötilaeroja myös rakenteen pinta- ja sisäosien välillä. Ominaislämpökapasiteetin lisäksi oleellinen merkitys on materiaalin lämmöneristävyydellä, joka hidastaa lämpötilan muutosta materiaalin sisällä. Lämpötilaa vastaavasti voidaan materiaalin kykyä varastoida kosteutta kuvata ominaiskosteus­kapasiteetilla. Suuren ominaiskosteus­kapasiteetin omaava materiaali tasapainottuu hitaasti ympäristön olosuhteisiin ja tasapainottumisen nopeus riippuu kosteuden eri siirtymis­ilmioistä. Lämpötila- ja kosteusjakaumia materiaalin sisällä kutsutaan lämpötila- ja kosteus­gradien­teiksi. Mahdollinen kosteusjakauma materiaalissa tulee ottaa huomioon kosteus­pitoisuutta määritettäessä. Kosteusjakauman aiheuttamat virheet ovat merkittäviä erityisesti pintakosteusmittauksessa, jossa ei havaita kosteusjakaumaa materiaalissa.

Huokoisten materiaalien kosteus­pitoisuus pyrkii tasapainoon ympäristönsä ilman suhteellisen kosteuden mukaiseen tasapainokosteuteen. Materiaalien ominaisuutta sitoa ja luovuttaa kosteutta vuorovaikutuksessa ilman kanssa kutsutaan hygroskooppisuudeksi. Täysin kuivan materiaalin alkaessa sitoa kosteutta itseensä sitoutuminen tapahtuu kolmessa vaiheessa, joista ensimmäisessä vesimolekyylit kiinnittyvät huokosseinämiin yksimolekyylisenä kerroksena sähköisten sidosten avulla ja toisessa vaiheessa useammaksi vesimolekyylikerrokseksi. Kolmas vaihe on kapillaarikondenssi, joka alkaa pienimpien huokosten täytyessä vesimolekyyleistä. Kapillaarikondenssi havaitaan tasapainokosteuskäyrän kulmakertoimen kasvamisena (kuva 2.1). Esimerkkinä olevaan kuvaajaan on merkitty kolme ilman kosteuden sitoutumisen eri vaihetta. Tasapainokosteuskäyrän muoto ja raja-arvot riippuvat materiaalin huokos­ver­koston ominaisuuksista. (Hens 2012, Vinha 2011 ja 2017)



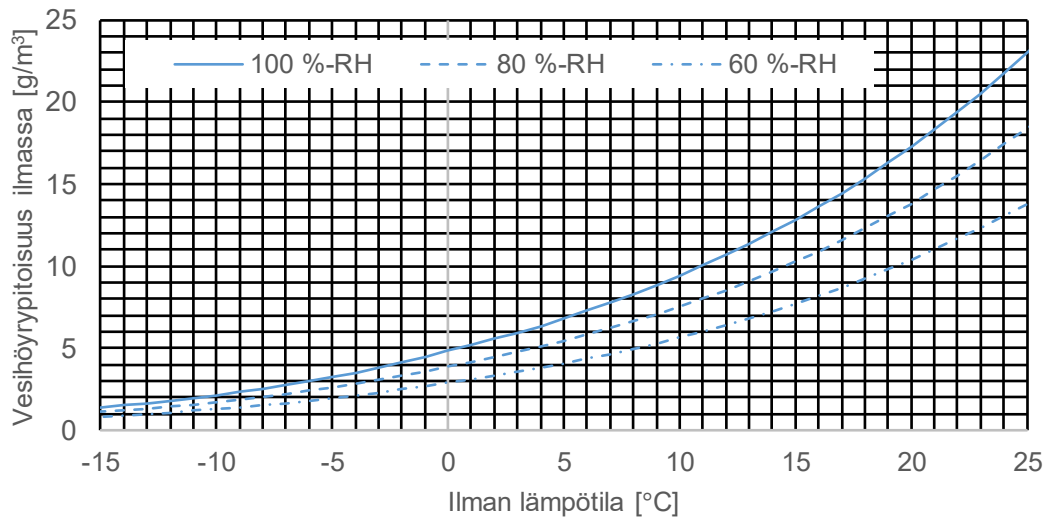
Kuva 2.1. Esimerkki huokoisen materiaalin tasapainokosteuskäyrästä ja kosteus­pitoisuuden raja-arvoista. (Vinha 2017)

Kosteuspitoisuudelle on erilaisia raja-arvoja, jotka on esitetty kuvassa 2.1. Hygrokoop-pisen alueen ylärajaksi (w_{hygr}) on määritetty 98 % RH ilman suhteellista kosteutta, koska yläraja on korkein saavutettu arvo koekappaleelle kosteuskammiossa ilman ylipainetta. Kyseisestä ylärajasta alkaa kapillaarinen alue. Kapillaarisella alueella olevia raja-arvoja ovat kriittinen kosteuspitoisuus, kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus sekä maksimi-kosteuspitoisuus. Kriittisen kosteuspitoisuuden (w_{crit}) yläpuolella kosteus siirtyy materi-aalissa pääosin nestemuodossa ja kapillaarinen kyllästyskosteus (w_{cap}) on materiaaliin ka-pillaarisesti imeytyvä vesimäärä. Lisäksi on olemassa raja-arvo suurimmalle kosteuspitoisuudelle vesiupotuksessa (w_{eff}). Materiaalin maksimikosteuspitoisuus (w_{max}) saavute-taan vakuuimissa poistamalla kaikki huokosilma. Materiaalilla on erilaiset tasapainokos-teuskäyrät eli sorptiokäyrät sen luovuttaessa ja sitoessa kosteutta. Adsorptiokäyrällä ku-vataan kosteutta sitovaa ja desorptiokäyrällä kosteutta luovuttavaa tasapainokosteuden tilaa. Käyrien välistä eroa kutsutaan hystereesiksi. Materiaalin tasapainokosteus on muut-tuvissa olosuhteissa tavanomaisesti sorptiokäyrien välillä. (Hens 2012, Vinha et al. 2005, Vinha 2017)

2.2 Veden olomuodon eli faasin muutokset

Vesi esiintyy kolmessa eri olomuodossa eli faasissa höyrynä, nesteinä ja kiinteänä. Ai-neen olomuodon muuttuminen sitoo tai vapauttaa lämpöenergiaa. Jos faasimuutos tapah-tuu liikkuvassa aineessa, kulkeutuu mukana faasimuutoksen energiaa vastaava latentti-lämpö. Latenttilämpö ei muutu lämpötilan mukaan vaan riippuu kappaleen faasista. (Hens 2012) Esimerkiksi nestemäisen veden haihtuminen ilmaan materiaalin pinnalta sitoo läm-pöenergiaa ja laskee pinnan lämpötilaa. Veden tiivistyminen eli kondensoituminen pin-nalle vapauttaa lämpöenergiaa ja nostaa pinnan lämpötilaa. Suuruusluokaltaan veden höyrystymisen vaatima energia 0 °C lämpötilassa on noin 2500 kilojoulea eli 0,7 kWh litraa kohti. Vesihöyryn tiivistyessä ilmasta pinnoille nesteeksi vapautuu sama määrä lämpöenergiaa. Ilman sisältämä vesimäärä on tavanomaisesti grammoja eli millilitroja kuutiota kohden. Veden ominaislämpökapasiteetti eli 1 °C lämpötilan muutosta vastaava energiamäärä kilogrammalle vettä nollassa asteessa on 4,2 kilojoulea tai vesihöyrylle 1,8 kilojoulea.

Kosteus ilmassa on vesihöyryä osana ilman kaasuseosta. Ilman vesihöyrypitoisuutta ra-joittaa ilman lämpötilasta ja paineesta riippuva vesihöyryn kyllästyspitoisuus (Kuva 2.2). Ilman suhteellinen kosteus kuvaa ilman vesihöyrypitoisuutta osuutena vesihöyryn kylläs-tyspitoisuudesta tietyssä lämpötilassa. Ilman lämpötilan laskiessa vesihöyrypitoisuus ei ylitä kyllästyspitoisuutta vaan vesi alkaa kondensoitua eli tiivistyä nesteeksi.



Kuva 2.2. Ilman vesihöyrypitoisuus laskettuna lämpötilasta standardin SFS-EN ISO 13788 (2012) mukaan ja suhteellisen kosteuden arvoja.

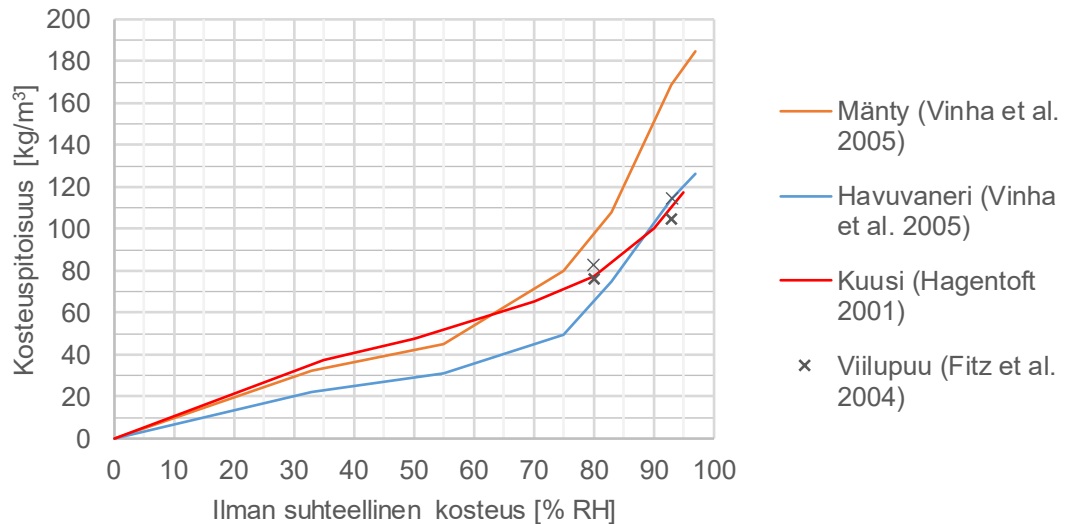
Kuvasta Kuva 2.2 voidaan havaita ilman sisältämän vesihöyryn merkittävä vaihtelu normaalilämpötilassa. Yhden vesigramman merkitystä ilmassa voidaan havainnollistaa esimerkiksi, jossa 100 neliömetrin porraskäytävässä ilma vaihtuu kerran tunnissa. Oletetaan, että yksi gramma vettä haihtuu jokaiseen kuutioon ilmaa viikon aikana. Tällöin 168 tuntia ja 300 kuutiota ilmaa vastaisi 50,4 kilogrammaa vettä. Vastaavasti voisi yksi gramma kuutiosta ilmaa tiivistyä viileälle pinnalle. Kuvaaaja havainnollistaa myös eri lämpötilassa olevan ilman kapasiteettia kuivattaa kosteutta, kun ilman suhteellinen kosteus on esimerkiksi 60 % RH:ta.

2.3 Kosteus puumateriaalissa

Materiaalina puu on anisotrooppinen, mikä tarkoittaa sen ominaisuuksien olevan erilaiset eri suunnissa. Eri suuntia puun rakenteessa ovat kasvun suunta pituussuuntaan sekä poikisuunnassa vuosirenkaan säteen ja tangentin suunta. Puun ominaisuudet säteen ja tangentin suunnassa syitä vasten kohtisuoraan ovat monella tapaa samankaltaiset. Yksittäinen puu koostuu pääasiassa puukuiduista eli pystysuuntaisista soluista, jotka välittävät vettä elävän puun juuresta ylöspäin. Solut koostuvat seinämästä ja ontelosta, joiden koko riippuu kasvun vuodenaikasta ja näkyy puussa vuosirenkaina. Puu ja soluseinämiä koostuvat pääasiassa selluloosasta, hemiselluloosasta ja ligniinistä, jotka ovat polymeerejä eli suuria molekyyliä. Puupolymeereillä on materiaalina erilaiset tasapainokosteuskäyrät, joiden painotettu keskiarvo muodostaa puumateriaalin tasapainokosteuskäyrän. (Wadsö 1993) Vettä on puussa vapaana vetenä soluonteloissa ja sitoutuneena soluseinämiin. Vapaan veden kuivuttua puussa on puun syiden kyllästymispiste, joka vastaa kuusella ja männyllä noin 30 painoprosenttia kosteutta. Soluseinämiin sitoutuneen kosteuden alkaessa kuivua myös puu alkaa kutistua. (Siikanen 2016) Puun syiden kyllästymispiste on lähellä hygroskooppisesti sitoutuneen kosteuden maksimiarvoa.

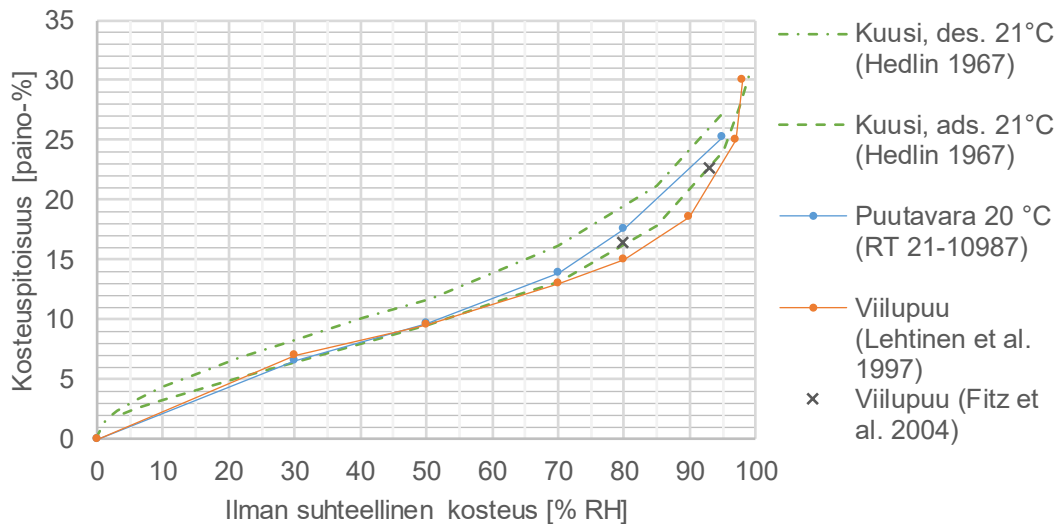
Veden sitoutuminen puumateriaaliin poikkeaa muista hygroskooppisista materiaaleista. Puun soluseinämästä vain noin kaksi prosenttia on huokostilavuutta (Stamm 1964 ja Wadsö 1993) ja huokokset ovat liian suuria kapillaarikondenssin syntymiseen. (Wadsö 1993) Thybring et al. (2012) ovat tarkastelleet puumateriaalin ja veden välisen käyttäytymisen teorioita ja johtopäätöksissään todenneet, että kapillaarinen sorptio ei ole merkittävää syiden kyllästyspistettä pienemmillä kosteuspitoisuuksilla, vaan sorptiokäyrän kulmakertoimen muutos tapahtuu muusta syystä. On myös havaittu, että osa sitoutuneesta vedestä muuttaa faasia lämpötilojen -10 ja -20 °C välillä (Berthold et al. 1996 ja Thybring et al. 2012). Sitoutunut vesi ei esiinny vapaasti materiaalin soluhuokosissa. Vaikka puumateriaalin kosteuskäyttäytymisestä ei ole täyttä selkeyttä, vanhat laskentamallit ovat tuloksiltaan oikeansuuntaisia. Laskentamallit on usein perusteltu kokeellisilla tuloksilla, mikä selittää niiden oikeansuuntaisia tuloksia, vaikka taustalla olevat oletukset teoriasta olisivat olleet vääriä. Lisäksi kosteuspitoisuuden alue, jolla puutteellisilla lähtötiedoilla tehty oletus on päätelty, voi olla rajoitettu esimerkiksi lähelle syiden kyllästyspitoisuutta.

Kuvassa 2.3 on esitetty havupuusta valmistettujen sahatavaran, viilupuun ja vanerin tasapainokosteus. Fitz et al. (2004) ovat määrittäneet viilupuutuotteille kaksi erilaista kuiva-tiheyttä eri lämpötiloissa (462 ja 506 kg/m³) ja kuvaajassa on esitetty molemmilla arvoilla painoprosentista lasketut kosteuspitoisuudet. Pienempi tiheys eli alemmat tummemmalla esitetyt arvot kuvaajassa on esitetty ensisijaisina myös lähteessä ja suurempi tiheys on laitettu sulkuihin. Laskentaan käytetystä tiheydestä huolimatta kosteuspitoisuudet sijoituvat lähelle kuusen keskimääräistä tasapainokosteutta. Kuvaajassa esitettyjen tietojen perusteella viilupuun tasapainokosteus on hyvin lähellä sen raaka-aineen eli kuusen tasapainokosteutta. Pienet erot tiheyksissä voivat johtua kuusipohjaisen sahatavaran ja viilupuun valmistustekniikoista. Oletetusti kyllästetyn tai muuten käsitellyn viilupuun tasapainokosteus muistuttaa vastaavasti käsitellyn kuusen tai muun raakamateriaalin tasapainokosteutta. Männyn, kuusen ja havuvanerin tasapainokosteuskäyrät on esitetty myös julkaisussa RIL 255-1-2014.



Kuva 2.3. Puumateriaalien keskimääräinen tasapainokosteus.

Kuvassa 2.4 on esitetty kuusen tasapainokosteuden arvot painoprosenttina ja verrattu niitä arvoihin RT-kortissa 21-10978, jossa on esitetty yleinen tasapainokosteuskäyrä puutavaraalle. Käyrien muotoon vaikuttaa hieman tarkastelupisteiden lukumäärä, jolla käyrät on määritetty. RT-kortin esittämä käyrä osuu Hedlinin (1967) esittämien sorptiokäyrien välille lukuun ottamatta arvoja alle 30 % RH:ta, joita ei ole erikseen tarkasteltu ja kuvaajassa on tehty lineaarinen yksinkertaistus pisteiden välillä.



Kuva 2.4. Kuusen ja viilupuuun tasapainokosteus painoprosentteina. (Viilupuu: Kerto-käsikirja 2005 ja Lehtinen et al. 1997)

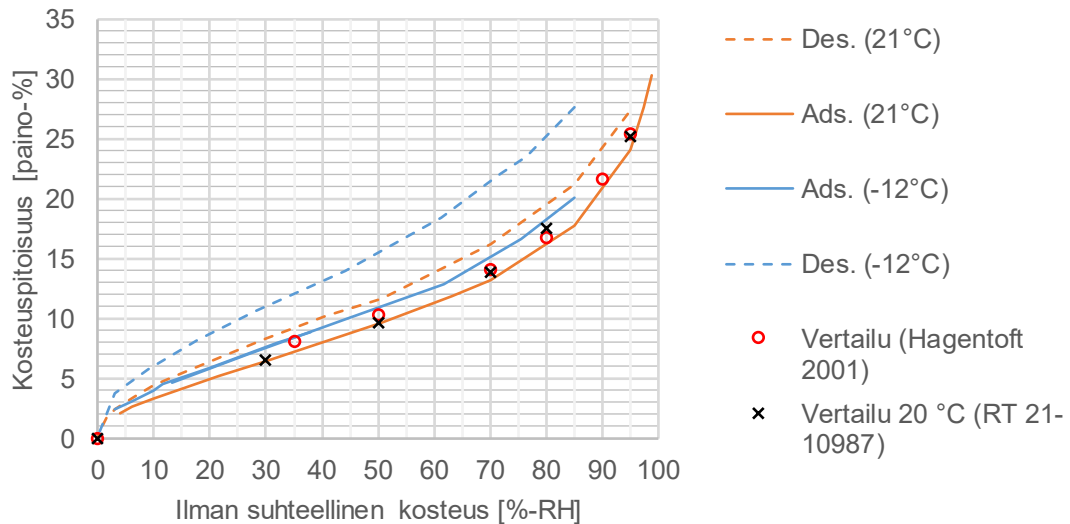
Materiaalin kosteuspitoisuus ilmoitetaan yleensä prosenttiosuutena suhteessa kuivatiheyteen, joka määritetään uunikuivaamalla 105 °C:ssa (Hagentoft 2001). Puun tiheys määritellään usein myös kosteustilassa, jossa puu sisältää 15 painoprosenttia kosteutta (Siika-

nen 2016), mikä eroaa puun kuivatiheydestä. Kyseistä arvoa kutsutaan puun ilmakeivätiheydeksi. Puun kuivatuoretiheys määritetään kuivasta massasta ja tilavuudesta, joka määritetään syiden kyllästyspistettä suuremmalla kosteuspitoisuudella eli tuoreen puun tilavuudella (Jääskeläinen et al. 2007).

2.3.1 Lämpötilan vaikutus puun tasapainokosteuteen

Tasapainokosteuskäyrä määritetään usein huonelämpötilassa, mitä ei välttämättä kerrota esitettyjen tietojen yhteydessä. Tässä kappaleessa pyritään tarkastelemaan kriittisesti esitettyjä tasapainokosteuskäyriä ja lämpötilan merkittävyyttä tulosten tulkinnassa. Puun tasapainokosteuden riippuvuutta lämpötilasta on selvittänyt Time (1998) väitöskirjassaan. Nollan yläpuolella tavanomaisissa lämpötiloissa kuusen (*Picea abies*) tasapainokosteuden vaihtelu on suuruudeltaan keskimäärin 0,07 painoprosenttia yhtä °C kohden (Tveit 1966 ja Time 1998). Useammassa lähteessä sorptiokäyrän muoto on havaittu eri lämpötiloissa samanlaiseksi (Choong 1963, Hansen 1986 ja Time 1998). Kyseisellä arvolla laskettuna painoprosentin vaihtelun suuruus 20 °C muutoksella olisi 1,4 painoprosenttia.

Kuvassa 2.5 on esitetty Hedlinin (1967) mittaustuloksia kuusen tasapainokosteudesta. Kuusilajiketta ei ole ilmoitettu, mutta oletetusti kyseessä on pohjoisamerikkalainen laji. Huonelämpötilan arvoja on verrattu puutavaran tasapainokosteuden käyrästöön, joka on esitetty RT-kortissa 21-10978 (2009) ja Puuinfon nettisivuilla. Käyrästö on keskimääräinen eikä siinä esitetä hystereesiä. Vertailuarvot on luettu kuvaajasta eivätkä ne ole täysin tarkkoja. Keskimääräiset arvot sijoittuvat adsorptio- ja desorptiokäyrien välille arviolta virheellä puoli painoprosenttia. Hedlinin (1967) tutkimukseen on voitu viitata useassa muussa tutkimuksessa juuri tästä vastaavuudesta johtuen, vaikka kyseessä ei olisi sama kuusilajike kuin Pohjoismaissa.



Kuva 2.5. Kuusen (Pohjois-Amerikka) tasapainokosteus eri lämpötiloissa Hedlinin (1967) mukaan ja vertailuarvoja luettuna RT-kortin 21-10987 (2001) kuvaajasta sekä tiheydellä $\rho=462 \text{ kg/m}^3$ laskettuna Hagentoftin (2001) esittämistä arvoista.

Yleisesti materiaalien tasapainokosteus on arvioitu olevan suurimmillaan lähellä $0 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilaa, mutta puumateriaaleilla kosteuspitoisuuden arvot kasvavat kylmemmissä olosuhteissa Hedlinin (1967) mukaan. Vinha et al. (2005) on esittänyt useiden rakennusmateriaalien kokeellisesti määritettyjä tasapainokosteuksia eri lämpötiloissa ($+23$, $+5$ ja $-10 \text{ }^\circ\text{C}$) ja päätenyt tulokseen, jossa useiden materiaalien tasapainokosteus oli suurimmillaan $+5 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa eli lähellä nollaa astetta. Muista rakennusmateriaaleista kokeessa poikkesivat mäntypuulevy, ekovilla, pellavaeriste ja sahanpuru, jotka saavuttivat suurimman tasapainokosteuden arvon pakkaslämpötilassa. Puumateriaaleista kuusivanerin tasapainokosteudessa ei ollut eroa lämpötiloissa $+5$ ja $-10 \text{ }^\circ\text{C}$. Kokeessa tarkasteltiin vain adsorptiotilannetta pakkasessa ilman suhteellisen kosteuden ollessa $75 \text{ } \%$ RH, mutta Hedlinin (1967) tuloksissa suuremmat poikkeamat huonelämpötilaan verrattuna ovat desorptiokäyrässä. Tässä tapauksessa pelkän adsorptiotilanteen tarkastelu ei mahdollisesti ole riittävää.

Lämpökäsittelyssä hyödynnetään korkeissa lämpötiloissa muuttuvia puun kosteusominaisuuksia. Lämpökäsittelyssä puumateriaali lämmitetään yli $180 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilaan ja korkeissa yli $220 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötiloissa yli tunnin ajan käsitellyn kuusen tasapainokosteus eroaa noin 8 painoprosenttia käsittelemättömästä ilman suhteellisen kosteuden ollessa $65 \text{ } \%$ RH:ta (Lämpöpuuyhdistys ry 2003).

2.3.2 Kosteustekniset ominaisuudet

Puumateriaaleissa selkeimmät erot ovat havaittavissa sahatavaran ja muiden tuotteiden välillä. Liimapuu, viilupuu, vanerit ja kuitulevyt vastaavat vaihtelevasti rakenteeltaan ja

koostumukseltaan sahatavaraa, mikä vaikuttaa merkittävästi myös niiden kosteuskäyttämiseen. Myös puulajeissa on eroja ja rakentamisessa käytetään maailmalla useita erilaisia puulajeja, joiden ominaisuudet vaihtelevat. Jo kotimaisten kuusen (*Picea abies*) ja männyn (*Pinus sylvestris*) välillä on merkittävästi eroa. Kohteen viilupuun raakamateriaalina on kotimainen kuusi (kuva 2.6). Maailmalla on käytössä myös muista puulajeista valmistettua viilupuuta, jonka raaka-aineena on esimerkiksi Saksassa pyökki (*Fagus sylvatica*), Uudessa-Seelannissa radiatamänty (*Pinus radiata*) ja Pohjois-Amerikassa useita paikallisia havupuulajeja. Tutkimustuloksia eri puulajeista valmistetulle viilupuulle ei voida yleistää vertailematta puulajien välisiä ominaisuuksia. Puumateriaalille kokeissa määritetyt ominaisuudet ovat usein keskimääräisiä ja hajonta tulisi tilanteen mukaan ottaa huomioon.



Kuva 2.6. *Ulkoseinälevyissä ikkuna-aukon alareunassa erottuvat pystysuuntaiset viilut tummempina. (27.4.2017)*

Kosteuskäyttäytyminen ulkoilmassa sateelta suojattuna riippuu merkittävästi materiaalin vesihöyrynläpäisevyydestä ja paksuudesta. Taulukossa 2.1 on esitetty kertopuun eli viilupuun ja sahatavaran vesihöyrynläpäisevyyksiä. Diffuusiovastuserroin μ kuvaa kuinka moninkertainen ilman vesihöyrynläpäisevyys on verrattuna materiaaliin. Vesihöyrynläpäisevyys vaikuttaa myös erityisesti materiaalin kuivumiseen hygroskooppisella alueella.

Kuusella vesihöyrynläpäisevyys osapaineen suhteen on keskimääräisillä arvoilla lasketuna kahdeksankertainen syiden suunnassa poikkisuuntaan verrattuna. Männylle vastaava suhde on lähes kolmesataa. Männyn osalta lähteessä ei ole kuitenkaan esitetty syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa arvolle vastaavaa hajontaa joka kuusella on. Hajonnan lisäksi olisi oleellista tuntea myös ominaisuuksien jakauman muoto, joka usein luonnossa noudattaa normaalijakaumaa.

Taulukko 2.1. Puumateriaalien ja betonin vesihöyrynläpäisevyyksiä. (RIL255-1-2014, VTT:n sertifikaatti 184/03 2004)

Materiaali	Vesihöyrynläpäisevyys $\delta_p \cdot 10^{-12}$ [kg/(m · s · Pa)]			Vesihöyrynläpäisevyys Diffuusiovastuskerroin, μ [-]		
	Syiden suuntaan	Sytä vastaan	Sytä vastaan, liima	Syiden suuntaan	Sytä vastaan	Sytä vastaan, liima
Kuusi	53 - 87	0,5 – 17	-	2 – 380		-
Mänty	29 - 119	0,26	-	2 - 720		-
Kertopuupalkki	49 ²	2,3 ²	2,4 ²	3,9	82	80
Kertopuulevy	40 ^{1,2}	20 ^{1,2}	3,0 ^{1,2}	4,7 ¹	9,5 ¹	62 ¹
Betoni ($\rho=2200$ kg/m ³)	-			70 (> 70 % RH) 120 (< 70 % RH)		

- 1) Syiden suunta tuotteessa vaihtelee ja tarkastelusuuntia ovat: pituus-, paksuus ja leveyssuunta.
2) Koe toteutettu olosuhteissa 20 °C ja 50/75 % RH ja kertopuun raakamateriaalit ovat kuusi sekä mänty.

Kertopuupalkissa viilut ja syyt ovat samansuuntaisia. Syitä vastaan ominaisuudet ovat lähes samanlaiset liimakerroksesta huolimatta eikä liimakerros vaikuta merkittävästi vesihöyrynläpäisevyyteen esitettyjen arvojen mukaan. Syitä vastaan diffuusiovastuskerroin on 21 kertainen verrattuna syysuuntaan ja on lähellä kostean betonin diffuusiovastuskerrointa. Betonin vesihöyrynläpäisevyys muuttuu voimakkaasti kosteuspitoisuuden ja laadun mukaan. Betonin vesihöyrynläpäisevyyden kasvu korkeilla ilman suhteellisen kosteuden arvoilla johtuu kapillaarisen kosteudensiirron noususta (RIL255-1-2014). Kertopuulevyssä osa viiluista on liimattu ristiin ja vesihöyrynläpäisevyys muuttuu vastaavasti. Koekappaleen suuntia tarkastellaan pituus-, paksuus- ja leveyssuunnassa. Diffuusiovastuskerroin kasvaa 20 prosenttia pituussuuntaan, koska osa syistä on levyssä poikittain. Diffuusiovastuskerroin alenee myös paksuussuunnassa liimakerroksia vasten 20 prosenttia, vaikka kaikki syyt ovat edelleen kohtisuorassa. Merkittävimmin kertopuulevy eroaa palkista syitä kohtisuorassa suunnassa eli leveyssuunnassa, jossa vastuskerroin putoaa 90 prosenttia.

Fitz et al. (2004) ovat esittäneet viilupuutuotteille (Furnierschichtholz) määritettyjä ominaisuuksia saksankielisessä raportissa koskien puupohjaisia levyrakenteita (taulukko 2.2). Viilupuun näytekappaleiden valmistajat ovat Suomesta, Ruotsista ja Kanadasta. Kuivatiheys on määritetty kahdessa eri lämpötilassa, koska 80-130 °C lämpötilassa kuivuu materiaaliin kemiallisesti sitoutunut vesi. (Fitz et al. 2004)

Taulukko 2.2. Eri valmistajien viilupuulevyistä määritettyjä keskimääräisiä materiaaliominaisuuksia. (Fitz et al. 2004)

Materiaalin ominaisuus	Koetulosten keskiarvo
Levyn paksuus	26 mm
Kuivatiheys (40 °C)	506 kg/m ³
Kuivatiheys (100 °C)	462 kg/m ³
Diffuusiovastuskerroin ¹ (DIN EN ISO 12572)	
μ 23 °C ja 0 / 50 RH-%	156
μ 23 °C ja 50 / 75 RH-%	69
μ 23 °C ja 50 / 93 RH-%	51
Tasapainokosteus ² (DIN EN ISO 12571)	
Tasapainokosteus 23°C ja 80 RH-%	16,4 paino-% (7,6 tilavuus-%)
Tasapainokosteus 23°C ja 93 RH-%	22,6 paino-% (10,4 tilavuus-%)
Vapaa vesikyllästys (vesiupotus)	113,5 paino-% (52,5 tilavuus-%)

1) Arvot on oletetusti määritetty levyn paksuussuunnassa suuruuden perusteella, ja koska levyn toimiessa osana seinärakennetta sitä tarkastellaan paksuussuunnassa.

2) Alemmassa lämpötilassa määritetty kuivatiheys on esitetty alkuperäisessä raportissa ensisijaisena ilman sulkua ja kyseinen tiheys oletetaan käytetyksi arvoksi kosteuspitoisuuksien muunnoksessa.

Eri rakennusmateriaalien kuivauslämpötilassa on otettava huomioon myös muut ainesosat ja vesi eri tavalla sitoutuneena. Yli 100 °C lämpötilassa haihtuvat myös terpeenit (Fitz et al. 2004), jotka ovat ainesosia puun pihkassa. Myös esimerkiksi kipsin sisältämä kidevesi on osa materiaalia normaalikäytössä eikä sitä tule haihduttaa kuivatiheyttä määrittäessä ja kuivauslämpötila tulee rajoittaa noin 50 °C lämpötilaan (Vinha et al. 2005). Rakenteellista viilupuuta koskeva standardi SFS-EN 14374 (2004) viittaa kosteuspitoisuuden määrittämisen osalta vanhempaan standardiin SFS-EN 322 (1993), jossa käytetään uunikuivausmenetelmää koepaloille 103 °C lämpötilassa. Oletetusti standardia laatiessa kyseinen lämpötila ja uunikuivaus on todettu pääasiassa sopivaksi menetelmäksi.

2.4 Puumateriaalin kosteusvauriot

Puun yleisimmät vauriot aiheuttavat bakteerit, home, sinistäjä- ja lahottajasieni sekä hyönteiset (Siikanen 2012). Rakentamisessa mikrobeilla tarkoitetaan yleensä bakteereita ja sieniä. Mikrobeja ovat esimerkiksi virukset, bakteerit, sienet, levät ja alkueläimet. Homeeksi kutsutaan kaikkia rihmastoja muodostavia sieniä. Sinistäjä sienet aiheuttavat värivirheitä puussa, mutta eivät heikennä puun rakennetta. Lahottajasienet käyttävät ravinnokseen puumateriaalin selluloosaa ja ligniiniä. Sienet vaativat kasvuympäristöltään happea, sopivan lämpötilan ja kosteutta. Eri lajikkeiden kasvuolosuhteet vaihtelevat pienestä pakkasesta jopa 40 °C. Sienet lisääntyvät itiöiden avulla ja esimerkiksi ulkoilman välityksellä. (Leivo et al. 1998)

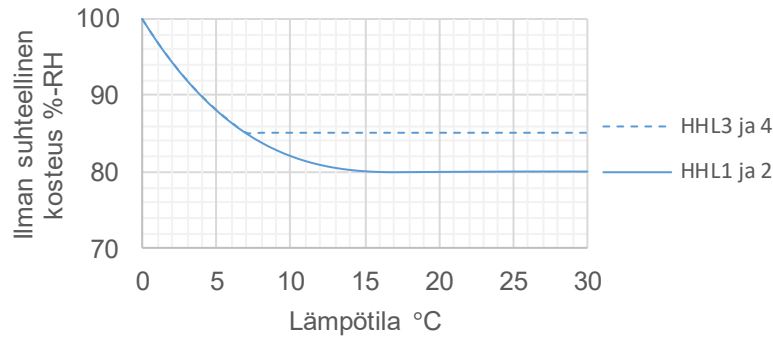
Puun rakennetta vaurioittavien lahottajasienten optimaaliset kasvuolosuhteet vaativat pitkäaikaisesti puun kosteeksi 20 - 60 painoprosenttia ja 5 - 30 °C lämpötilan. Yleensä kosteutta vaaditaan yli 25 painoprosenttia. Homesienet voivat kasvaa lähes kaikilla pinnoilla kuten esimerkiksi maali-, betoni- ja tiilipinnoilla. Tiettyjen homesienten itiöt aiheuttavat

allergiatyyppejä oireita ja hengitystiesairauksia. Eri lajien kasvuolosuhteet vaihtelevat 0 - 55 °C ja ilman suhteellisen kosteuden ollessa hyvin pitkään yli 75 % RH. Kasvaneet homeitiöt kestävät pakkasta. Lajikkeista kuivemmissä olosuhteissa kasvavat homesienet aiheuttavat ongelmia tavanomaisesti vain kasvaessaan seinäpinnoilla. Vakavimpia ongelmia aiheuttavat lajikkeet, jotka kasvavat hyvin kosteissa olosuhteissa ilman suhteellisen kosteuden ollessa yli 90 - 95 % RH:ta, mikä mahdollistaa myös lahovauriot. Sinistäjäsieni vaatii puun kosteuspuutisuudeksi 30 - 120 painoprosenttia. (Siikanen 2012)

Homeen kehittymiseen vaikuttavat ilman suhteellinen kosteus, ympäristön lämpötila, olosuhteiden vaikutusaika, rakennusmateriaalin tyyppi ja pintaolosuhteet. Lisäksi vaikuttavia tekijöitä ovat UV-säteily, ravinteet, pH-arvo, veden läpäisy ja hygroskooppisuus. Mikrobiologisesti puhtaita rakennuksia ei todennäköisesti ole olemassa, koska jotkin pilaantumisen alkavat jo rakennusvaiheen aikana. (Viitanen et al. 2010)

2.4.1 Homeen kasvun riskin arviointi Suomalaisella homehallilla

Homeen kasvun riskiä voidaan arvioida VTT:n ja TTY:n kehittämän Suomalaisen homehallin avulla. Laskettavalla homeindeksillä kuvataan homeen kasvun riskiä materiaalin pinnalla muuttuvissa olosuhteissa. Homeindeksistä ei voida päätellä ovatko kasvavat homeelajit terveydelle vaarallisia. Homeindeksi 0 tarkoittaa pintaa, jossa ei ole kasvua, ja esimerkiksi 3 pintaa, jossa kasvu on silmin havaittavaa tai runsasta mikroskooppilla havaittavaa kasvua. Homeindeksistä 3 alkaen alkaa muodostua myös uusia itiöitä. Eri materiaalit on jaettu homehtumisherkkyysluokkiin. Hyvin herkässä luokassa (HHL1) ovat mitallistettu mänty- ja kuusipuutavara sekä höylätty mänty. Herkässä luokassa (HHL2) ovat höylätty kuusi, kipsilevy ja puupohjaiset levyt. Kyseisissä luokissa oleville materiaaleille on esitetty homeen kasvun kannalta suotuisat olosuhteet, joita rajaa ilman suhteellinen kosteus 80 % RH sekä nollan asteen lämpötila (kuva 2.7). Vakio-olosuhteissa +5 °C ja 90 % RH ilman suhteellista kosteutta herkin luokka saavuttaa homeindeksin 1 noin 10 viikossa ja indeksin 2 noin 20 viikossa. Kyseisissä olosuhteissa homeen kasvu ei kehity pidemmälle ja silmin nähtävää kasvua ei muodostu. Homeen kasvu taantuu epäsuotuisissa olosuhteissa alle nollan tai yli 50 °C lämpötiloissa tai ilman suhteellisen kosteuden pudotessa alle kasvuolosuhteiden. Rakenteen homehtumisriskissä on huomioitava myös mahdollinen homeen kasvu avoimuuden lämmöneristeen sisällä, jossa kasvun mahdollistava pinta-ala on merkittävästi suurempi kuin pinnoilla. Laskennassa tulee käyttää pintaolosuhteita, jotka ovat riippuvaisia materiaalin ominaislämpö- ja kosteuskapasiteetista. (RIL255-1-2014) Homeen kasvu hidastuu merkittävästi alle +20 °C lämpötilassa siirryttäessä kohti epäsuotuisaa lämpötilaa.



Kuva 2.7. Homeenkasvun mahdollistava eli kriittinen ilman suhteellinen kosteus lämpötilan mukaan homehtumisherkkyyssluokissa 1 – 4. (RIL255-1-2014)

2.4.2 Raja-arvoja ja tavanomaiset olosuhteet puulle

Puun kosteuden raja-arvot määrittyvät puurakenteiden suunnitteluolosuhteista, kuivumis-mahdollisuudesta ja kosteusvaurion syntymisen raja-arvoista. Puurakenteet suunnitellaan toimimaan olosuhteiden mukaisissa käyttöluokissa, jonka mukaan niiden lujuus- ja taipumaominaisuudet mitoitetaan. Rakenteesta riippuen puumateriaali voi päästä kuivumaan myös rakennusajan jälkeen. Rakennuskosteudella eli rakennusaikaisella kosteudella tarkoitetaan kosteutta, joka ylittää käytönaikaisen tasapainokosteuden (RIL 107-2012). Sahatavaran kosteuspitoisuus voi olla poikkileikkauksen keskimääräinen kosteus, koska kappaleessa oleva kosteus pyrkii tasoittumaan hitaasti. Käytönaikaista suurempi kosteuspitoisuus rakentamisen aikana voidaan hyväksyä, jos puumateriaalin kuivuminen on varmaa, vahingoittuneet osat vaihdetaan ja kutistuminen ei ole merkittävää (RIL 205-1-2009). Kuiva puumateriaali voi käyttöolosuhteen mukaan olla joko sisä- tai ulkokuivaa (taulukko 2.3).

Taulukko 2.3. Käsitteitä sahatavaran kosteuspitoisuuksille. (SFS 4188 (1978) ja Siikainen 2016)

Kuvaus	Kosteuspitoisuus [paino-%]
Sisäkuiva	< 13
Ulkokuiva	13 - 19
Kostea	19 - 27
Märkä	> 27

Puurakenteiden toteuttamisen standardissa (SFS 5978 2014) viitataan käyttöluokan mukaisiin olosuhteisiin termillä suunnittelukosteustila. Puumateriaalin toimituskosteudeksi on sahatavaralle määritelty ulkokuiva, joka vastaa 15 – 25 painoprosenttia, mutta homehtumisvaaran vuoksi alle 20 painoprosenttia. Varastotoimituksessa liimapuun, vanerin ja viilupuun (LVL) kosteuspitoisuus on enintään 20 painoprosenttia ja tehdastoimituksessa

noin 10 painoprosenttia. Rakennusaikaisen kosteuden osalta on riittävän hitaaksi kuivumiseksi määritelty tilanne, jossa puun tasapainokosteuden ja olosuhteiden välillä on enintään 6 prosenttia eroa. (SFS 5978 2014) Prosentille ei ole määritelty yksikköä, mutta oletusti tarkoitetaan painoprosenttiyksiköitä puun kosteuspitoisuutta, jota verrataan olosuhteita vastaavaan tasapainokosteuteen. Sateelta suojassa olevien puurakenteiden suunnittelukosteus on eurokoodin mukaan alle 20 painoprosenttia (taulukko 2.4).

Taulukko 2.4. Puurakenteiden suunnittelun käyttöluokat ja niiden mukaiset olosuhteet. (SFS EN 1995-1-1)

Käyttöluokka	Lämpötila	Ilman suhteellinen kosteus	Kuvaus
KL1	20 °C	< 65 %-RH	Lämmitetyt sisätilat. Havupuu alle 12 paino-%.
KL2	20 °C	< 85 %-RH	Tuuletustilassa tai ulkoilmassa katettuna. Havupuu alle 20 paino-%.
KL3	Suuremmat kosteusarvot kuin käyttöluokassa 2. EN 335-1 mukainen luokittelu.		Säälle alttiina, kosteassa tilassa tai vesikosketuksessa.

Häglund (2007) on mallintamalla ja koetuloksiin vertaamalla tutkinut puun kosteuspitoisuuden vaihtelua sisä- ja ulko-olosuhteissa. Kosteuden siirtymistä on tarkasteltu syiden kyllästyspitoisuutta kuivemmassa vain diffuusion avulla. Lämpötilan vaikutusta kosteuden siirtymiseen ei otettu huomioon, minkä on todettu aiheuttavan epävarmuutta ulkoilmaa koskeviin tuloksiin. Puun kosteuspitoisuuden vaihtelua sisä- ja ulkotiloissa pidetään merkittävänä rasitustekijänä, joka mahdollisesti pitäisi ottaa huomioon erillisenä kuormana puurakenteille. Nykyinen eurokoodi ottaa huomioon puurakenteen toiminnan eri olosuhteissa käyttöluokan mukaisilla kertoimilla. Puun vuosittaiseksi kosteuspitoisuuden vaihteluksi sisä- ja ulkotiloissa sateelta suojassa pitäisi arvioida 6-8 painoprosenttia. Sisätiloissa vaihtelu on suurempaa. Pintakäsittely ja suurempi poikkileikkaus pienentäisivät vaihtelua. (Häglund 2007)

Tutkimuksessa havaittiin, että nopeat suuret vaihtelut vaimentuvat nopeasti materiaalissa, mutta hitaat vuosittaiset vaihtelut vaikuttavat koko koekappaleeseen. Merkittävää eroa kosteusvaihtelussa Ruotsissa erilaisissa ilmastoissa ei havaittu, mutta kuivemmassa ja kylmemmässä ilmastossa sisäilmassa koekappaleiden kosteuspitoisuudet olivat alhaisempia. (Häglund 2007) Liimapuun vuosittaiseksi kosteuspitoisuuden vaihteluksi sisä- ja ulkotiloissa sateelta suojassa voidaan arvioida 3-5 painoprosenttia (Limträhandbok 2001 ja Häglund 2007). Tutkimuksen tulos viittaa siihen, että sateelta suojassa olevan puumateriaalin kosteuspitoisuus ei pintakerrosta lukuun ottamatta seuraa ulkoilman olosuhteita, vaan vuodenaikojen mukaisia keskimääräisiä olosuhteita. Kosteuden siirtymistä on tarkasteltu syitä vasten. Tutkimuksen tulosten mukaan pintakerros, jossa vaihtelua tapahtuu

olisi 20 millimetriä ja arviolta 80 prosenttia vaihtelusta tapahtuu 10 millimetrin etäisyydellä pinnasta.

2.5 Puun kosteuspitoisuuden mittaamenetelmät

Puun kosteuspitoisuuden mittaamenetelmät voidaan jakaa suoriin ja epäsuoriin menetelmiin. Suorat menetelmät ovat rakenteita rikkovia ja niissä otetaan näytepala, josta vesi kuivataan tai erotetaan. Epäsuorissa menetelmissä kosteuspitoisuus määritetään fysikaalisen ominaisuuden kuten materiaalin sähkönvastuksen tai olosuhteiden mittauksen avulla. (Dietsch et al. 2014) Sahatavaran kosteuspitoisuuden määrittämistä on uunikuivaus-, resistanssi- ja kapasitanssimenetelmien osalta käsitelty standardin SFS-EN 13183 kolmessa eri osassa.

Yksi käytetyimmistä ja vanhimmista suorista mittaamenetelmistä puun kosteuspitoisuuden määrittämiseen on uunikuivausmenetelmä. Uunikuivauksessa näytepala punnitaan ja kuivataan noin 103 °C lämpötilassa, kunnes näytepalan massa ei enää muutu. Kosteuspitoisuus määritetään kuivatetun vesimäärän suhteena kuivan kappaleen massaan. Näytepalan porauksen synnyttämä lämpö voi aiheuttaa veden haihtumista näytteestä. Muita suoria mittaamenetelmiä ovat tislaus- ja erotusmenetelmät, joita käytetään puunäytteisiin, joissa on pihkaa, öljyä tai suoja-aineita. Näytepalasta valmistetaan lastuja, joita kuumennetaan tislausastiassa liuottimen kanssa. Vesi höyrystyy ja tiivistyy putkeen, josta veden määrä voidaan lukea. (Dietsch et al. 2014)

Epäsuorista materiaalin menetelmistä resistiivisessä menetelmässä mitataan puun sähkönvastusta. Vesi johtaa sähköä paljon paremmin kuin kuiva puu, mikä laskee sähkönvastuksen arvoa puun kosteuspitoisuuden kasvaessa. (Villari 1886 ja Dietsch et al. 2014). Menetelmän tarkkuus on ± 1 painoprosenttia kosteuspitoisuudesta 6 painoprosenttia syiden kyllästyspisteeseen. Kyseisen kosteusalueen ulkopuolella menetelmän tarkkuus heikkenee huomattavasti. Puun sähkönvastukseen vaikuttaa myös lämpötila, mikä on otettava huomioon mittauksessa. Pintalämpötila määritetään esimerkiksi infrapunalämpömittarin avulla. Mittauslaitteen elektrodit eli piikit lyödään puun sisään tai asetetaan pinnalle koh-tisuoraan syysuuntaa vasten. Syysuunnassa mitattujen arvojen vaihtelu on suurempaa (Ugolev 1986, Herrmann 2009 ja Dietsch et al. 2014). Liimapuussa mittaus tehdään samasta lamellista. (Dietsch et al. 2014)

Toinen epäsuora menetelmä on kapasitiivinen eli dielektrinen menetelmä, joka perustuu puun dielektristen ominaisuuksien mittaukseen. Puussa dielektriset ominaisuudet muuttuvat sen kosteuspitoisuuden mukaan, minkä lisäksi kyseiseen ominaisuuteen vaikuttavat esimerkiksi puun tiheys ja lämpötila. Puun tiheys voi vaihdella merkittävästi puulajinkin kohdalla ja aiheuttaa virheen mittauksessa. Lisäksi lähellä pintaa oleva kosteus vaikuttaa voimakkaasti menetelmän mittaustuloksiin, mikä aiheuttaa virheellisiä tuloksia, jos pinta on märkä tai puun sisällä on merkittävää vaihtelua kosteuspitoisuudessa. (Skaar 1988 ja

Forsén et al. 2000) Dielektristä vakiota kutsutaan myös suhteelliseksi permittiivisyydeksi ja se kuvaa materiaalin ominaisuutta heikentää sähkökenttää.

Kapasitiivisen menetelmän tarkkuus on hyväksyttävä kosteusalueella kahdesta painoprosentista syiden kyllästyspisteeseen (Kollmann 1968, Niemz 2003 ja Dietsch et al. 2014). Mittaustulos on keskiarvo pintakerroksen kosteudesta alle 35 millimetrin syvyydeltä. Menetelmää käytetään pääasiassa puulevyjen kanssa. (Dietsch et al. 2014) Viilupuun raakamateriaali voi olla valikoidumpaa kuin kuusen sahatavarassa, mikä vähentäisi tiheyden vaihtelua materiaalissa ja parantaisi mittaustulosten luotettavuutta viilupuun tapauksessa.

Materiaalin kosteuspitoisuus voidaan määrittää epäsuorasti myös olosuhteista. Suljetussa ilmaontelossa oleva ilma pyrkii tasapainoon ympäröivän materiaalin kosteuspitoisuuden kanssa tasapainokosteuskäyrän mukaisesti. Menetelmässä mitataan ontelon ilman suhteellista kosteutta. Menetelmä on yleisesti sovellettavissa puuhun, jolla on suuri ominaispinta-ala ja verrattain nopea kosteuden tasaantumisaika (Niemz 2003 ja Dietsch et al. 2014). Ilman suhteellista kosteutta mitataan tavanomaisesti kapasitiivisella hygrometrillä, jossa materiaalin dielektrisiä ominaisuuksia mitataan kahden kondensaattorilevyn välissä. (Dietsch et al. 2014) Ominaispinta-alalla (eng. specific surface area) tarkoitetaan aineen huokospinta-alan suhdetta sen massaan tai tilavuuteen. Kuusen vesihöyrynläpäisevyys syiden suunnassa voi olla yli satakertainen syiden vastaiseen suuntaan nähden (RIL255-1-2014), mikä on otettava huomioon mittauksen toteutuksessa ja tulosten tulokinnassa. Kapasitiivinen kosteusanturi vaatii säätöä tavallisesti vähintään kerran vuodessa, mutta tiheämmin, jos mitataan pitkiä jaksoja erittäin kosteita olosuhteita arvon 90 % RH yläpuolella.

Muita menetelmiä puun kosteuspitoisuuden määrittämiseksi ovat mikroaaltomenetelmä, radiometrinen ja spektrometrinen menetelmä sekä indikaattoripaperi, joka muuttaa väriään kosteuspitoisuuden mukaan. Mikroaaltomenetelmä toimii kuten kapasitiivinen menetelmä, mutta se toimii korkeammalla taajuusalueella. Mikroaallot vaimentuvat voimakkaammin vesimolekyyleihin kuin kuivaan puuhun johtuen niiden erilaisista dielektrisistä vakioista. Menetelmän tarkkuus on $\pm 0,5$ painoprosenttia ja siinä on otettava huomioon puumateriaalin lämpötila sekä tiheys. Mittalaitteiston kustannus on merkittävin este menetelmän yleistymiselle. Radiometrinen menetelmä perustuu vesimolekyylien vetyatomien ominaisuuteen hidastaa neutronien liikettä. Myös radiometrisessä menetelmässä on tunnettava puun tiheys. Spektrometrinen menetelmä perustuu veden kykyyn absorboida tiettyjen aallonpituuksien valoa. Menetelmä mittaa kosteutta puun pinnalta kymmenesosamillimetrin syvyydeltä. (Dietsch et al. 2014)

Mittaustekniikkaa pyritään jatkuvasti kehittämään ja tulevaisuudessa mahdollisesti yleistyvät edulliset langattomat anturijärjestelmät. Yksi kehityssuunta on langattomien etätunnistajien (RFID) käyttö kosteuden mittauksessa. Samantyyppistä etätunnistetta käytetään esimerkiksi avaimenperässä ja sen etuna on pieni koko. Etätunniste voidaan kosteuden

mittauksessa toteuttaa eri tavoin ja eri osista (Sipilä 2016). Sipilä (2016) on väitöskirjassaan tarkastellut uusia tuotantomenetelmiä passiivisten eli virtalähteettömien etätunnisteiden valmistamiseksi vaneri- tai pahvipohjalle.

3. MITTAUSSUUNNITELMA JA MITTAUSTEN TOTEUTUS

Tässä luvussa kuvataan tutkimuskohteena olleessa rakennuksessa toteutettujen lämpö- ja kosteusolosuhteiden mittausten toteuttaminen. Mittauksia tehtiin osana tätä diplomityötä sekä erikseen tilattuna ja asennettuna. Lisäksi saatavilla oli työmaan laadunhallintaan kuuluvien olosuhdemittausten ja näytepalamittausten tuloksia. Tutkimuskohteena oleva puukerrostalo ja sen rakenteita oleellisilta osin on esitelty kappaleen alussa. Kohdassa 3.2 on esitelty diplomityön mittauksissa käytetyt mittalaitteet ja mittausten toteutus yleisesti. Yksityiskohtaisemmin toteutusta kuvineen on selostettu mittaustulosten yhteydessä liitteissä C ja D. Mittauksia kohdistettiin ja tuloksia tarkasteltiin työmaalla tehtyjen havaintojen ja lähtötietojen perusteella. Viilupuun kastumis- ja kuivumiskokeen tuloksia sekä havaintoja lämpötila- ja kosteusolosuhteista esitellään kohdassa 3.3. Mittauspisteiden valintaa selostetaan kohdassa 3.4, jossa on esitetty myös yhteenveto toteutetuista ja suunnitelluista mittauspisteistä. Kappaleen lopussa kohdassa 3.5 esitellään muiden työmaalla tehtyjen mittausten toteutusta.

3.1 Tutkimuskohteen esittely

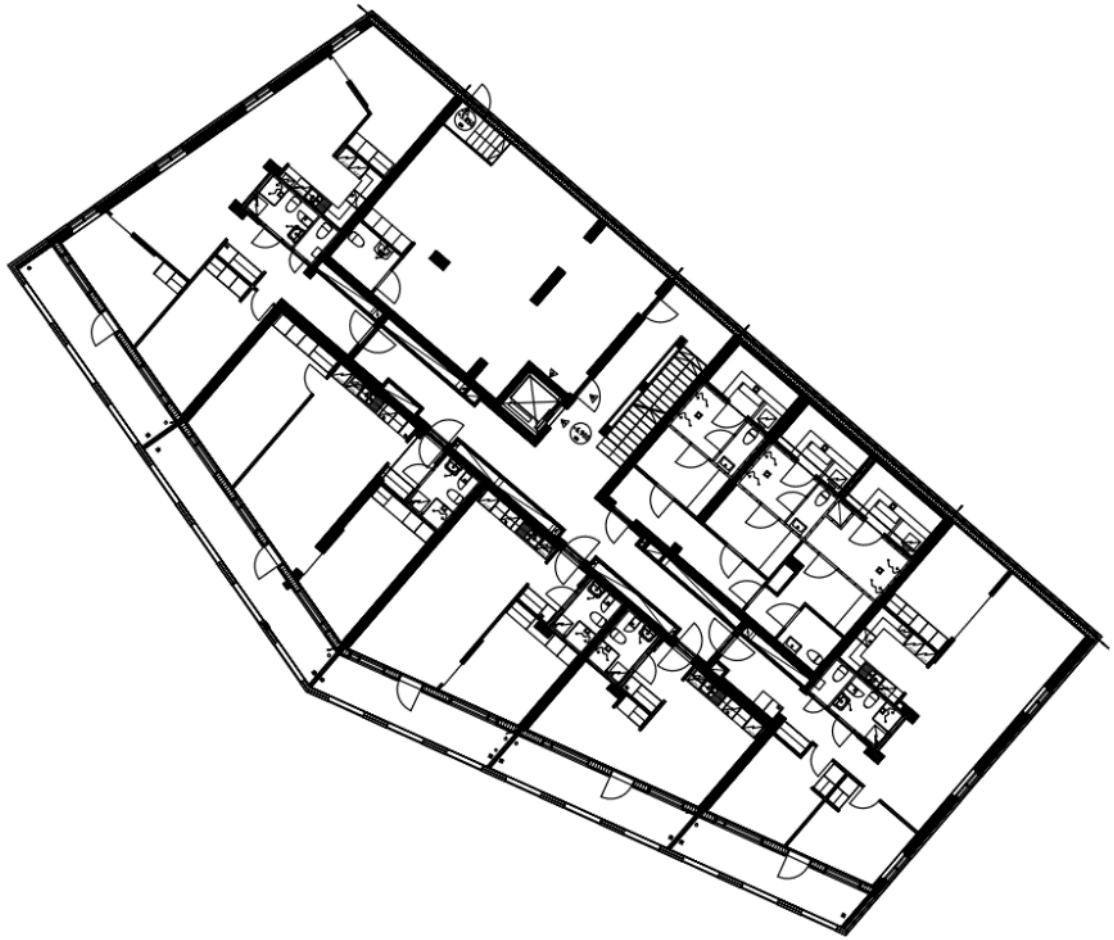
Työssä tarkasteltava puukerrostalo on kahdeksankerroksinen asuinkerrostalo, jonka kantavat seinät toteutetaan viilupuusta valmistetulla massiivipuulementeillä (kuva 3.1). Kohde sijaitsee Helsingin Jätkäsaaren rakenteilla olevassa Wood City –korttelissa. Asuinkerrostaloja rakennetaan kaksi, joista tässä työssä tarkastellaan pääasiassa ensimmäistä syksyllä 2016 aloitettua B-taloa. Kortteliin rakennetaan myös toimistorakennus sekä hotelli. Asuinkerrostalossa on yksi porraskäytävä sekä seitsemän parvekkeellista asuntoa kerroksissa 3-8 ja yhteensä asuntoja talossa on 54. Toisessa kerroksessa on asuntoja, yhteistila ja talosauna (kuva 3.6). Ensimmäisen kerroksen ja kellaritilan runko ovat betonia.



Kuva 3.1. Wood City –korttelin asuinkerrostalo B-talo rakennusvaiheessa. (12.4.2017)

Kantavan rungon seinät on toteutettu paksuilla viilupuulevyillä ja asennettu taselementteinä. Kuvassa 3.1 kantavan päätyseinän ikkuna-aukot on peitetty ja rakennuksen etupuolelle asennetaan rankarunkoisia seinäelementtejä. Asuntojen välipohjassa on käytetty ripalaattaa, jossa on viilupuuta kansilevynä sekä palkkeina. Porraskäytävän välipohjissa on viilupuinen massiivilaatta liimapuupalkkien päällä. Lisäksi kohteessa on liimapuupilareita kylpyhuoneiden ja portaikon kohdalla. Rakennuksen lyhyet päätyseinät ovat kantavia ja pidemmät sivuseinät on toteutettu tolpparunkoisina julkisivuelementteinä. Myös parvekkeet ovat sivuseinillä ja näiden kantavana pystyrunkona ja tasoissa on massiivipuulevyä viilupuusta. Kylpyhuoneet on toteutettu teräsrunkoisina märkätilaelementteinä. Kohteen toteutustavassa ei käytetä erillistä sääsuojaa. Ensimmäiset puurungon lämmöneristeet tuodaan työmaalle vasta vesikattoelementeissä. Vesikaton valmistumisen jälkeen ulkoseinän lämmöneristys päätyseinillä toteutetaan kuorielementeillä, jotka tulevat kantavan viilupuulevyn ulkopuolelle. Kylkiseinille tuodaan tolpparunkoinen ulkoseinäelementti lämmöneristeineen.

Toisen kerroksen pohjapiirustuksessa (kuva 3.2) näkyvät keskellä rakennusta porraskäytävä, portaat sekä massiivipuurunkoinen hissikuilu. Toisessa kerroksessa portaiden vieressä ovat talosauna sekä yhteistila ja ylemmissä kerroksissa asuntoja. Lounaan puolella rakennuksessa on asuntojen parvekkeet, jotka rakennetaan julkisivun jälkeen. Ylemmissä kerroksissa koillisen puolella asuntojen parveke on sisäänvedetty. Porraskäytävässä ovat rakennuksen pystykuilut ja kylpyhuoneet on sijoitettu asunnoissa käytävän viereen. Päätyseinien lisäksi asuntojen ja porraskäytävän väliset seinät ovat kantavia.



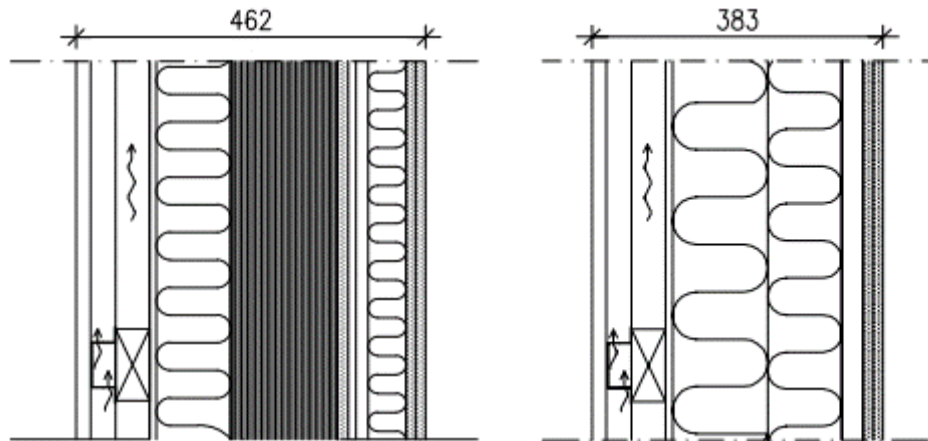
Kuva 3.2. B-talon toisen kerroksen pohjakuva arkkitehtipiirustuksista (kuvassa pohjoinen ylöspäin).

Rungon asennus viivästy alkuperäisestä aikataulusta kaksi kuukautta. Aikataulussa oli varattu viikko yhden kerroksen rungon asennukselle, mutta käytännössä yhden kerroksen asentaminen saatiin toteutettua noin kahdessa viikossa B-talon kohdalla. A-talossa puurungon asennus aloitettiin maaliskuun lopulla ja vesikaton ensimmäinen taso oli asennettu toukokuun lopulla. A-talossa rungon rakentaminen toteutui lähes aikataulussa. Havaintoja B-talon puurungon rakentamisen toteutumisesta mittaustulosten arviointia varten on esitetty liitteessä B.

3.1.1 Kohteen rakennetyyppejä ja detaljeja

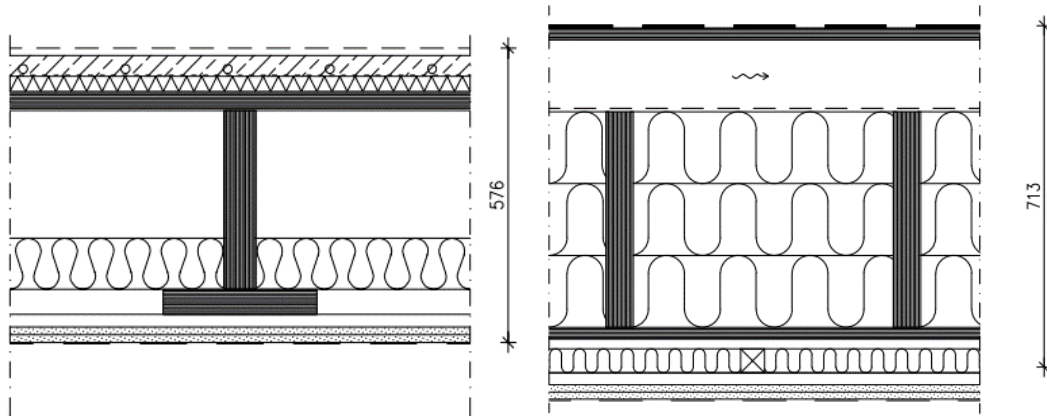
Rakennuksen päätyseinät ovat kantavia massiivipuulevyjä ja sivujen ulkoseinät ei-kantavia tavanomaisia rankarunkoisia elementtejä (kuva 3.3). Ei-kantavan seinän rakennetyypistä poistettiin sisäpuolelta viilupuulevy, joka rakennusaikana toimi rungon suojana. Kantavan ulkoseinän rakentaminen muodostuu kolmesta vaiheesta, joista ensimmäisessä asennetaan ainoastaan 141 millimetrin viilupuulevy, jonka ulkopuolelle vesikaton rakentamisen jälkeen asennetaan julkisivuelementti ja sisäpuolelle levytykset. Ulkoseinän vii-

lupuulevy koostuu kolmesta 47 millimetrin levystä, joista keskimmäisen syyt ovat pääasiassa vaakasuunnassa. Julkisivuelementin sisäpinnassa on tuulensuojakangas, jonka päällä ovat lämmöneristeenä 100 millimetrin mineraalivilla ja akrylaattimaalilla käsitelty kipsipohjainen tuulensuoja. Rakenteen sisälevytyksenä on kolme kipsilevyä paksuudeltaan yhteensä 41 millimetriä. Paksu viilupuulevy toimii rakenteessa höyrynsulkuna. Kantavissa väliseinissä on käytetty 141 ja 195 millimetrin viilupuulevyä.



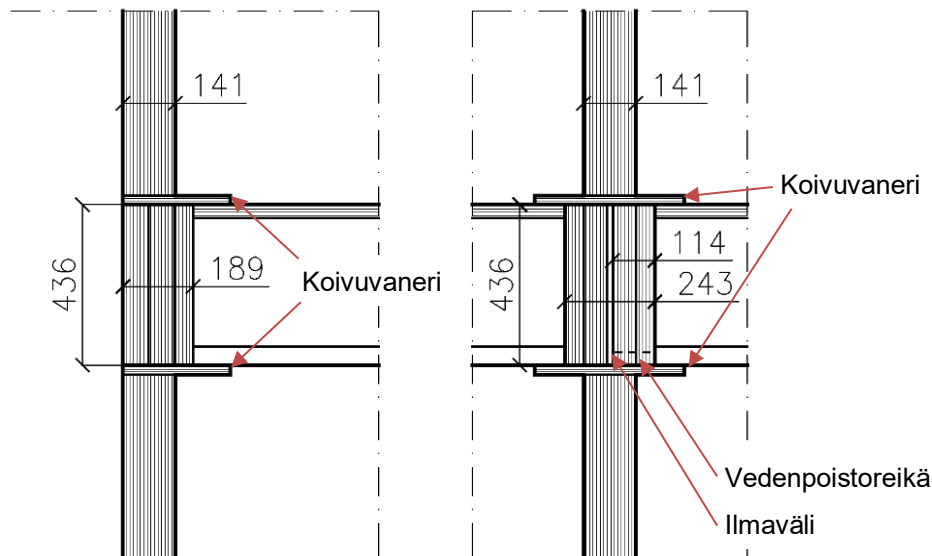
Kuva 3.3. Kantavan ulkoseinän (vas.) ja ei-kantavan ulkoseinän (oik.) rakennetyypit.

Asuntojen välipohjana on alaosastaan avoin ripalaatta (kuva 3.4), jonka päällä on askelääneneristeenä kivivilla ja 40 millimetrin kipsi- tai sementtipohjainen lattiavalu. Välipohjaelementin alapintaan kiinnitetään yhteensä 30 millimetriä kipsilevyä. Porraskäytävän välipohjana on 141 millin viilupuulevy, jonka päällä on 80 millimetrin sementtipohjainen lattiavalu ilman erillistä askelääneneristettä. Vesikatto on toteutettu kolmessa erillisessä tasossa, joista ylimpien asuntojen yläpohjana on tavanomainen puurunkoinen vesikattoelementti (kuva 3.4). Omat tasonsa vesikatolle muodostavat porraskäytävän päällä olevat ilmanvaihdon kanavatila sekä konehuone. Vesikattoelementtien loiva kaato viettää elementtien poikkisuuntaan eikä pituussuuntaan. Kantavat palkit ovat kuvassa pituussuuntaan. Elementtiin on asennettu jo elementtitehtaalla vedeneristekermi sekä lämmöneristeenä. Lämmöneristeen ja tuuletusvälin välillä on muovikuitupohjainen vesihöyryä läpäisevä tuulensuoja. Alapinnan koolaukset ja kipsilevytys asennetaan työmaalla.



Kuva 3.4. Asuntojen välipohjan (vas.) ja ylimmän kerroksen asuntojen yläpohjan (oik.) rakennetyypit.

Välipohjien päätypalkit ovat kantavien ulko- ja väliseinän kohdalla ylempään ja alemman seinän välissä (kuva 3.5). Päätypalkki koostuu useammasta osasta, joista kantavalla linjalla olevien osien viilujen suunta on pääasiassa pystysuunnassa eivätkä ne ole tavanomaisia viilupuupalkkeja (kuva 3.6). Kuvassa keskikohdan pystysuuntaiset viilut ovat kastuneet ja tummuneet. Kuvassa 3.5 näkyvä koivuvaneri seinän ylä- ja alaosassa on asennettu kiinnitettynä seinäelementtiin. Koivuvanerin kiinnitys seinän ylä- ja alaosaan tehtaalla ei ole paras mahdollinen ratkaisu elementtien kuljetuksen kannalta. Väliseinän kohdalla välipohjaelementtien päätypalkkien välissä on 15 millimetrin ilmaväli. Myös välipohjaelementtien välillä on päätypalkissa noin 15 millimetrin raot, jotka ennen sisälevytystä tiivistetään.



Kuva 3.5. Välipohjaelementin liittyminen kantavaan ulkoseinään (vas.) ja väliseinään (oik.).



Kuva 3.6. Välipohjajaelementtien päätypalkit alhaaltapäin kuvattuna toisen kerroksen mitauspisteen kohdalla (12.5.2017).

Kylpyhuoneet asennettiin teräsrunkoisina tilaelementteinä ja niiden kohdalla oli välipohjajaelementissä syvennys putkistolle (kuva 3.7). Kylpyhuone-elementin alla ilmatilassa kulkevat putkistot. Tilaelementti asettuu reunoiltaan syvennyksen päälle. Suunnitelmissa esitetty ilmatilan korkeus tilaelementin ylä- ja alapuolella on arviolta noin 30 senttimetriä. Syvennyksen tuulettuminen olisi hyvä varmistaa erityisesti rakennusaikana tulevissa kohteissa kosteuteen liittyvien riskien vähentämiseksi.



Kuva 3.7. Kylpyhuonesyvennys välipohjassa asennusvaiheessa A-talossa.

3.2 Mittauslaitteisto ja -menetelmät

Tutkimus toteutettiin pääasiassa ilman suhteellisen kosteuden mittauksina porarei'istä ja sisäilmasta. Näiden lisäksi otettiin kaksi uunikuivattavaa näytepalaa massiivipuulevyn läpi. Työmaalla testattiin myös resistiivisten piikkimittarien ja kapasitiivisen pintakosteusmittarin toimintaa. Mittauslaitteina käytettiin pääasiassa valmistajan Rotronic AG mittalaitteita. Käytössä oli myös kaksi yrityksen Comark Instruments laitetta. Piikkimittareita oli käytössä Boschin valmistama laite sekä Gann Hydromette UNI 2 ja anturi M18 lyötävillä piikeillä. Testattu pintakosteusmittari oli Exotekin MC-380XCA. Rotronicilta käytössä oli Hygro-Log HL-NT3 dataloggereita, HygroClip HC2-S anturit sekä näihin kuuluvat viiden metrin johdot. Dataloggerien tiedot luetaan erillisellä kannettavaan kytkettävällä telakalla. Rotronicin mittalaitteita ja niiden testaamista on kattavammin esitellyt Arto Haaranen diplomityössään Kelluvan kipsivalulattian kuivuminen (2017).

Dataloggerissa HygroLog HL-NT3 on paikka kolmelle anturille. Telakkaan kiinnitettyyn dataloggeriin voidaan ohjelmoida loggaus erilaisilla aikaväleillä. Anturissa HygroClip HC2-S on erillinen lämpötila- ja kosteusanturi. Vastuslämpötila-anturin malli on Pt100 Class A ja kapasitiivisen kosteusanturin malli Hygromer IN1. (Rotronic AG 2016) Mittauslaitteiston säätö- ja jälkitestausraportit on esitetty liitteenä. Comarkin laitteita ei erikseen säädetty ja testissä niiden tarkkuus olosuhteessa yli 90 % RH oli +/- 6 % RH, mutta tulos oli valmistajan ilmoittamissa rajoissa kuivemmissä olosuhteissa.

Taulukko 3.1. Tutkimuksessa käytettyjen mittalaitteiden valmistajien ilmoittamat ominaisuudet.

Ominaisuus	Rotronic HC2-S	Comark Diligence EV N2003
Lämpötilan mittausalue [°C]	-50...100	-20...60
Lämpötilan mittauksen tarkkuus [°C]	±0,1 (10-30 °C)	±0,5 (-25...50 °C)
Lämpötilamittauksen pitkäaikainen stabiliteetti [°C/vuosi]	< 0,1	-
Ilman suhteellisen kosteuden mittausalue [%-RH]	0...100	0...97
Ilman suhteellisen kosteuden mittauksen tarkkuus [%-RH]	±0,8 (10-30 °C)	±3 (-20...60 °C)
Ilman suhteellisen kosteuden mittauksen pitkäaikainen stabiliteetti [RH-%/vuosi]	< 0,5	-

Näytepalojen ottamiseen massiivipuulevystä diplomityössä toteutetuissa mittauksissa käytettiin erikoispitkää reikäsahan terää (Profit MPL Ø 51 mm) (kuva 3.8). Näytepala paloiteltiin työmaalla noin senttimetrin paksuihin siivuihin ja suljettiin erillisiin tiiviisiin muovipusseihin. Näytepalan punnitustulokset on esitetty liitteessä A. Kuvassa 3.8 näkyy myös halkaisijaltaan noin senttimetrin oleva tulppaterä ja vastaava terä hitsattuna metalliputkeen. Sahaus metalliputkeen hitsatulla terällä oli kuitenkin hidasta ja aiheutti

näytekappaleen pinnan hiiltymistä ja voimakasta lämpenemistä. Erikoispitkällä reikäsahan terällä poraus oli sujuvaa eikä se aiheuttanut hiiltymistä tai voimakasta lämpenemistä. Terän laatu vaikuttaa huomattavasti näytekappaleen lämpenemiseen. Näytepalan ottamiseen massiivipuusta voidaan käyttää myös kasvukairaa, joka on käsi-käyttöinen kaira. Näytepalan halkaisija on enimmillään 12 millimetriä. Kasvukairalla otetut näytepalat ovat kuitenkin massaltaan erittäin pieniä, mikä on haasteellista punnituksen tarkkuuden kannalta. Kairan vääntövarsi voi olla myös hankala käyttää ahtaissa paikoissa eikä olisi ollut mahdollista esimerkiksi välipohjaelementin ripojen välissä tai nurkkakohdissa.



Kuva 3.8. Erikoispitkä reikäsahan terä ohjaimella (vas.) ja tulppaterä (oik.).

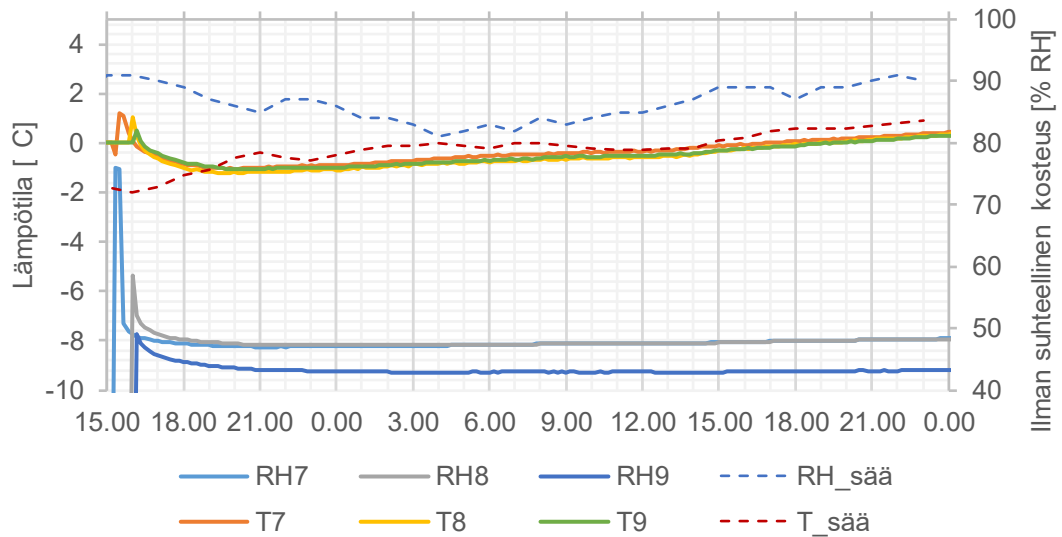
3.2.1 Betonin porareikämittauksen soveltaminen viilupuuhun

Viilupuun porareikämittaus toteutettiin betonin suhteellisen kosteuden mittauksen RT-ohjekorttia 14-10984 (2010) soveltaen. Porareikämittauksessa mitataan ilman suhteellista kosteutta tiivistetyssä porareikässä, jossa ilman kosteus pyrkii tasapainotilaan materiaalin sisältämän kosteuden kanssa. Betonin suhteellisella kosteudella tarkoitetaan betonin huokosissa olevan ilman suhteellista kosteutta. Rakennehuokosten ilman vesihöyrypitoisuus kuvaa betonissa olevaa liikkumiskykyistä kosteutta. Päälystysraja-arvot ilmoitetaan rakennehuokosten ilman suhteellisenä kosteutena. Betonin vesipitoisuus voidaan ilmoittaa myös painoprosenttina. Rakennehuokosten kosteuspitoisuudesta voidaan tasapainokosteuskäyrän avulla määrittää betonin vesipitoisuus painoprosenteina, mutta vain hyvin karkeasti. Porareikämittauksessa käytetään muoviputkea, jonka tiivistyksessä materiaaliin voidaan käyttää tiivistysrenkasta, kittirenkasta tai tiivistyslaipallista muoviputkea. Vaihtelevat olosuhteet voivat aiheuttaa kosteuden tiivistymistä mittausputkeen ilmasta ja

avoin putki tulisi sulkea päästään tai täyttää esimerkiksi umpisoluisella elementtisauman pohjanauhalla. Mittapään tasaantumisaika tiivistetyssä porareiässä on vähintään tunti ja hitaammilla mittapäillä jopa yli neljä tuntia. Betonissa olevat mittapäät ovat aggressiivisessä ympäristössä ja vaativat ylimääräisiä kalibrointikertoja. Oikein toteutettu mittaus voidaan ohjetta noudattamalla saada suuruusluokkaan ± 5 % RH:ta. (RT 14-10984 2010) Hetkellisessä mittauksessa tai tasaantumisaajan ollessa liian lyhyt ei voida havaita lämpötilan aiheuttamaa vaihtelua ja olosuhteiden tasaantumista ilman suhteellisen kosteuden mittaustuloksessa (Merikallio 2009). Jatkuvan mittauksen etuna on yleisesti erilaisten poikkeamien havaitseminen mittaustuloksissa.

Kahden eri betonilaadun tasapainokosteuskäyrät voivat erota merkittävästi ja esimerkiksi 4,3 painoprosenttia kosteutta eri betonilaaduissa voi vastata rakennehuokosten ilman suhteellisia kosteuksia 75 ja 98 % RH:ta (Al-Neshavy 1996 ja RT 14-10984 2010). Painoprosentti tulisi tästä syystä määrittää esimerkiksi näytepalamenetelmällä (RT 14-10984 2010). Poraus vaikuttaa porareian ilman vesihöyrypitoisuuteen merkittävästi vuorokauden ajan porauksesta ja vaikutus häviää yleensä kolmessa vuorokaudessa (Merikallio 2009 ja RT 14-10984 2010). Lämpötilan muutos porareikämittauksen aikana vaikuttaa mittaustuloksiin erityisesti lähellä materiaalin pintaa, mikä on esitetty kuvaajassa ohjekortissa. Esimerkiksi lämpötilan laskiessa noin 17 tunnin aikana arviolta 23 °C:esta 12 °C:een nousee mitattu ilman suhteellinen kosteus hetkellisesti 4,5 % RH:ta syvyydellä 1,5 senttimetriä ja 0,5 % RH:ta syvyydellä 7 senttimetriä. Suurimmillaan lämpötilaero huoneilman ja mittaussyvyydellä 7 senttimetriä välillä on noin 1 °C. (RT 14-10984 2010) Lämpötilan muutosnopeus on tällöin -0,7 °C/h.

Vaatus huonelämpötilalle rakennehuokosten ilman vesihöyrypitoisuuden mittauksessa varmistaa, että lämpötila ei vaikuta tasapainokosteuteen materiaalin ja ilman välillä. Jos tasaantuneessa huonelämpötilassa mitataan kuivia olosuhteita porareistä, ei materiaaleissa ole ylimääräistä kosteutta huonelämpötilassa, joka usein on myös rakenteen käyttölämpötila. Jos mitattavan materiaalin tasapainokosteuskäyrä eri lämpötiloissa tunnetaan, voidaan lämpötilan vaikutusta mittaustulokseen arvioida. Olosuhteen tasaantumisaika riippuu jossakin määrin alkutilanteen vesihöyrypitoisuudesta porareian ilmassa. Jos tasaantumisaika on pääasiassa riippuvainen materiaalin vesihöyrynläpäisevyydestä ja puumateriaalin syiden suuntainen vesihöyrynläpäisevyys on kymmenkertaisesti suurempi kuin betonissa, tasaantumisaajan porareiässä pitäisi olla huomattavasti nopeampaa kuin betonissa arvioimatta mittapään toimintaa. Ulkoilman olosuhteissa tiivistetyn porareikämittauksen tasaantumisaika on mittaustulosten perusteella ollut noin yhdeksän tuntia (kuva 3.9). Tasaantumisaika riippuu olosuhteista ja mittalaitteesta eikä yksittäisen mittauksen tasaantumisaikaa voi pitää yleisesti pätevänä. Jos mittaus toteutetaan tiivistämällä muoviputki kohtisuoraan syitä vasten, tasaantumisaika on mahdollisesti vastaava kuin betonissa. Porauksen vaikutus on puumateriaalissa mittaustulosten perusteella vähäisempi, koska usean vuorokauden ja yli 10 % RH:n suuruista tasaantumisasiämiöitä ei havaittu.



Kuva 3.9. Lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden mittaustulokset ulkoseinälevyn porareikämittauksista mittauspisteistä 7-8 ja sääolosuhteista asennuksen (2.2.) jälkeisen vuorokauden ajalta 10 minuutin mittausjaksolla.

Viilupuun porareikämittauksessa sovellettiin betonia varten laadittua ohjeistusta. Muovinen mittausputki viistettiin päästään, jotta kosteus pääsee tasoittumaan putken sisällä olevan ilman ja materiaalin välillä (kuva 3.10). Viistämistä parempi ratkaisu olisi loveta putken pää vähintään neljältä puolelta, jotta putken suuntaus ei vaikuta mittaukseen. Viistämättömällä putkella ei tehty erikseen vertailumittausta eikä viistämättömän putken toimivuudesta ole tietoa. Käytetty muoviputki mittauksissa oli pituudeltaan 10 senttimetriä ja viiston pituus 1,5 senttimetriä. Toissijaisesti muoviputkea käytettiin anturin suojaamiseen kolhimiselta ja taitumiselta työmaalla. Mittausanturi on myös helpompi asentaa ja ottaa pois käyttäen muoviputkea, mikä vähentää riskiä anturin rikkoutumiseen. Porareikämittauksen asennuksen vaiheet:

- 1) reiän poraus haluttuun syvyyteen (esim. halkaisija 21 mm ja syvyys 80 mm)
- 2) tiivistyksen asennus muoviputken kiertämällä sähköteippiä (PVC-teippi) putken ylä- ja alaosaan
- 3) muoviputken (esim. sähköputki ulkohalk. 20 mm ja sisähalk. 16 mm) asennus jäməkästi paikoilleen porareikään
- 4) mittausanturin tiivistys sähköteipillä johtoliitoksen kohdalta (myös tiivistysmassalta anturi voidaan suojata teippaamalla)
- 5) anturi asennetaan mittausputkeen jäməkästi paikoilleen ja
- 6) tiivistetään mittausputki rakenteeseen ja anturi mittausputken tiivistysmassalla (esim. Sikaflex 11 FC+).



Kuva 3.10. Mittausputki (pituus 100 mm, halkaisija 20 mm) (vas.) ja mittausanturi (oik.) sähköteipillä tiivistettynä.

3.3 Kosteusriskipaikkojen arviointi lähtötiedoista ja havainnoinnalla

Suunnitelmien tarkastelu voidaan jakaa rakennetyyppien ja liitoskohtien tarkasteluun. Yleisesti rakenneosien liitos- ja nurkkakohdat ovat riskipaikkoja veden kulkeutumisen kannalta. Materiaalit rakenteissa voidaan jaotella niiden kosteudensietokyvyn perusteella. Yleisesti osa rakennusmateriaaleista ei kestä hetkellistäkään kastumista. Puurungon ensimmäiset lämmöneristeet tulivat vesikattoelementtien mukana työmaalle ja sisälevytysten asentaminen aloitettiin vesikaton rakentamisen jälkeen. Vain puurunko altistuu vesisateelle rakennusvaiheessa. Riskipaikkoina tarkasteltiin myös rakenteita, jotka pääsisivät kuivumaan huonosti kastuessaan.

Detaljien osalta suunnitelmissa havaittiin esimerkiksi:

- 1) kantavien seinäelementtien voimaliitoksen tiivistämätön varaus kulkee välipohjan läpi
- 2) alimmassa kerroksessa massiivipuun pintakäsittely epoksilla noin 30 senttimetrin korkeudelta puun ollessa betonia vasten
- 3) julkisivuelementtien asennus täysin kuivaan massiivipuun pintaan voi olla käytännössä mahdotonta ulkoilmassa
- 4) useat suunnitelmien korjaukset työmaavaiheessa ja
- 5) vesikaton detaljien suuri määrä.

Keskeisimmät havainnot työmaalla tutkimuksen alkuvaiheessa olivat veden valuminen kerrosten läpi vesisateen aikana ja irtonaisen veden kuivuminen näkyviltä pinnoilta sateen jälkeen. Havaintojen perusteella irtonainen vesi kuivui nopeasti jo ilman varsinaista puurungon lämmitystä talvikuukausina työmaalla.

3.3.1 Viilupuulelevyn kastumis- ja kuivumiskoe

Osana lähtötietoja tutkimukselle ja viilupuun kosteuskäyttäytymiselle oli vuonna 2016 toteutettu kastumis- ja kuivumiskoe, jossa testattiin myös hydrofobisen pintakäsittelyn vaikutusta. Kokeesta oli saatavilla esitysmateriaali, mutta ei varsinaista tutkimusraporttia. Kokeessa testattiin 10 millimetrin vesipatsasta levyn lape- sekä syrjäpintojen päällä ja lapepinnan kastelua levyn ollessa pystyasennossa. Kosteuspitoisuus määritettiin uunikuivausmenetelmällä näytepaloista. Kokeessa ilman suhteellisen kosteuden mittaus porareistä ei vastannut uunikuivausmenetelmällä määritettyjä kosteuspitoisuuksia. Levyjen ylimääräiset pinnat käsiteltiin vesihöyrytiiviksi.

Näytepala paksuudeltaan 10 millimetriä otettiin etäisyydeltä 15 millimetriä kasteltavasta lapepinnasta. Näytepalat otettiin kuivalta puolelta ja tuloksissa etäisyys on esitetty kasteltavasta pinnasta (taulukko 3.2). Lapepinnan kastelu kaksi kertaa viikossa ei aiheuttanut 17 painoprosentin rajan ylitystä. Käsittelemätön syrjäpinta kastui nopeasti vesipatsaan alla. Pinnoitettu syrjäpinta kastui merkittävästi hitaammin, mutta ei myöskään kuivunut kokeen aikana. Suurimmat kosteuspitoisuudet saatiin kastelun lopettamisen jälkeen, mikä on esitetty maksimikosteutena eri syvyyksiltä.

Kokeen johtopäätöksiä olivat esimerkiksi, että:

- vesipatsas voi olla lapepinnan päällä jopa 10 päivää ilman kastumisrajan (17 p-%) ylittymistä
- viistosadekastelu kaksi kertaa viikossa ei ole lainkaan haitallista
- kastuminen puun sisällä jatkuu vesirasituksen jälkeen joitakin päiviä ennen kuivumisen alkamista (kyseessä ei varsinaisesti ole mainittu kastuminen, jos vesirasitus on lopetettu, vaan kosteuden uudelleen jakautuminen koekappaleen sisällä)
- hydrofobista ainetta on käytettävä levyjen syrjäpinnoilla kastumisen estämiseksi ja
- syrjäpinnasta voimakkaasti kastuneen levyn kuivuminen voi olla erittäin hidasta.

Taulukko 3.2. Viilupuulelevyn kastumis- ja kuivumiskokeen tuloksia.

Koe vesipatsaalla	Näytepalan syvyys [mm]	Kastuminen (10 → 17 p-%)	Kuivuminen (alle 17 p-%)	Maksimikosteus [p-%]
Käsittelemätön lape	6-15	19 päivää	14 päivää	20,6
	15-24	alle 17 p-%	-	16,7
	24-33	alle 17 p-%	-	12,7
Pinnoitettu lape	6-15	14 päivää	19 päivää	21,6
Pinnoitettu syrjä	10-30	12 päivää	yli 19 päivää	-

3.3.2 Havainnot olosuhteista työmaalla

Alkuvaiheessa arviolta jouluihelmikuussa alinta betonikerrosta lämmitettiin rakennuksen ulkopuolella olevilla kahdella öljylämmittimellä. Öljylämmittimistä kulkivat ilmaputket rakennukseen. Betonikerroksen lämmittäminen on todennäköisesti vaikuttanut myös alimpien puurunkoisten kerrosten lämpötilaan. Maaliskuun puolesta välistä alkaen puurunkoisten kerrosten lämmitys toteutettiin erillisillä laitteilla porraskäytävässä useammassa kerroksessa. Huhtikuun puolen välin jälkeen rakennuksen päätyhuoneistojen lämmitystä tehostettiin sähkölämmittimillä.

Rakentamisvaiheessa tuuli sekä lämpötilaerot aiheuttavat ilmaan paine-eroja, jotka saavat ilman kiertämään rungon sisällä yleensä alaosista ylöspäin. Arvioituja ilman kulkureittejä rakennuksen rungon sisälle työmaavaiheessa olivat:

- a) rungon yläosan keskeneräisyys ennen vesikaton rakenteiden valmistumista
- b) ulkoseinässä välipohjan kohdalla olevat raot välipohjaelementtien välillä (n. 10 x 400 mm) ja satunnaiset reiät
- c) väliaikaisten suojausten raot (esim. vanerit ikkuna-aukkojen kohdalla sekä viilupuulevyt sivuseinillä)
- d) työmaahissin kiinnitykset ja vanerioven raot rakennuksen itäpuolella
- e) alimman betonikerroksen väliaikaiset suojaukset sekä mahdollinen tuuletus ja
- f) elementtiasennuksen aikana poistetut ulkoseinän suojaukset.

Rakennuksen sisällä ilma kulki porraskäytävässä vapaasti pois lukien ensimmäinen betonikerros, joka oli erotettu puukerroksista muovioivella. Pystykuilut porraskäytävässä olivat pääosin suljettuja ennen niiden raottamista porraskäytävän lattiavalujen jälkeen. Välipohjaelementin kannen läpi ei voi arvioida olevan ilmavirtausta, mutta pilarien kohdalla oli raot kerrosten välillä. Vesikatto voidaan olettaa ilmatiiviiksi, mutta konehuoneen ja kanavatilan kohdalla olevien väliaikaisten rakenteiden ja muovien osalta on vaikea arvioida ilman kulkua. Oletetusti ilma poistuu ulospäin rakennuksen yläosista useasta kerroksesta. Yleisesti ilman kulkua rakennuksen läpi voidaan pitää hallitsemattomana. Tuulisella paikalla korkeassa rakennuksessa useat pitkät raot ja yksittäiset avoimet aukot sekä ovet aiheuttavat poikkeuksellisen suuren ilman vaihtuvuuden rakennuksen sisällä. Hallitsematon ilmanvaihto aiheuttaa ylimääräisiä lämmityskustannuksia.

3.3.3 Kosteusolosuhteiden havaintoja työmaalta

Tutkimuksen alkuvaiheessa tammikuun 26. päivä oli työmaakäynnillä sateinen päivä ja rakennuskohteen sivuseinien suojauksia ei oltu vielä tehty kattavasti (kuva 3.11) Ennen sivuseinien suojausten valmistumista välipohjataso pääsi rakennuksen reuna-alueilla kastumaan vesisateen aikana laajalta alueelta (kuva 3.12). Kuvassa on esitetty myös kaakon puolelta vastakkaisen nurkan kuivempi alue samana ajankohtana. Veden valumista

havaittiin liitososien ja pilarien läpivientien kohdalla hyvin vaihtelevasti (kuva 3.13). Valumista havaittiin myös välipohjaelementtien päätyjen ja sivujen välistä useissa kohdissa (kuva 3.14) sekä kylpyhuone-elementtien kohdilla (kuva 3.15).



Kuva 3.11. Kohteen B-talo Helsingissä sateisena päivänä tammikuussa (26.1.2017).



Kuva 3.12. Välipohjan kastuminen ilman sivuseinän suojauksia: kastunut luoteisnurkka (vas.) 4. kerroksessa ja kuivempi kaakkoisnurkka (oik.) 3. kerroksessa (26.1.2017).



Kuva 3.13. Kastuneet teräslevyn (vas.) ja pilarin (oik.) läpiviennit välipohjan läpi 3. kerroksessa (26.1.2017).



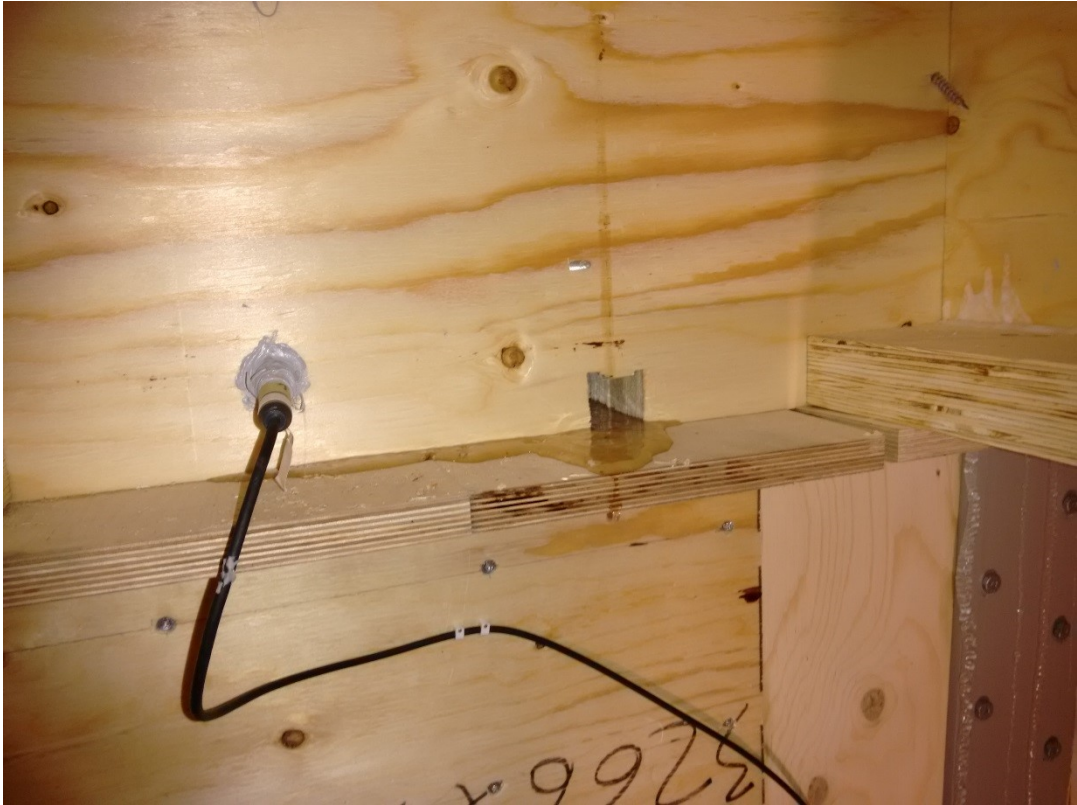
Kuva 3.14. Havaintoja valuvasta vedestä välipohjaelementtien päätyjen (vas.) ja sivujen (oik.) välistä 3. kerroksessa (26.1.2017).



Kuva 3.15. Havainto valuvasta vedestä kylpyhuone-elementin ympärillä 3. kerroksessa (26.1.2017).

Maaliskuun 6. päivä havaittiin aiemmin toteutetun 6. kerroksen välipohjan mittauspisteen vieressä olevasta vedenpoistoreiästä veden valumista (kuva 3.16). Kyseisessä kohdassa on aukko väliseinässä ja ripalaattojen päädyt on tuettu palkin päälle. Kuvassa on väliseinän kohdalla teräslaatta. Yläpuolisessa kerroksessa oli samalla kohtaa sulavaa jätää ja kasa pressuja. Kaksi muuta vedenpoistoreikää tarkastettiin väliseinän kohdalta rakennuksen länsipuolelta ja ne todettiin kuiviksi.

Maaliskuun 13. päivä tehtiin havaintoja valuvasta vedestä toisessa kerroksessa (kuva 3.17), kun viimeisen kerroksen seinät olivat jo asennettu. Vastaava havainto tehtiin useamman kylpyhuone-elementin kohdalla toisessa kerroksessa. Samana päivänä havaittiin myös homeen kasvua koivuvanerin reunassa 2. kerroksen porraskäytävällä väliseinän yläosassa (kuva 3.18). Käytävältä tehtiin kaksi paikallista havaintoa eikä vastaavaa havaittu ylemmissä kerroksissa. Kasvu oli selkeästi rajoittunut koivuvaneriin, vaikka kuvassa näkyvä viilupuun pääty oli myös kostea.



Kuva 3.16. Aukon kohdalla olevan ripalaatan päätypalkin vedenpoistoreikä toiminnassa mittauspisteen 17 vieressä 6. kerroksessa (6.3.2017).



Kuva 3.17. Havainto valuvasta vedestä toisen kerroksen kaakkoispäädyn asunnon kylpyhuone-elementin kohdalla (13.3.2017).



Kuva 3.18. Homeen kasvua koivuvanerin reunassa 2. kerroksen porraskäytävällä väli-seinän yläosassa (13.3.2017).

Huhtikuun puolen välin jälkeen työmaalla oli tehty järjestelyjä lämpötilan nostamiseksi rakennuksen päädyissä. Päädyt on erotettu kaikissa kerroksissa porraskäytävästä ripustetulla muovilla ja tiloihin on tuotu lisää lämmityslaitteita (kuva 3.19). Kuvassa näkyy vasemmalla myös porraskäytävän pystykuilujen peitetyt aukot. Kolmannessa kerroksessa oli aloitettu lattiavalut porraskäytävässä ja pystykuiluja oli avattu (kuva 3.20). Kuvassa oikealla näkyy päätyhuoneiston reikien ja aukkojen väliaikainen tiivistäminen teipillä.



Kuva 3.19. Lämmityksen tehostaminen erottamalla päätyhuoneistot ripustetulla muovilla porraskäytävästä 2. kerroksessa (vas.) ja lisäämällä lämmitystä päätyhuoneistoissa (oik.) (27.4.).



Kuva 3.20. Sementtipohjainen lattiavalu ja avatut läpiviennit 3. kerroksen porraskäytävässä (vas.) ja väliaikaisesti teipattuja rakoja sekä reikiä kantavassa päätyseinässä (27.4.).

3.4 Mittauspisteiden valinta

Mittauspisteitä valittiin työn ohjaukseen liittyvien keskusteluiden, palaverien ja havaintojen perusteella. Tutkimuksen alkuvaiheessa päätettiin kohdistaa mittauksia erityisesti ulkoseinien massiivipuulevyjen reunojen lähelle ja rakenteiden liitoskohtiin. Kosteuden siirtyminen syysuunnassa seinälevyjen päädyistä oletettiin merkittävämmäksi kuin levyn lappeen kastuminen. Rakenteiden liitoskohdissa vesi voi valua tai imeytyä kapillaarisesti rakoihin ja kuivua erittäin hitaasti, mikä aiheuttaa riskin jatkuvasta korkeasta kosteuspi-toisuudesta liitoskohdassa. Työmaahavaintojen avulla mittaukset kohdistettiin kohtiin, jotka väliaikaisesti kastuvat rakennusaikana. Välipohjan ripalaatat ovat kohteessa molemmin puolin avoimia rakennusvaiheessa ja levyn rakenne ohuempi kuin ulkoseinissä, mikä helpottaa niiden kuivumista mahdollisen kastumisen jälkeen. Ohuen rakenteen mittaus olisi ollut myös haastavaa käytössä olleella laitteistolla.

Kappaleessa on esitetty taulukossa 3.3 yhteenveto toteutetuista mittauksista, niiden sijainnista ja ajankohdista. Mittauspisteiden tarkempi kuvaus on esitetty liitteessä C mit-taustulosten yhteydessä. Osa asennetuista mittauksista jouduttiin purkamaan, koska ei-kantavan ulkoseinän rakennedetaljista poistettiin ohut viilupuulevy. Lattiavaluja ei asun-noissa ollut toteutettu vielä kesäkuun alussa mittauksia purettaessa eikä valun alapuoli-seen askelääneneristeeseen päästy toteuttamaan mittauksia. Kaksi päädyn julkisivumit-tausta oli poistettu elementtiasentajien toimesta julkisivun alta ja toisen kahden mittauk-sen toteutusta muutettiin luotettavammaksi. Kappaleen taulukossa 3.4 on esitetty myös eri syistä epäonnistuneet mittaukset. Yhteen julkisivun mittausanturiin oli sattunut osu-maan myös ruuvi.

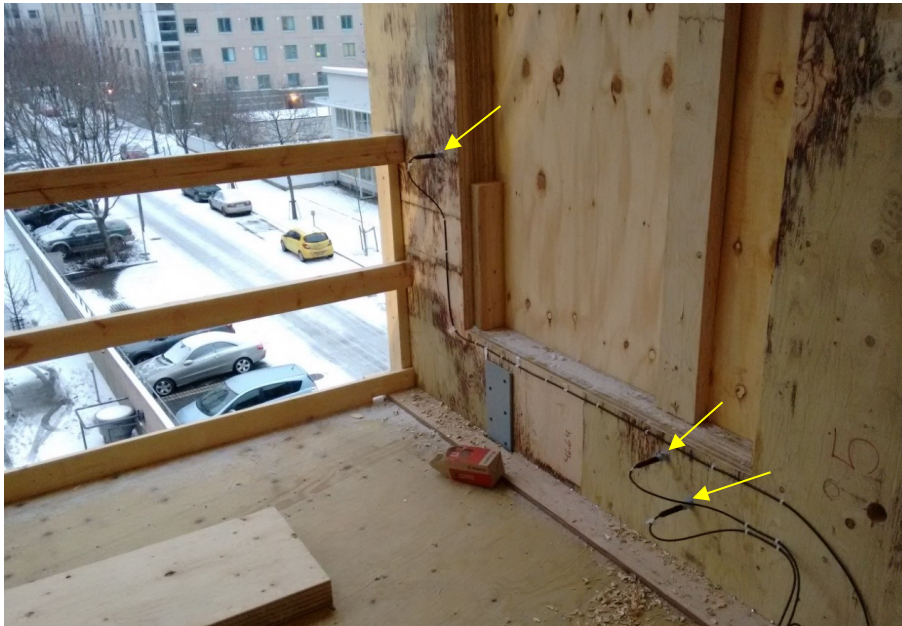
Taulukko 3.3. Yhteenveto diplomityössä toteutetuista mittauspisteistä.

Mittauspisteen numero	Kuvaus sijainnista B-talossa	Aloitus	Lopetus	Muut tiedot
5	2.krs Olosuhde	2.2.	1.6.	
1	3.krs Olosuhde	26.1.	2.2.	
10	4.krs Olosuhde	9.2.	1.6.	Comark
39	7.krs Olosuhde	12.4.	1.6.	
4	2.krs VS Rakenne	2.2.	1.6.	
7	4.krs US Rakenne	2.2.	1.6.	
8	4.krs US Rakenne	2.2.	1.6.	
9	4.krs US Rakenne	2.2.	1.6.	
12	5.krs US Rakenne	16.2.	12.5.	
13	5.krs US Rakenne	16.2.	12.5.	
14	5.krs US Rakenne	16.2.	12.5.	
15	2.krs VP Rakenne	16.2.	1.6.	
16	2.krs VP Rakenne	16.2.	1.6.	
24	2.krs VP Rakenne	6.3.	21.3.	
17	6.krs VP Rakenne	16.2.	1.6.	
19	6.krs VP Rakenne	6.3.	1.6.	
20	6.krs VP Rakenne	6.3.	1.6.	
21	7.krs VP Rakenne	6.3.	1.6.	
22	7.krs VP Rakenne	6.3.	1.6.	
23	7.krs VP Rakenne	6.3.	1.6.	
34	2.krs VP Rakenne	13.3.	1.6.	
35	2.krs VP Rakenne	13.3.	1.6.	
37	3.krs Julkisivu	12.4.		Toiminta tarkastettu 1.6.
41	5.krs Julkisivu	1.6.		
40	7.krs Julkisivu	12.4.		Toiminta tarkastettu 1.6.

Taulukko 3.4. Yhteenveto epäonnistuneista tai hylätyistä mittauspisteistä.

Mittauspisteen numero	Kuvaus sijainnista B-talossa	Aloitus	Lopetus	Muut tiedot
11	3.krs Olosuhde	9.2.	23.2.	Comark, ei mittaustuloksia
18	7.krs Olosuhde	23.2.	12.5.	Comark, ei mittaustuloksia
32	5.krs Julkisivu, sivu	13.3.	4.4.	Rakennedetaljin muutos
29	7.krs Julkisivu, sivu	13.3.	4.4.	Rakennedetaljin muutos
26	3.krs Lattiavalu	-	-	Ei valua 1.6. mennessä
30	7.krs Lattiavalu	-	-	Ei valua 1.6. mennessä
27	3.krs Julkisivu, pääty	12.4.	-	Rikkoutunut elementtiasennuksessa
38	7.krs Julkisivu, pääty	12.4.	-	Rikkoutunut elementtiasennuksessa
31	5.krs Julkisivu, pääty	13.3.	12.5.	Mittauksen toteutus muutettu
28	7.krs Julkisivu, pääty	13.3.	1.6.	Mittauksen toteutus muutettu

Massiivipuisten seinälevyjen kuivumiseen todettiin liittyvän enemmän riskejä ja mittauspisteet kohdistettiin erityisesti näkyvissä olevien puun päätypintojen lähelle (mittauspisteet 7-9, 12-14). Mittauspisteiden sijainti on esitetty liitteessä C. Mittauspisteet toteutettiin ikkuna-aukon alapuolelle ja sivulle (kuva 3.21). Ulkoseinän rakennemittauksia toteutettiin yhteensä kuusi kappaletta. Mittausten tavoitteena oli tutkia seinälevyn kosteuskäyttäytymistä rakentamisen aikana ja havaita kastuminen lähellä levyjen päätypintoja, joissa veden imeytyminen syiden suuntaan olisi mahdollisimman nopeaa. Työmaalla väliaikaisesti näkyviin jääneet päätypinnat on käsitelty hydrofobisella aineella vedenimeytymisen hidastamiseksi. Mittaukset toteutettiin kahteen rakennuksen nurkkaan, koska nurkat oletetusti altistuvat viistosateelle eniten rakennusaikana.



Kuva 3.21. Rakennuksen päätyseinän nurkka ja mittauspisteiden 7 (vas.), 8 (kesk.) ja 9 (oik.) sijainti (2.2.2017).

Välipohjassa havaittiin yksi selkeä kohta, jossa tehtiin useita veden valumisen havaintoja (mittauspisteet 15, 16, 24, 21-23), mikä esitettiin myös aiemmin kuvassa 3.14 vasemmalla. Eri sijaintiin tehtiin myös vertailumittaus välipohjaan (mittauspisteet 17, 19, 20). Olosuhteita mitattiin kohteessa rajallisesti diplomityön mittauksilla, mutta eri olosuhdemittausten tulosten vertailua varten toteutettiin pitkäaikaisempia (mittauspisteet 5, 10, 18) ja lyhytaikaisempia mittauspisteitä (mittauspisteet 1-3, 11, 39). Ennen rungon suojaus- ja varsinaisen lämmityksen aloittamista sisä- ja ulkotilan lämpötilat ovat olleet lähellä toisiaan. Kattavaa olosuhdemittausta ei omalla laitteistolla sisällytetty mittauksiin, koska työmaalla ei ollut varsinaista lämmitystä puurungon rakentamisen alkuvaiheessa, johon mittausten oli tarkoitus alun perin ajoittua. Lisäksi työmaalla oli muita olosuhdemittauksia. Lämmitysvaiheen oli tarkoitus ajoittua ajankohtaan ennen sisätyövaiheen aloittamista ja mittausten päättymistä.

Maaliskuun havaintojen perusteella tehtiin olosuhteiden mittauspiste kolmannen kerroksen märkätilan putkitilaan (mittauspiste 35) ja rakennemittaus välipohjaelementtien päätypalkkien väliin (mittauspiste 34). Mittauspisteet asennettiin välipohjaan toisesta kerroksesta. Syysuunnan merkitys ja rakenteiden kokoonpano ei ole ollut täysin selvillä mittauksia suunniteltaessa ja toteutettaessa. Arvioidusti mittausputken asettaminen ja syy-suunta vaikuttavat mittaukseen oleellisesti, jos kosteus käytännössä siirtyy pääasiassa syysuunnassa. Osa ulkoseinälevyn mittausputkista on avoimesta osastaan kohdistettu reunan suuntaan, mutta poikkisuuntaiset syyt käytännössä estävät kosteuden siirtymistä.

3.5 Muiden mittausten menetelmät ja toteutus

Työmaalla muita toteutettuja mittauksia olivat RF SensIT:in toteuttamat mittaukset, työmaan olosuhdemittaus SRV:n toteuttamana ja Swecon ottamat näytepalat, joista kosteuspitoisuus määritettiin uunikuivausmenetelmällä. Näytepaloja otettiin työmaalta arviolta yli sata kappaletta. Esimerkiksi porraskäytävien lattiavalut ja seinien levyttäminen aloitettiin työmaalla näytepaloista saatujen mittaustulosten osoittaman kuivumisen perusteella. Mittausten tuloksia on lyhyesti selostettu diplomityössä.

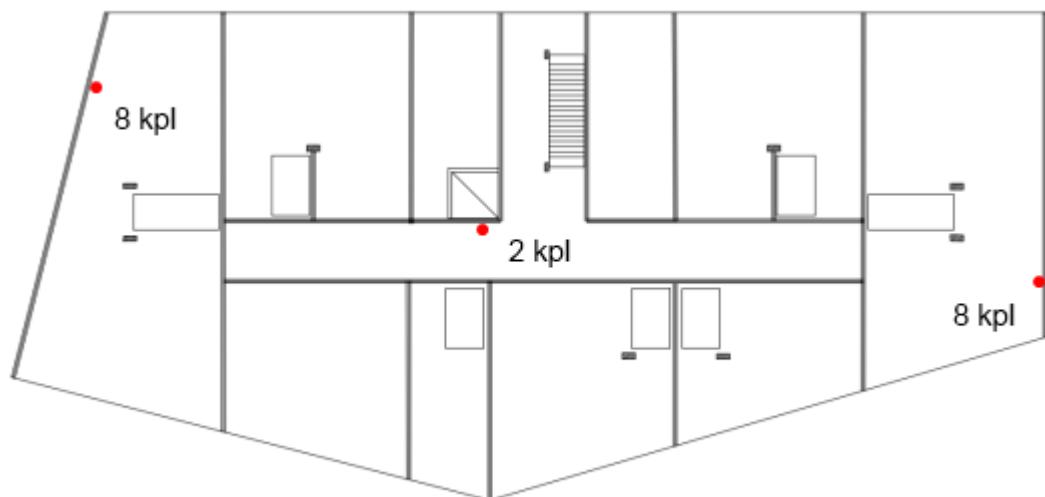
RF SensIT:iltä tilattiin kohteen asuinkerrostaloihin Stora Enson toimesta rakenteisiin jääviä lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden mittausantureita kahteen asuintaloon yhteensä 64 kappaletta. Ensimmäisenä rakennettuun B-taloon mittaukset asennettiin rakennuksen keskelle kylpyhuoneen kohdalle eri kerroksiin sekä vesikatolle. Vesikaton mittauspisteitä valittiin diplomityössä tehtyjen selvitysten ja mittaustarpeiden mukaan. RF SensIT:in mittausten toteutus ja tulokset on esitetty liitteessä D.

RF SensIT:in käyttämän mittausjärjestelmän tekniikka on kehitetty Aalto-yliopiston ja VTT:n Rakennuksiin integroitavien kosteusanturien luotettavuus eli RAILO-hankkeessa, joka aloitettiin vuonna 2009. Laitteistossa on neljä lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden mittausanturia, jotka on kytketty pitkällä johdolla anturimoduuliin. Moduuli välittää mittaustiedon eteenpäin langattomasti vastaanotinyksikölle, joka lähettää tiedon pilvipalveluun tarkasteltavaksi. Anturien mittaustarkkuus ilman suhteelliselle kosteudelle on ± 3 % RH. Anturit on suunniteltu asennettavaksi betonivaluun tai muihin rakenteisiin. (Talotekniikka 1/2013)

Työmaan olosuhdemittaus keskittyi lämmitysvaiheiden tarkasteluun betoni- ja puurungossa. Työmaalla oli käytössä valmistajan Controlant laitteita, jotka päivittävät mittaustulokset automaattisesti pilvipalveluun tarkasteltavaksi. Mittalaitteet oli kiinnitetty rakennuksen päätyjen seiniin (kuva 3.22). Laitteiden kokonaismäärä ja karkea sijainti B-talon puurunkoisissa kerroksissa on esitetty kuvassa 3.23. Olosuhdemittausten tuloksia on tarkasteltu ja esitetty sopivilta osin diplomityössä.



Kuva 3.22. Ilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittauslaite valmistajalta Controlant kohteessa (21.3.2017).



Kuva 3.23. Työmaan olosuhdemittausten karkea sijainti ja kokonaismäärä puurunkoisissa kerroksissa kohteen B-talossa (Controlant-mittalaitteet).

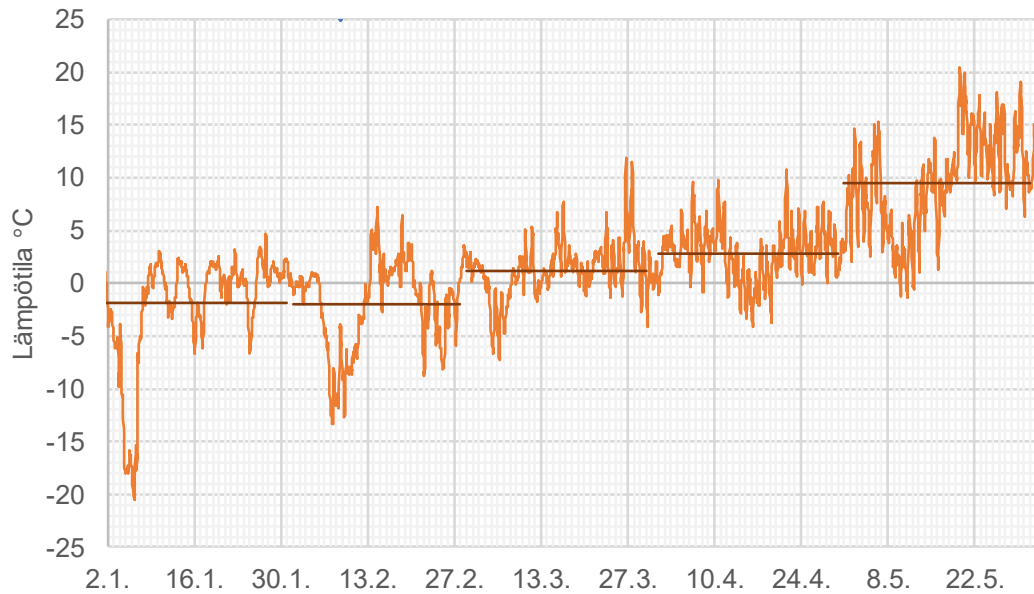
4. MITTAUSTULOSTEN ESITTELY

Tässä kappaleessa esitellään mittausten tuloksia kootusti ja oleellisilta osin tulosten arviointia varten. Kattavammin mittausten toteutus, sijainti ja tulokset kuvaajineen on esitetty liitteissä C ja D. Mittalaite on voinut olla toiminnassa jo ennen asennusta ja tällöin asennusvaihe näkyy huomattavana muutoksena mittaustuloksen alussa. Selkeyden vuoksi mittaustulokset on esitetty alkaen asennuspäivää seuraavasta päivästä, jolloin mittauksen aloittamisesta on arviolta kulunut 7-15 tuntia riippuen asentamisen ajankohdasta. Työmaan olosuhdemittausten osalta mittauksen alkamisajankohta on päätelty tuloksia tarkastelemalla. Mittaustulosten varsinainen arviointi on esitetty kappaleessa 5.

4.1 Säähavainnot

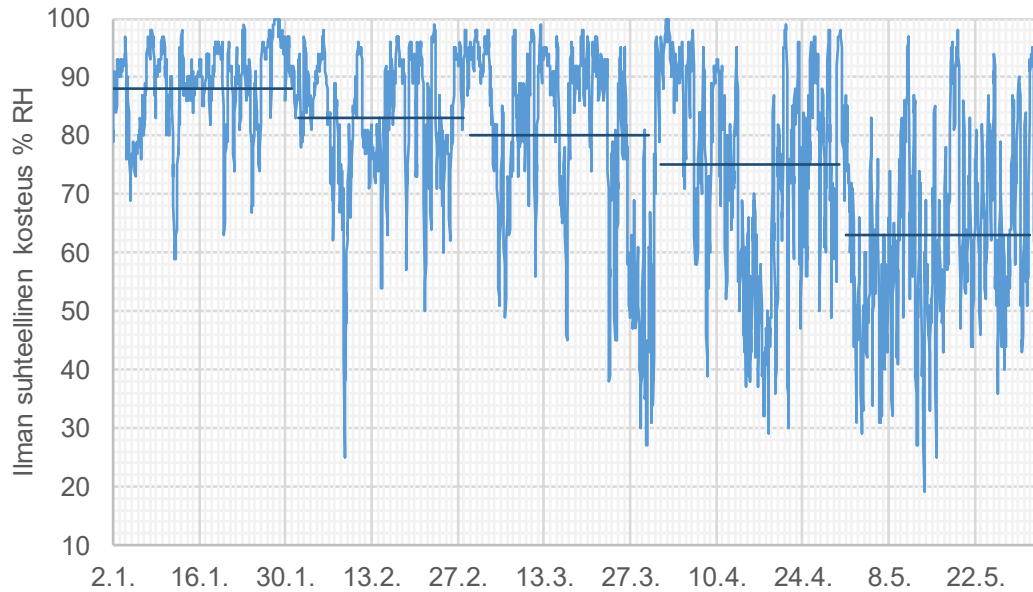
Mittaustulosten tarkasteluun käytetään säähavaintoja Ilmatieteen laitoksen Helsingin Kaisaniemen sääasemalta. Lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden osalta säähavainnot on pystytty vertaamaan Jätkäsaaren työmaan olosuhteiden mittaukseen ulkoilmassa, joka vastasi säähavaintoja. Sateet ovat ilmiönä paikallisia eikä sademäärää ole mitattu työmaalla, mikä voi aiheuttaa eroa säähavaintojen ja työmaalla toteutuneen sademäärän välille.

Kuvissa 4.1 ja 4.2 on esitetty ilman lämpötila ja suhteellinen kosteus sekä niiden kuukausikeskiarvot Helsingin Kaisaniemessä vuodelta 2017 tammi-toukokuulta. Kuvaajat on jaettu kahden viikon ajanjaksoihin alkaen tammikuun ensimmäisestä maanantaista. Kuvaajista näkyy ulkoilman olosuhteiden suuri vaihtelu päivittäin ja viikoittain. Mittaustulosten esittämisen selkeyttämiseksi työssä käytetään tarvittaessa eri mittauspisteiden vertailuun liukuvaa keskiarvoa, joka esittää keskimääräisen arvon tietyltä kuluneelta ajanjaksolta (esim. 24 tai 72 tuntia). Liukuvassa keskiarvossa muutokset olosuhteissa näkyvät viiveellä, mikä on syytä ottaa huomioon päivämääriä tarkasteltaessa.



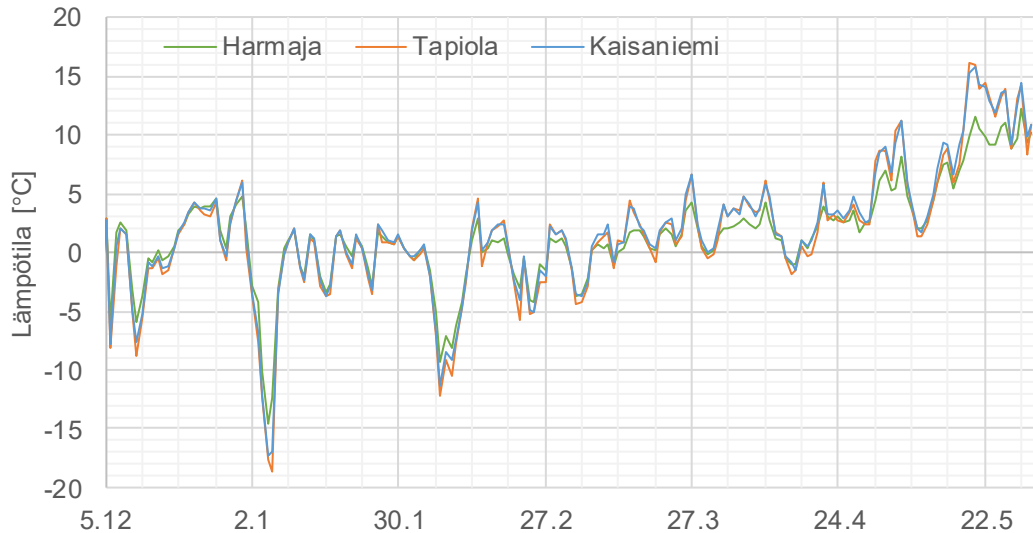
Kuva 4.1. Ulkoilman lämpötila ja kuukausikeskiarvot Helsingin Kaisaniemessä tammi-toukokuussa 2017 (Ilmatieteen laitoksen avoin data).

Tammi- ja helmikuussa muutaman päivän ja yli viikon mittaiset lämpötilajaksot olivat nollan molemmiin puolin. Talvella Helsingissä on satanut lumi- sekä vesisadetta. Tammi-helmikuun olosuhteet aiheuttivat työmaalla myös paikallisesti kertyneen veden jäätymistä ja sulamista. Maaliskuun alusta lämpötilajaksot olivat pääasiassa nollan yläpuolella. Lämpötilan putoamista pakkasen puolelle yön aikana tapahtui vielä kolmena päivänä toukokuussa. Päivittäiset lämpötilamuutokset vaikuttavat useita tunteja myös kosteusolosuhteisiin työmaalla. Ulkoilman suhteellinen kosteus vaihtelee voimakkaasti päivittäin (kuva 4.2). Kuvaajassa näkyvät kuukausittaiset keskiarvot laskevat tammikuun noin 88 % RH ilman suhteellisesta kosteudesta toukokuun arvoon 63 % RH. Toukokuun keskiarvo vastaa jo tavanomaisilta kuivumisolosuhteilta vaadittua arvoa. Kuivaus lämmittämällä on kuitenkin helpompaa ulkoilman ollessa kylmää, jolloin vesihöyrypitoisuus on pieni ulkoilmassa. Ulkona sateelta ja auringon paisteelta suojassa olevan puumateriaalin kosteuspitoisuus pyrkii tasapainoon kohti vuodenajan mukaista keskimääräistä ilman suhteellista kosteutta (Häglund 2007).

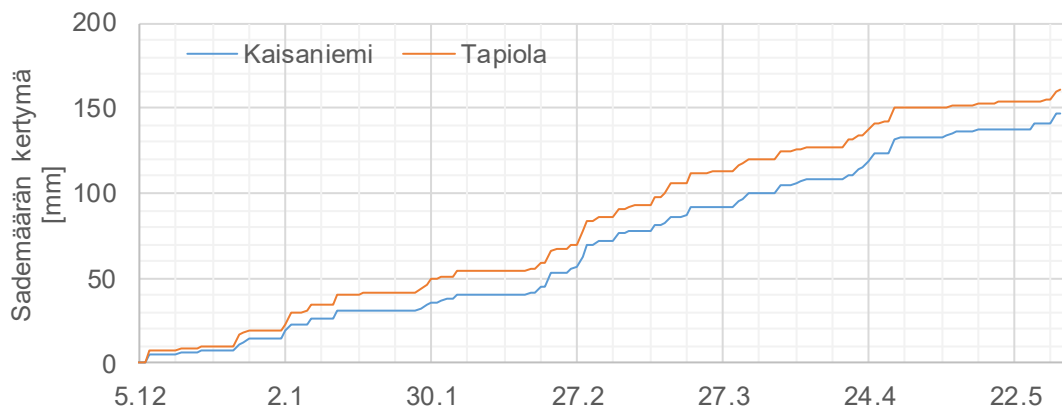


Kuva 4.2. Ulkoilman suhteellinen kosteus ja kuukausikeskiarvot Helsingin Kaisaniemessä tammi-toukokuussa vuonna 2017 (Ilmatieteen laitoksen avoin data).

Eri sääasemien havainnot on myös verrattu toisiinsa mahdollisten alueellisten poikkeamien havaitsemiseksi. Päivittäisistä keskilämpötiloista ja sademäärän kertymästä eri sääasemilta joulutoukokuulta on esitetty kuvat 4.3 ja 4.4. Lämpötila Espoon Tapiolan ja Helsingin Kaisaniemen välillä vastaa toisiaan. Helsingin Harmajan saariston sääaseman lämpötilat ovat kovina pakkaspäivinä keskimäärin lämpimämpiä ja lämpiminä päivinä viileämpiä kuin muilla sääasemilla. Sademäärät joulutoukokuulta ovat Tapiolasta 160 millimetriä ja Kaisaniemestä 150 millimetriä, mikä on erona vähäinen. Harmajan sääasemalta ei ole saatavilla sademäärää. Sademäärän kertymässä näkyy merkittävimpien sateiden ajankohdat ja kuukausittainen kertymä muutoksena kuvaajassa. Päivämäärät on esitetty maanantaille neljän viikon välein.



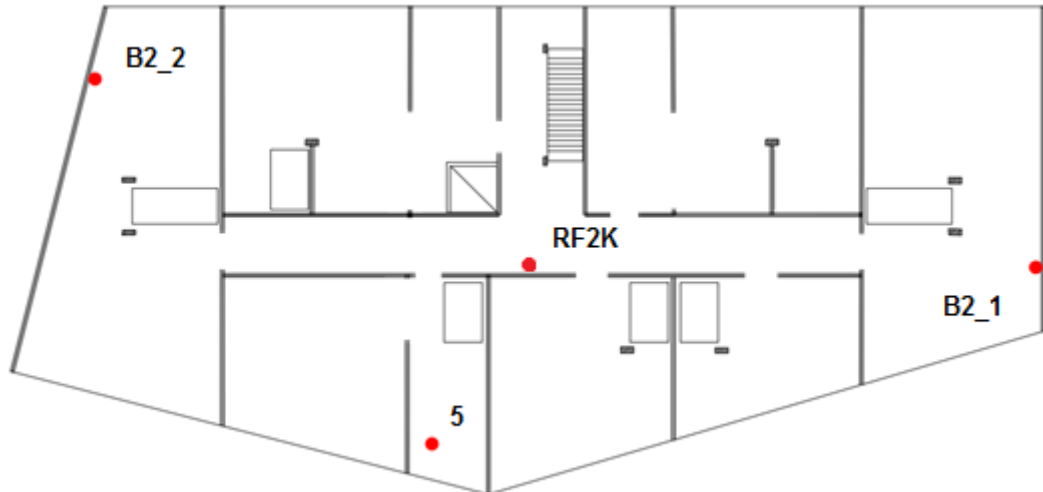
Kuva 4.3. Säähavaintojen päivittäiset keskilämpötilat joulutoukokuulta Helsingin Kaisaniemestä ja Helsingin Harmajasta saaristosta sekä Espoon Tapiolasta (Ilmatieteen laitoksen avoin data).



Kuva 4.4. Sademäärän kertymä joulutoukokuulta Helsingin Kaisaniemestä sekä Espoon Tapiolasta (Ilmatieteen laitoksen avoin data).

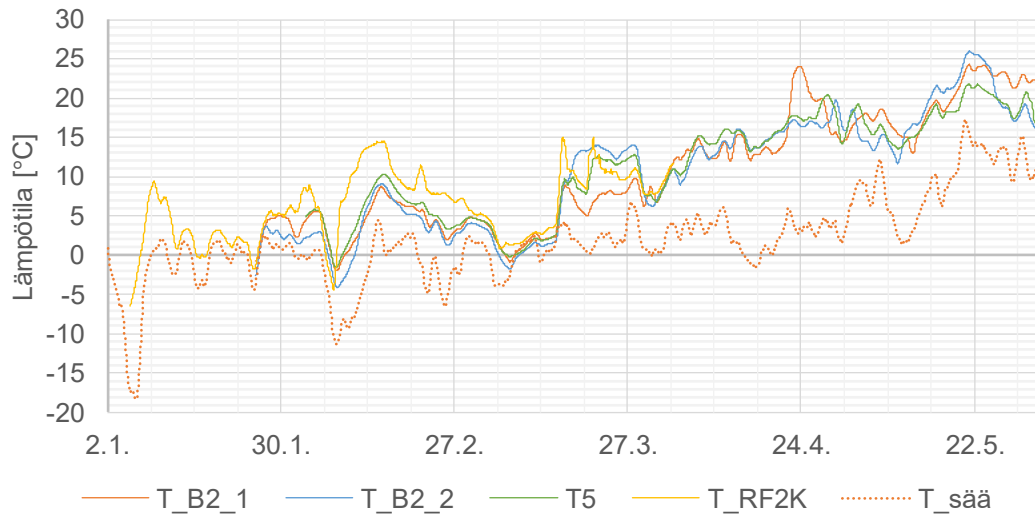
4.2 Olosuhdemittaukset toisessa kerroksessa

Työmaalla toteutettujen olosuhdemittausten tuloksia rakennuksen toisessa kerroksessa tarkastellaan erityisesti kriittisimmän olosuhdemittauksen löytämiseksi. Mittaukset on sijoitettu eri puolille kerrosta (kuva 4.5). Päätyjen mittauksen on toteuttanut työmaa, porraskäytävän mittauksen RF SensIT ja mittauspiste viisi kuuluu diplomityössä toteutettuihin mittauksiin. Päädyissä olevat mittalaitteet on kiinnitetty seinään noin puolentoista metrin korkeudelle, porraskäytävän mittalaite on lattiasta noin metrin korkeudella muovisen tukiasemasalkun vieressä ja mittauspisteen viisi anturi roikkuu katosta yli metrin päässä seinäpinnoista.

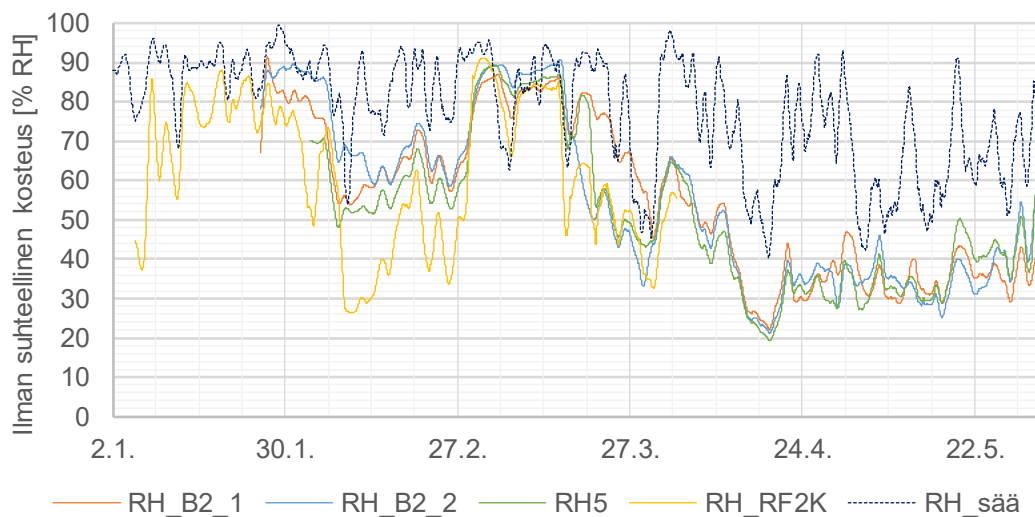


Kuva 4.5. Työmaan olosuhdemittausten sijainti rakennuksen päädyissä (Controlant B2_1 ja B2_2), RF SensIT:in tukiaseman mittausta (RF2K) porraskäytävässä ja mittauspiste 5 huonetilassa.

Olosuhteiden mittaustuloksista on esitetty vuorokauden liukuvat keskiarvot lämpötilasta ja ilman suhteellisesta kosteudesta (kuva 4.6 ja kuva 4.7). Lämpötila oli eri puolilla kerrosta samanlainen, vaikka runko ei ollut rakennusaikana erityisen tiivis. Helmikuussa käytävän lämpötila on ollut 5 °C muuta kohdetta lämpimämpi. Porraskäytävässä sijaitsevat putkistojen läpiviennit ja portaat, mikä voi lisätä ilmavirtausta alimmasta lämmitystä betonikerroksesta. Puurunkoisten kerrosten varsinaiset lämmitystoimenpiteet aloitettiin maaliskuun puolivälissä. Homemallin mukainen homeen suotuisan kasvuolosuhteen alaraja 5 °C lämpötilassa on 88 % RH suhteellista kosteutta materiaalipinnalla (RIL255-1-2014). Kyseiset arvot eivät ylity samanaikaisesti kuin hetkellisesti olosuhdemittauksessa maaliskuun alussa. Olosuhteissa joko ilman suhteellinen kosteus tai lämpötila ei ole suotuisa. Olosuhdemittausten mittaussvälin pituus on ollut korkeintaan yhden tunnin.



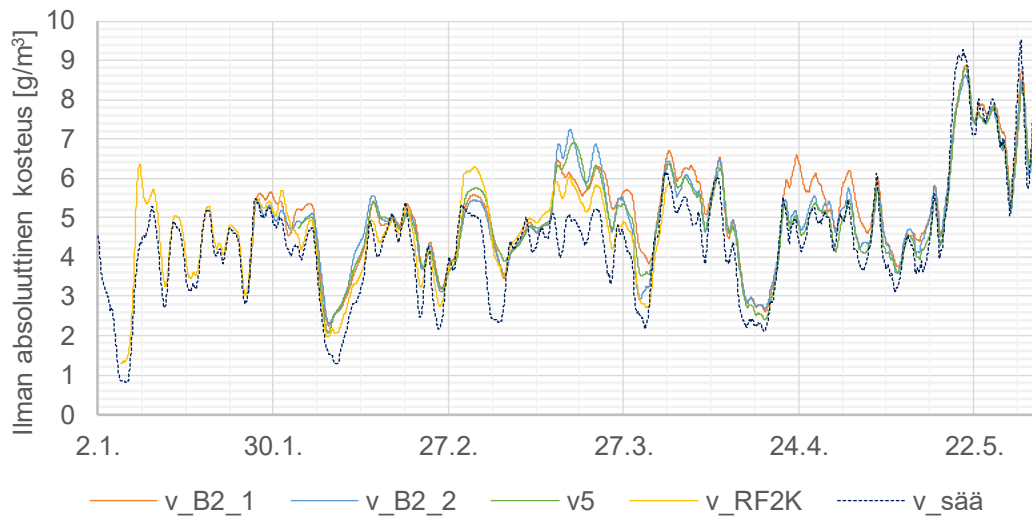
Kuva 4.6. Lämpötilan mittaustulosten 24 tunnin liukuva keskiarvo olosuhdemittauksista B-talon 2. kerroksesta kaakkoispäädystä (T_{B2_1}), luoteispäädystä (T_{B2_2}), porraskäytävästä (T_{RF2K}) ja länsipuolen sivuseinän keskivaiheilta ($T5$).



Kuva 4.7. Ilman suhteellisen kosteuden mittaustulosten 24 tunnin liukuva keskiarvo olosuhdemittauksista B-talon 2. kerroksesta kaakkoispäädystä (RH_{B2_1}), luoteispäädystä (RH_{B2_2}), porraskäytävästä (RH_{RF2K}) ja länsipuolen sivuseinän keskivaiheilta ($RH5$).

Lisäksi tuloksista on laskettu ilman vesihöyrypitoisuus (kuva 4.8). Ilman vesihöyrypitoisuuden lasketuissa tuloksissa ei ole selkeästi muita poikkeavia mittauspisteitä, joissa kosteuspitoisuus olisi jatkuvasti muita pisteitä suurempi. Olosuhteiden osalta mikään toisen kerroksen mittauspiste ei ole selkeästi muita kriittisempi kuin jaksottaisesti. Paikallisesti olosuhteet voivat työmaalla olla erilaiset useista syistä johtuen, kuten esimerkiksi työskentelystä mittauspisteen lähellä. Mittauspisteen RF2K osalta tuloksia on tallentunut vain huhtikuun alkuun asti. Ulkoilman vesihöyrypitoisuus on korkeimmillaan toukuussa, mikä on havaittavissa myös sisäilmassa. Poikkeavia sisäilman kosteusolosuhteita

tarkastellaan kosteuslisällä, joka on ulko- ja sisäilman vesihöyrypitoisuuksien erotus. Kosteuslisällä pyritään tarkastelemaan rakennukseen kulkeutuvaan ilmaan sitoutuvaa kosteus määrää.



Kuva 4.8. Ilman vesihöyrypitoisuuden laskettu 24 tunnin liukuva keskiarvo olosuhdemittauksista B-talon 2. kerroksesta kaakkoispäädystä (v_{B2_1}), luoteispäädystä (v_{B2_2}), porraskäytävästä (v_{RF2K}) ja länsipuolen sivuseinän keskivaiheilta (v_5).

4.3 Rakennemittausten yhteenveto

Ulkoseinämittausten osalta on esitetty alku- ja lopputilanteen yhteenveto taulukossa 4.1. Mittauspisteet 12-14 kastuivat kahdesti työmaalla, joista ensimmäisellä kerralla loggerilaitte ja yksi anturi vaihdettiin. Kyseisten mittauspisteiden lopputilanteen tuloksissa on erittäin suurta vaihtelua, mikä viittaa virheelliseen mittaustulokseen (Liite C: kuva 10). Taulukon keskimääräisen tasapainokosteuden painoprosentti on luettu kuvaajasta (RT 21-10978 2009) lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden perusteella eikä se ole tarkka. Valittuna ajankohtana keskihajonta ilman suhteellisen kosteuden tuloksessa on pienempi kuin kolme prosenttiyksikköä. Sahatavaraa kutsutaan sisäkuivaksi alle 13 painoprosentissa ja tehtaalta elementtivalmistajalle toimitettu viilupuu on kosteuspitoisuudeltaan arviolta 8-10 painoprosenttia.

Ulkoseinän mittauspisteiden 7-9 kosteuspitoisuus muuttui mittausaikana vähän ja vastasi alkutilannetta lopputilanteessa. Lämpötilaero mittauksen ja ulkoilman välillä oli pienimmillään alkutilanteessa. Ulkoseinän mittauspisteissä 12-14 mitattiin suurempia kosteuspitoisuuksia kuin vastakkaisessa nurkassa, mutta mittauspisteiden kastuminen aiheuttaa tuloksiin epäluotettavuutta.

Taulukko 4.1. Ulkoseinälevyn rakennemittausten yhteenveto, jossa on esitetty keskimäärisiä arvoja mittaustuloksista ja ulkoilman lämpötilasta sekä arvioitu tasapainokosteutta vastaava painoprosentti. Mittauspisteiden 12-14 lopputilanteen tuloksissa oli suurta hajontaa ja ne jätettiin pois tarkastelusta.

Mittauspiste		Alkutilanne				Lopputilanne			
		Rakenne			Sää	Rakenne			Sää
Kuvaus	Numero	% RH	°C	p-%	°C	% RH	°C	p-%	°C
Ajanjakso		14.2.-28.2.				17.5.-31.5.			
US Rakenne 4.krs	7	53	1,0	11	-0,4	48	21,6	10	12,5
US Rakenne 4.krs	8	54	0,9	11	-0,4	51	20,8	10	12,5
US Rakenne 4.krs	9	43	0,8	10	-0,4	53	20,4	10	12,5
Ajanjakso		10.3.-28.3.				28.4.-11.5.			
US Rakenne 5.krs	12	71	3,9	15	1,3	-	23,3	-	5,6
US Rakenne 5.krs	13	66	3,5	14	1,3	-	22,8	-	5,6
US Rakenne 5.krs	14	58	3,7	13	1,3	-	22,6	-	5,6

Taulukossa Taulukko 4.2 väliseinäarakenteen mittauksessa lämpötilaa on verrattu ympäröivään sisäilmaan ja lämpötilaerot mittauksessa ovat pienempiä kuin ulkoseinällä. Väliseinässä mitattiin hieman korkeampia kosteuspitoisuuksien arvoja verrattuna 4. kerroksen ulkoseinämittaukseen. Alku- ja lopputilanne vastaavat toisiaan eikä kohdassa tapahtunut merkittävää muutosta mittauksen aikana.

Taulukko 4.2. Väliseinälevyn rakennemittausten yhteenveto, jossa on esitetty keskimäärisiä arvoja mittaustuloksista ja sisäilman lämpötilasta sekä arvioitu tasapainokosteutta vastaava painoprosentti.

Mittauspiste		Alkutilanne				Lopputilanne			
		Rakenne			Sisä	Rakenne			Sisä
Kuvaus	Numero	% RH	°C	p-%	°C	% RH	°C	p-%	°C
Ajanjakso		17.2.-3.3.				19.5.-31.5.			
VS Rakenne 2.krs	4	61	4,1	13	5,3	67	18,8	14	19,8

Välipohjan mittauspisteiden yhteenvedosta (taulukko 4.3) on jätetty pois rakoon tai raon läpi tehdyt mittaukset, joissa raon laajeneminen kuivumisvaiheessa voi vaikuttaa tulokseen merkittävästi. Mittausten toimivuutta tarkastettiin yli 95 % RH:n tuloksista johtuen. Kaikkien mittauspisteiden toimivuus tarkastettiin ensimmäisen kerran 4. huhtikuuta rikkomalla tiivistys ja ottamalla anturi huonetilan ilmaan, jossa ilman suhteellisen kosteuden mittaustulos on laskenut alle 60 % RH:ta. Tarkistuksia ei välttämättä näy tunnin välein tallennetuissa mittaustuloksissa. Toisen kerran mittaukset on tarkistettu 12. toukokuuta.

Sisäilman olosuhteista ei ole mittauspistettä kuin 6. kerroksen päädyissä, joista toisessa lämpötila toukokuun lopulla 24.-31. päivä oli keskimäärin 31,1 °C. Tämä ei vastaa mittauspistettä ympäröiviä olosuhteita rakennemittauksen lämpötilan perusteella (n. 24 °C).

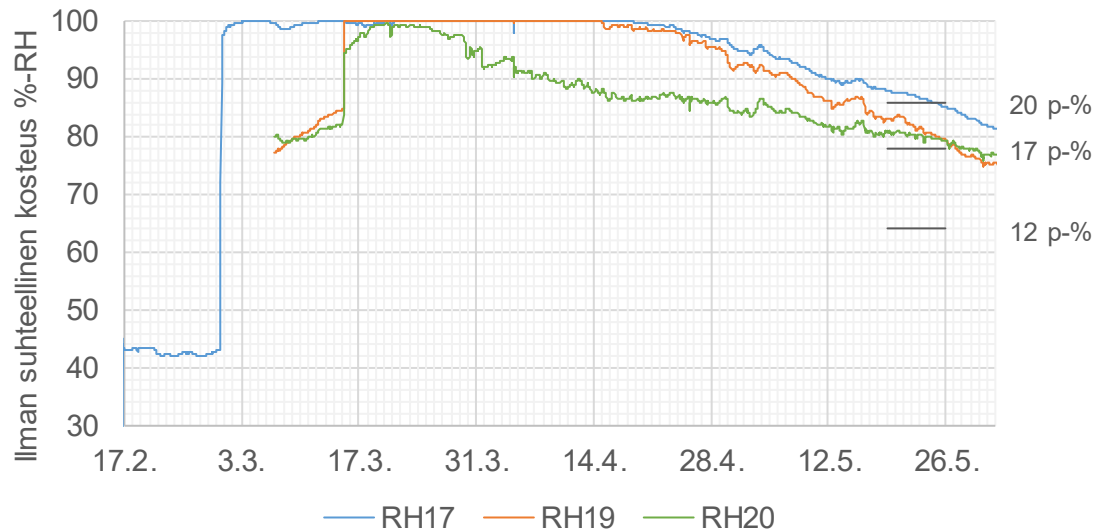
Oletetusti rakenteen todellinen lämpötila on ollut lähempänä rakennemittauksen lämpötilaa. Mittauspisteen 23 lopputilanteen arvoja ei ole laskettu johtuen suurista arvojen vaihteluista mittausaikana, mikä viittaisi tiivistyksen vuotamiseen. Mittauspisteen 23 vierestä otettiin näytepala, mikä oletetusti myös vaikuttaa kuivumiseen mitatuissa tuloksissa.

Taulukko 4.3. Välipohjan rakennemittausten yhteenveto, jossa on esitetty keskimääräisiä arvoja mittaustuloksista ja ulkoilman lämpötilasta sekä arvioitu tasapainokosteutta vastaava painoprosentti.

Mittauspiste		Alkutilanne				Lopputilanne			
Kuvaus	Numero	Rakenne			Sisä	Rakenne			Sisä
		% RH	°C	p-%	°C	% RH	°C	p-%	°C
Ajanjakso		17.3.-31.3.				24.5.-31.5.			
VP Rakenne 2.krs	15	75	10,5	16	10,3	83	20,6	18	19,0
VP Rakenne 2.krs	16	81	10,9	19	10,3	65	20,5	13	19,0
Ajanjakso		20.3.-26.3.				24.5.-31.5.			
VP Rakenne 6.krs	17	100	6,7	>30	-	84	24,2	20	-
VP Rakenne 6.krs	20	99	7,0	>30	-	78	24,5	17	-
Ajanjakso		14.3.-21.3.				24.5.-31.5.			
VP Rakenne 7.krs	21	64	3,1	14	-	78	24,8	17	-
VP Rakenne 7.krs	23	98	3,0	30	-	-	-	-	-

Toisen kerroksen välipohjamittauksesta 24 ei ole mittaustuloksia kuin hetkellisesti ja tulos oli 99 % RH:ta, joka viittaa noin 30 painoprosentin kosteuspitoisuuteen materiaalissa. Muiden toisen kerroksen mittauspisteiden alkutilanteen kosteuspitoisuus oli korkea. Väliseinän kohdalla mittauspisteen 15 kosteuspitoisuus kasvoi koko mittausajan 3,5 kuukautta arvioidusti 18 painoprosenttiin materiaalissa. Aukon kohdalla oleva mittauspiste 16 kuivui selkeästi rakennusaikana.

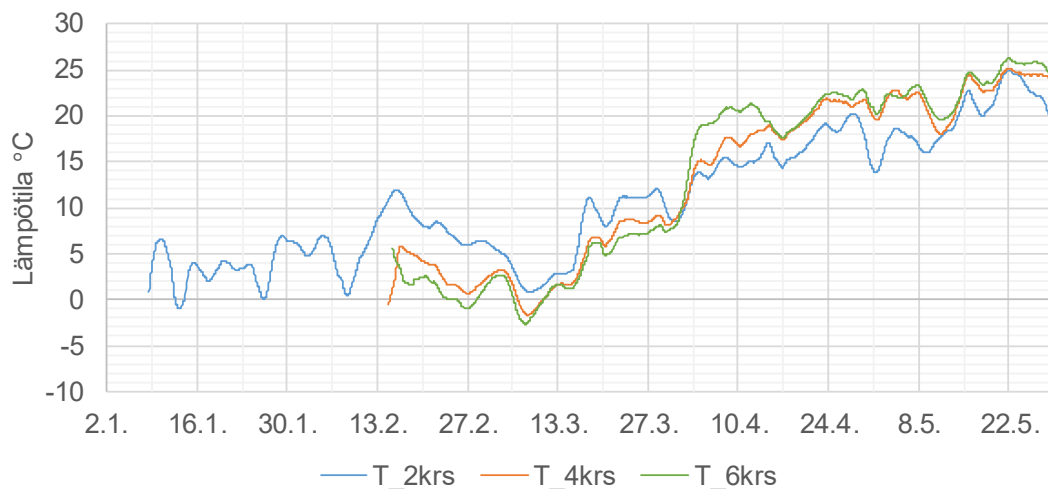
Välipohjan mittaustuloksissa kuudennessa kerroksessa voi havaita voimakkaan kastumisen ja hitaan kuivumisen (kuva 4.9). Kuvaajassa palkkivälin läpi toteutettu mittauspiste 19 kuivuu nopeammin kuin viereiset mittauspisteet. Mittausjakson alkuvaiheessa 1. maaliskuuta mittauspisteiden 16 ja 17 ilman suhteellinen kosteus nousi voimakkaasti todennäköisesti rakenneväliin valuneen veden sitoutuessa syiden suunnassa viilupuuhun. Kuudennessa kerroksen välipohjamittaukset mittasivat erittäin suuria kosteuspitoisuuksia ja yli kuuden viikon jälkeen viimeinenkin mittauspiste lähti tuloksissa kuivumaan. Toisen kuuden viikon jakson jälkeen toukokuun loppuun mennessä kuivuminen oli edennyt kaikissa pisteissä alle 20 painoprosentin tasoon. Yksi seitsemännen kerroksen välipohjan mittauksista oli toukokuun lopulla vielä kosteuspitoisuudeltaan korkea ja arviolta noin 17 painoprosentissa.



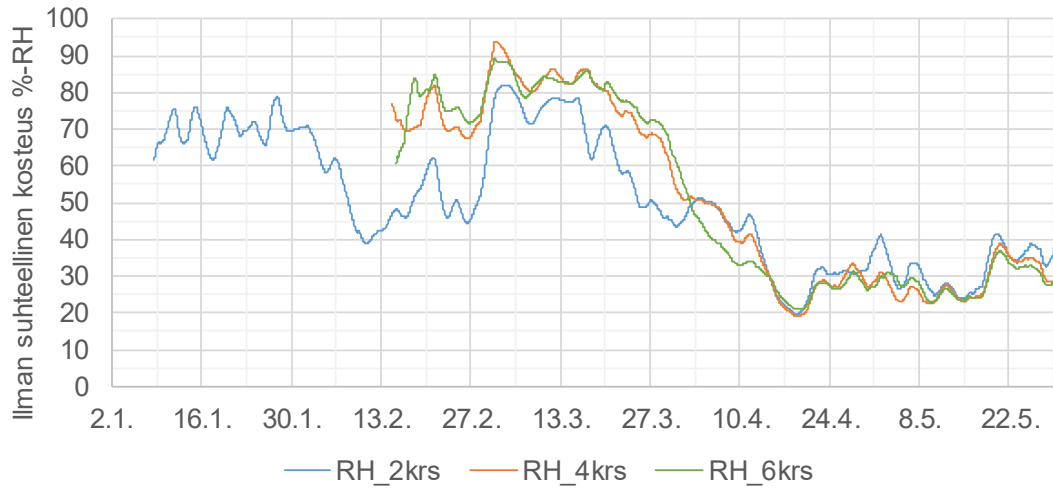
Kuva 4.9. Ilman suhteellisen kosteuden mittaustulos 6. kerroksen välipohjan rakennemittauksista ja ilman suhteellista kosteutta vastaavat painoprosentit 25 °C lämpötilassa ajankohtana 19.5.-26.5.

4.4 Mittaustulokset RF SensIT:in toteuttamista mittauksista

Lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden olosuhdemittauksia on selkeyden vuoksi esitetty vain osasta kerroksia liukuvana keskiarvona (kuva 4.10 ja kuva 4.11). Kuvaajien päivämäärät alkavat tammikuun ensimmäisestä maanantaista ja ne on esitetty kahden viikon välein. Toinen kerros on ollut ylempiä kerroksia lämpimämpi huhtikuun alkuun, jonka jälkeen lämpötila oli korkeimmillaan ylimmässä kerroksessa. Puurunkoisten kerrosten varsinainen lämmitys aloitettiin maaliskuun puolessa välissä. Erot ilman suhteellisessa kosteudessa ovat vastakkaisen suuntaisia kuin lämpötilassa, mikä viittäisi ilman absoluuttisen kosteuden olevan samanlainen eri mittauksissa.

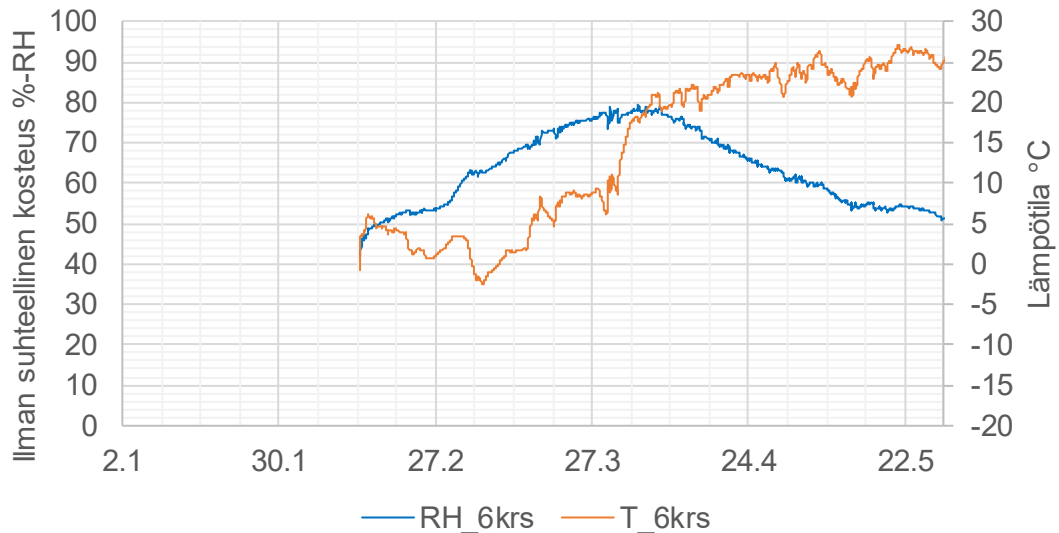


Kuva 4.10. Lämpötilan olosuhdemittauksen 48 tunnin liukuvat keskiarvot B-talon 2., 4. ja 6. kerroksesta.



Kuva 4.11. Ilman suhteellisen kosteuden olosuhdemittauksen 48 tunnin liukuvat keskiarvot B-talon 2., 4. ja 6. kerroksesta.

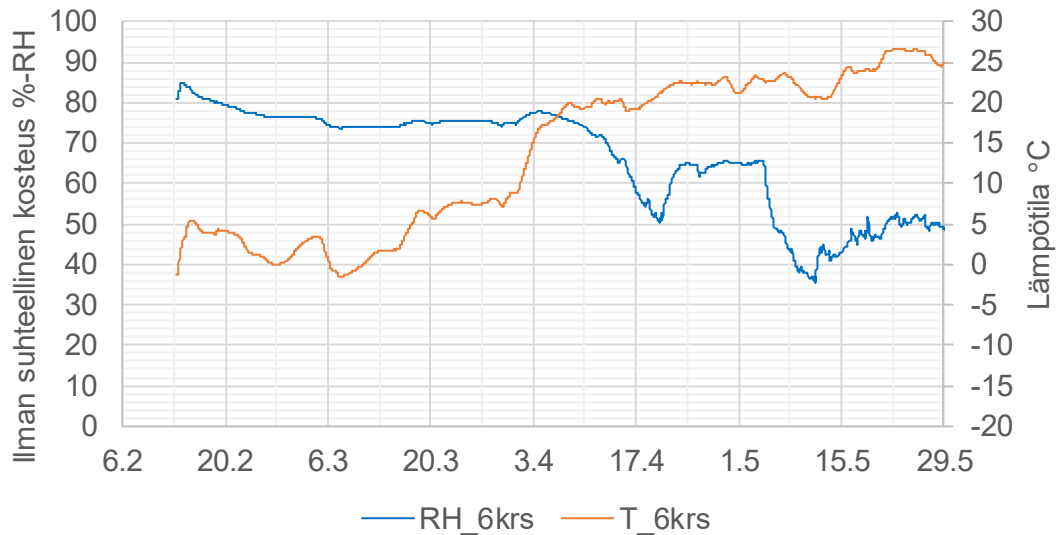
RF SensIT:in mittauksia asennettiin kylpyhuone-elementin alle syvennykseen ja mittausten aloituksen ajankohta ajoittuu kyseisen kerroksen asennusvaiheeseen. Mittaustuloksissa on joitakin katkoksia ja muutamia mittausantureita on jouduttu asentamaan uudelleen. Kuvassa 4.12 on esitetty viemäriäpiviennin alapuolelle tehdyn rakennemittauksen tulokset kuudennesta kerroksesta. Kuvaajan perusteella viilupuun kosteuspuiteisuus on kyseisessä kohdassa noussut asennuksesta huhtikuun alkuun asti, jonka jälkeen kuivuminen on alkanut. Mitattu ilman suhteellinen kosteus lähes 80 % RH vastaa kosteaa puumateriaalia, mutta on arvoltaan kosteusvaurion syntymisen raja-arvojen alapuolella. Kuivuminen alkaa olosuhdemittauksen mukaan ilman suhteellisen kosteuden laskiessa 50 prosenttiin, mikä on havaittavissa useamman kerroksen mittaustuloksessa. Poikkeavasti alimman kerroksen mittauksessa kuivuminen on alkanut jo asennusvaiheen jälkeen.



Kuva 4.12. Lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden mittaustulokset rakennemittauksesta viemäriäpiviennin alapuolelta 6. kerroksesta.

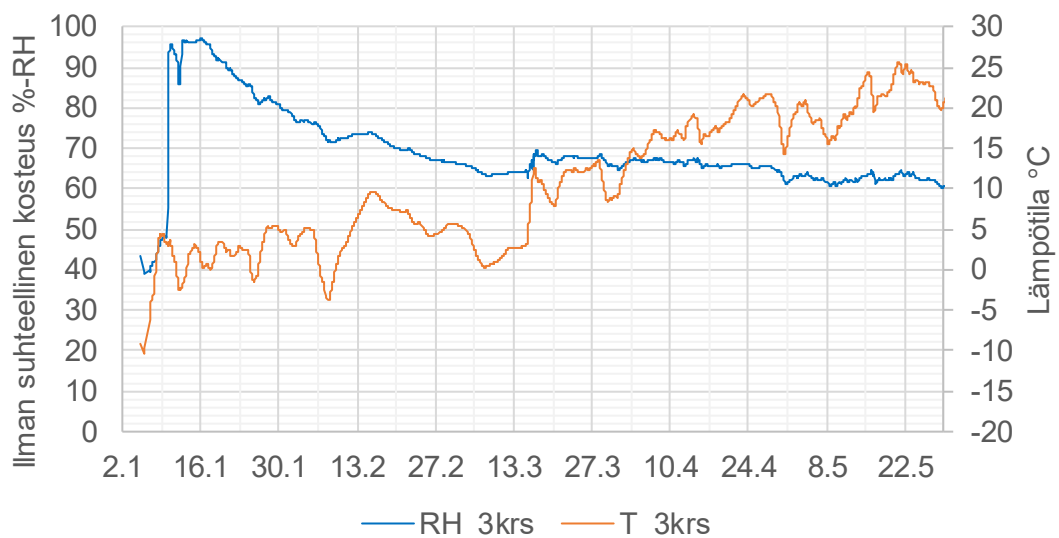
Kaikki kyseiset rakennemittaukset on toteutettu holville, joka on asennusaikana sääälle alttiina ja kastuminen asennusaikana on todennäköistä. Holvilla tarkoitetaan rakenteilla olevaa välipohjaa. Holville tehdyissä mittauspisteissä on tuloksissa usein mitattu hetkelisesti korkea ilman suhteellinen kosteus alkuvaiheessa, joka lähtee laskemaan asennuksen jälkeen (kuva 4.13). Alimman kerroksen mittauksessa korkea suhteellinen kosteus lähti laskemaan vasta kolmen viikon jälkeen mittauksen aloittamisesta, joka oletetusti ajoittuu lähelle välipohjaelementtien asentamista. Kuvassa 4.13 on myös havaittavissa huhtikuun alusta alkava selkeä kuivumisvaihe. Ilman suhteellisen kosteuden nousulle kyseisessä mittauksessa huhtikuussa ei ole selkeää syytä, koska vesikatto on asennettu eikä kastumista pitäisi tapahtua. Elementtivälissä tehty mittaus ei kuitenkaan ole selkeästi rakennemittaus, koska sisäilma voi kuivumisvaiheessa rakenteiden hieman kutistuessa päästä kulkeutumaan mittauspisteeseen.

Kuvasta 4.13 voi havaita huhtikuun alussa ison lämpötilamuutoksen vaikutuksen ilman suhteelliseen kosteuteen. Muiden kerrosten kuvaajissa on voimakkaammin näkyvissä kyseinen ilmiö, jossa ilman suhteellinen kosteus rakennemittauksessa hieman nousee lämpötilan muuttuessa voimakkaasti. Ilmiö oletetusti liittyy tasapainokosteuden riippuvuuteen lämpötilasta.



Kuva 4.13. Lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden mittaustulokset rakennemittauksesta välipohjaelementtien välistä 6. kerroksesta.

Välipohjaelementtien syvennyksien rakennemittauksissa asennusajankohdan kosteuspitoisuus ja sen jälkeinen jatkuva kuivuminen rakennusaikana näkyy mittauksista selkeimmin (kuva 4.14). Vastaavissa rakennemittauksissa ylemmissä kerroksissa on myös mittauksia, joissa ei havaita kastumista suhteellisen kosteuden noustessa asennuksen jälkeen vain hieman tai ei käytännössä yhtään. RF SensIT:in mittauksissa ei havaittu yhtä suuria kosteuspitoisuuksia kuivatusvaiheessa välipohjarakenteissa kuin muissa mittauksissa. Vesikattoelementtien lämmöneristetilaan toteutetuissa mittauksissa olosuhteet olivat odotetusti kuivat mittauksen alusta alkaen. Tilaelementtinä asennetun IV-konehuoneen alapuolisessa ilmatilassa olosuhteet kuivuivat asennusvaiheen jälkeen.



Kuva 4.14. Lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden mittaustulokset rakennemittauksesta välipohjaelementin syvennyksestä 3. kerroksesta.

4.5 Näytepalat

Työmaan laadunhallintaan kuuluvat erikseen tilatut näytepalamittaukset Sweco Asiantuntijapalvelut Oy:lta toteutettiin uunikuivausmenetelmällä (kuivatus-punnitusmenetelmä) kuivaamalla näytepalat noin 103 °C lämpötilassa. Näytepalat porattiin halkaisijaltaan 30 millimetrin tulppaporalla. Porraskäytävissä tehtiin kuivatuksen lähtötasomittaukset 15. maaliskuuta ja näytepaloja otettiin yhteensä 14 kappaletta. Näytepalamittausten raportin kuvien perusteella näytepalat otettiin selkeästi pinnaltaan kastuneista kohdista. Näkyvästi kastuneiden seinä- ja välipohjapintojen kosteuspitoisuus ylitti 14 näytepalassa päällystyksen raja-arvon 17 painoprosenttia. Välipohjaelementin päätypalkista asunnon oven kynnyksen kohdalla määritettiin kosteuspitoisuudeksi jopa 50 painoprosenttia 40 millin syvyydeltä (kuva 4.15). Epoksikäsittelyn alta alimmassa kerroksessa mitattiin kantavassa väliseinässä 20 painoprosenttia 40 millin syvyydellä. Kosteuden alkuperästä epoksikäsittelyn alla ei ole tietoa, koska kosteuden ei pitäisi siirtyä betonista epoksikäsittelyn läpi. Epoksikäsiteltyä ja kynnyksen kohtaa lukuun ottamatta mitauskohtien kosteuspitoisuus yli sentin syvyydellä oli 10-15 painoprosenttia. Koepala 5 on otettu diplomityössä toteutettujen toisen kerroksen välipohjamittausten yläpuolelta (kuva 4.15).

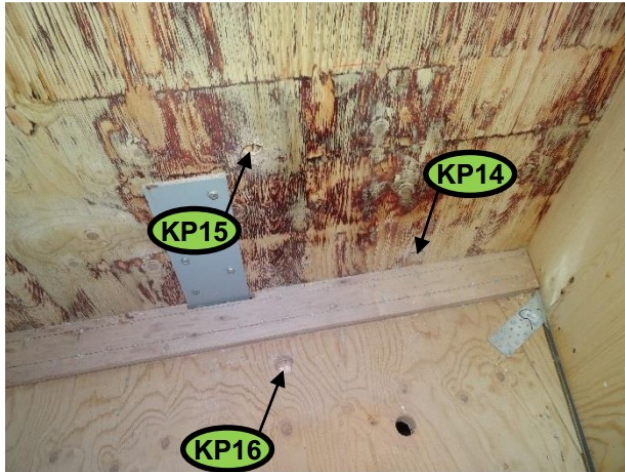


Kuva 4.15. Näytepalamittauksia 3. kerroksen väliseinästä (vas.) ja välipohjaelementin päätypalkista 5. kerroksessa päätyasunnon kynnyksen kohdalta. (Sweco Asiantuntijapalvelut Oy, 15.3.2017)

Huhtikuun puolen välin jälkeen näytepaloja otettiin yhteensä 21 kappaletta, joista 8 kappaletta porraskäytävän välipohjasta. Noin puolesta näytepaloja mitattiin porraskäytävän välipohjasta korkeita kosteuspitoisuuksia. Syvyydeltä 20-30 millimetriä kosteuspitoisuudeksi määritettiin 22,7-34,7 painoprosenttia. Läheltä ulkoseinälinjoja otettiin myös näytepaloja koivuvanerista, joka on osana kantavaa seinää. Koivuvanerin alareunan kosteuspitoisuus ylitti kaikissa näytepaloissa 17 painoprosentin rajan ja oli keskimäärin 20 painoprosenttia.

Huhtikuun lopulla näytepalamittauksia otettiin pääasiassa 5.-8. kerroksen välipohjista yhteensä 21 kappaletta. Tulokset jäivät selkeästi 17 painoprosentin rajan alapuolelle. Osassa mittauksia porraskäytävän paksusta välipohjalevystä määritettiin 20-30 millimetrin syvyydeltä kosteuspitoisuudeksi 14-16 painoprosenttia. Pintojen ja muiden mitauskohtien

kosteuspitoisuus oli välillä 9,2-14 painoprosenttia. Lähellä sivuseinien ulkoseinälinjaa viistosade pääsi kastelemaan välipohjaa kerroksen asennusvaiheessa ja ennen suojausten asentamista. Koepalat 14 ja 15 otettiin läheltä ulkoseinälinjaa kantavasta väliseinästä ja 20-30 millimetrin syvyydeltä. Niiden kosteuspitoisuudeksi määritettiin 12,3-12,5 painoprosenttia (kuva 4.16). Välipohjaelementin kansilevy (koepala 16) on vain 38 millimetriä paksu ja suurin kosteuspitoisuus 14,1 painoprosenttia määritettiin syvyydeltä 10-20 millimetriä. Näytepalojen mittausraporteista ainakaan yksi ei ole ollut saatavilla.



Kuva 4.16. Näytepalamittauksia itäpuolen ulkoseinälinjan vierestä B-talon 5.kerroksesta. (Sweco Asiantuntijapalvelut Oy, 25.4.2017)

5. TULOSTEN ARVIOINTI

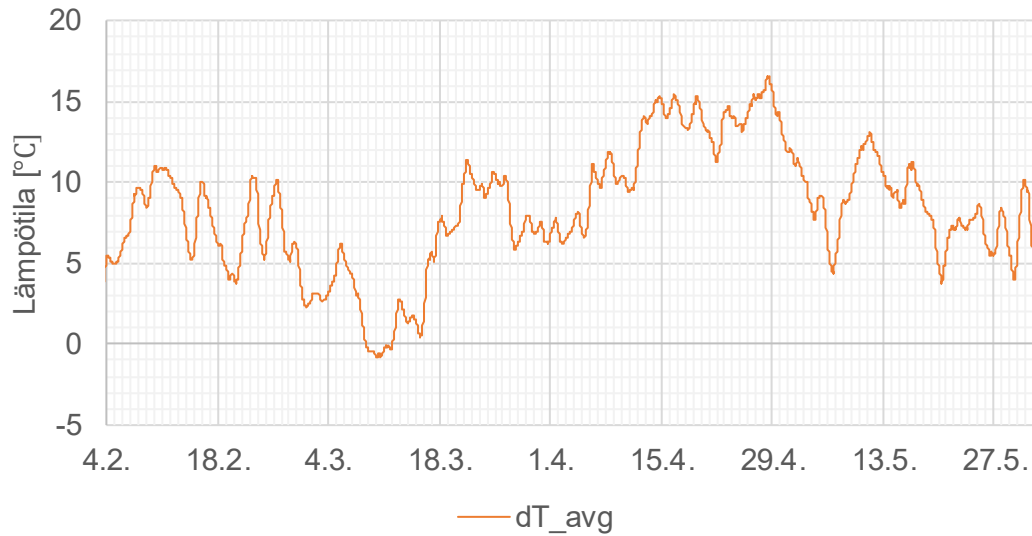
Tulosten arvioinnissa on tarkasteltu mittaustulosten luotettavuutta, poikkeavia lämpötila- ja kosteusolosuhteita, paikallisilmastoa ja homeen kasvun riskiä. Mittaustulosten luotettavuutta tarkastellaan porattujen näytepalojen avulla. Poikkeavia olosuhteita mittauksissa tarkastellaan eri olosuhdemittausten tuloksia vertaamalla ja sisäilman kosteuslisän avulla. Säähavaintoja verrataan tietoihin paikallisilmaston keskimääräisestä lämpötilasta, ilman suhteellisesta kosteudesta ja sademäärästä. Homeen kasvun riskiä arvioidaan Suomalaisella homemallilla ulkoilman olosuhteissa. Mittausdataa on myös muokattu lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden osalta, jotta voidaan arvioida niiden suuruuden vaikutusta mallin mukaiseen homeen kasvun riskiin.

5.1 Mittaustulosten luotettavuus

Tutkimuksessa ei toteutettu vierekkäisiä vertailumittauksia, joista olisi voitu tarkastella menetelmän toteutukseen liittyviä epätarkkuuksia. Oletetusti vierekkäisten mittausten tulokset olisivat yhtä suuria mittalaitteen virheen salliman tarkkuuden rajoissa. Viilupuun porareikämittauksen toteutuksesta ei ole löytynyt lähteitä, joista voitaisiin arvioida eri tekijöiden aiheuttamaa epätarkkuutta. Kahden porareian vierestä otetusta näytepalasta määritettiin porareikämittaukseen verrattava kosteuspiitoisuus. Mittauksen epävarmuuslähteet voidaan jaotella mittalaitteeseen, mittalaitteen kalibrointiin ja mittauksen toteutukseen (Merikallio 2009). Mittalaitteiden valmistajan Rotronic AG:n ilmoittama ilman suhteellisen kosteuden mittaustarkkuus $\pm 0,8$ % RH on annettu lämpötila-alueelle 10-20 °C. Virheen suuruus tavanomaisesti kasvaa kauempana lämpötila-alueesta. Mittalaitteiden kosteusanturin kalibrointi tehtiin huonelämpötilassa. Tutkimuksessa alle nollan asteen lämpötilassa tehtyihin ilman vesihöyrypitoisuuden mittauksiin liittyy epävarmuustekijöitä mittalaitteen, kalibroinnin sekä materiaalin kosteuskäyttäytymisen osalta.

Maaliskuun puolen välin jälkeen sisätilojen lämmitys lisäsi loppuvaiheen tuloksissa lämpötilaeroa sisä- ja ulkoilman välille (kuva 5.1). Huhtikuun alussa rakennuksen päätyhuoneistojen lämmitystä tehostettiin, mikä lisäsi lämpötilaeroa. Maaliskuun puolen välin jälkeen sisä- ja ulkoilman välinen lämpötilaero oli lähes jatkuvasti 5-15 °C. Lämpötilaeron nousu sisä- ja ulkoilman välillä todennäköisesti vaikutti ulkoseinien mittauspisteiden tuloksiin. Lämpötilaerot voivat aiheuttaa virheen lämpötilan mittauksessa sekä lisätä kosteuden siirtymistä rakenteessa. Mahdollista virhettä lämpötilan mittaukseen porareikässä aiheuttaa esimerkiksi anturin johtoa pitkin johtuva lämpö. Ulkoseinien mittausta ei toteutukseltaan suunniteltu kuivatusvaiheeseen, jossa on suuria lämpötilaeroja. Luotettavampaan tulokseen mahdollisesti päästäisiin toteuttamalla mittauspiste kohtisuoraan lämpövirtaan nähden tai mittauspisteen lämmöneristyksellä. Lämmöneristeen käytössä pitäisi

ottaa huomioon sen vaikutus rakenteen kosteuskäyttäytymiseen erityisesti kuivumista tarkasteltaessa.



Kuva 5.1. Ulko- ja sisäilman välisen lämpötilaeron ($dT_{avg} = T_{sisä} - T_{ulko}$) liukuva 24 tunnin keskiarvo olosuhdemittauksesta 5 ja säähavaintojen tiedoista laskettuna.

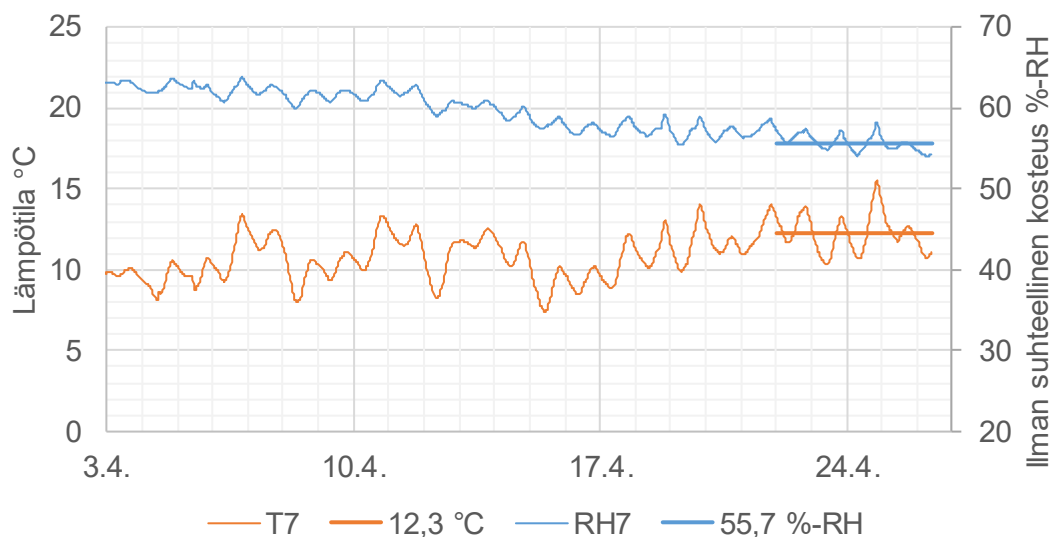
Mittalaitteen kapasitiivisen kosteusanturin lukemia korjataan lämpötilan mukaan, koska vesimolekyylin dielektrinen vakio muuttuu huonelämpötilan ja nollan asteen välillä noin kahdeksan prosenttia. Kosteusanturin hygroskooppiseen muovi- tai polymeeripohjaiseen materiaaliin lämpötilan vaikutus on yleensä rajallisempi (Rotronic AG 2017). Vaikka porareian ilmalla ja ympäröivällä materiaalilla olisi erilainen lämpötila, ilman suhteellinen kosteus pyrkii ympäröivän materiaalin mukaiseen tasapainokosteuteen. Vastaavasti mittausanturin hygroskooppinen materiaali pyrkii tasapainokosteuteen ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden kanssa.

Lämpötilan vaikutus materiaalin tasapainokosteuteen ja kapasitiivisen anturin mittaamaan kosteuspitoisuuteen on suhteellisen vähäinen. Laskennallisesti merkittävä virhe aiheutuu muunnoksista ilman vesihöyrypitoisuuden ja suhteellisen kosteuden välillä lämpötilan ollessa virheellinen, mutta mittalaite ei tee kyseistä muunnosta. Kun ilman suhteellinen kosteus lasketaan vesihöyrypitoisuuden avulla, on muutaman asteen vaikutus lämpötilassa merkittävä ja virheen suuruus voi olla jopa 10-20 % RH ilman suhteellista kosteutta.

Porareikämittausten tulosten luotettavuutta arvioitiin näytepaloilla, jotka otettiin mittauspisteen vierestä. Näytepalan punnitseminen tehtiin lähtö- ja lopputilanteessa samassa astiassa, jotta näytteestä ei häviä palasia punnitusten välillä. Kuvassa 5.2 on esitetty näytepalan vieressä sijainneen neljännen kerroksen ulkoseinän rakennemittauksen tulokset ja keskiarvot viiden päivän ajalta ennen näytepalan ottamista. Rakennemittauksen vierestä otetun näytepalan kosteuspitoisuus on kuivattamalla ja punnitsemalla määritetty keski-

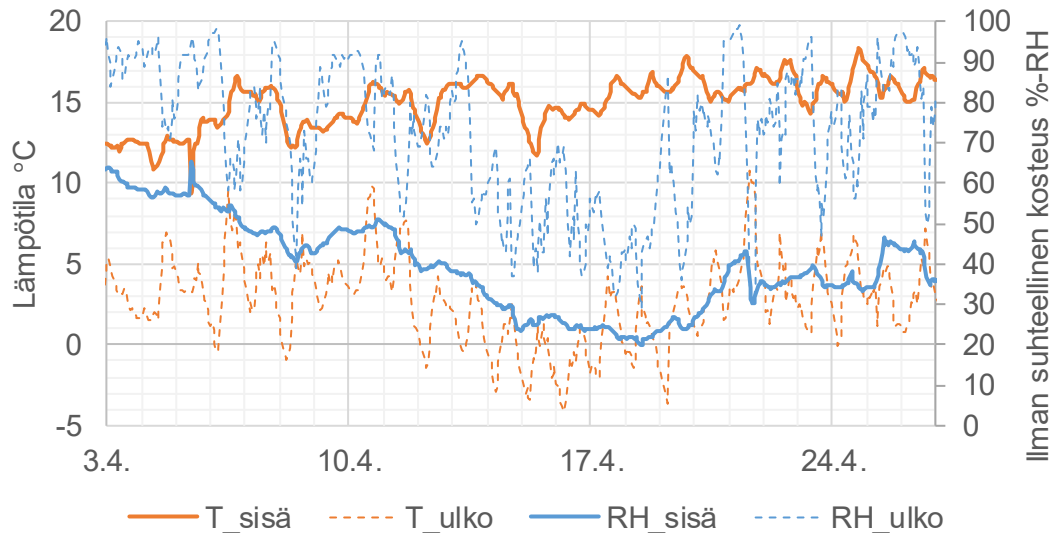
osastaan eli anturin asennusputken syvyydeltä noin 11 painoprosenttiin (Liite A). Huonelämpötilassa (20 °C) puutavaran kosteuspitoisuutta 11 painoprosenttia vastaa tasapainotilanteessa arviolta ilman suhteellinen kosteus 57 % RH ja 10 °C viileämmässä arviolta 54 % RH (RT 21-10978 2009).

Ohjekortin arvot ovat keskimääräisiä eivätkä ota huomioon hystereesin vaikutusta. Adsorptio- ja desorptiokäyrien käyttö eli materiaalin kastumis- tai kuivumistilanteen määrittämiseen liittyy merkittävä epävarmuus. Huonelämpötilassa hystereesin suuruus on noin 2 painoprosenttia kyseisellä kosteusalueella (kuva 2.4). Kuivumisvaiheessa tarkastellaan desorptiokäyrää. Huonelämpötilassa alueella 40-60 % RH desorptiokäyrää vastaava ilman suhteellinen kosteus on arviolta 5 % RH pienempi kuin keskimääräinen arvo. Myös hystereesin suuruus riippuu lämpötilasta. Hystereesin vaikutus otettaessa huomioon uunikuivausmenetelmällä määritettyä kosteuspitoisuutta vastaisi tällöin noin 49 % RH (= 54 % RH – 5 % RH) ja porareistä mitattiin viiden päivän keskiarvona 56 % RH. Näytepalojen kosteuspitoisuus voi olla yleisesti alhaisempi, jos porauksessa osa kosteudesta pääsee kuivumaan. Kyseinen ilmiö voitaisiin havaita suuremmasta määrästä näytepaloja.



Kuva 5.2. Ulkoseinän rakennemittauksen 7 mittaustulokset sekä viiden päivän keskiarvot lämpötilalle ja ilman suhteelliselle kosteudelle ennen näytepalan ottamista.

Ulkoseinän rakennemittauksessa vaikuttivat näytepalaa otettaessa lämpötilaerot ulko- ja sisätilan välillä (kuva 5.3) eikä mittausta ole toteutettu parhaissa mahdollisissa olosuhteissa mittaustarkkuuden kannalta. Ulko- ja sisäilman lämpötilan keskimääräinen ero viiden päivän ajanjaksolla ennen näytepalan ottamista oli 11,1 °C. Massiivipuu on lämpöä eristävä materiaali ja seinään muodostuu lämpötilagradientti ulko- ja sisäpinnan välille.



Kuva 5.3. Lämpötila- ja ilman suhteellinen kosteus mittauspisteen vieressä sisätilassa (mittauspiste 11) huhtikuussa sekä ulkoilmassa (Ilmatieteen laitoksen avoin data).

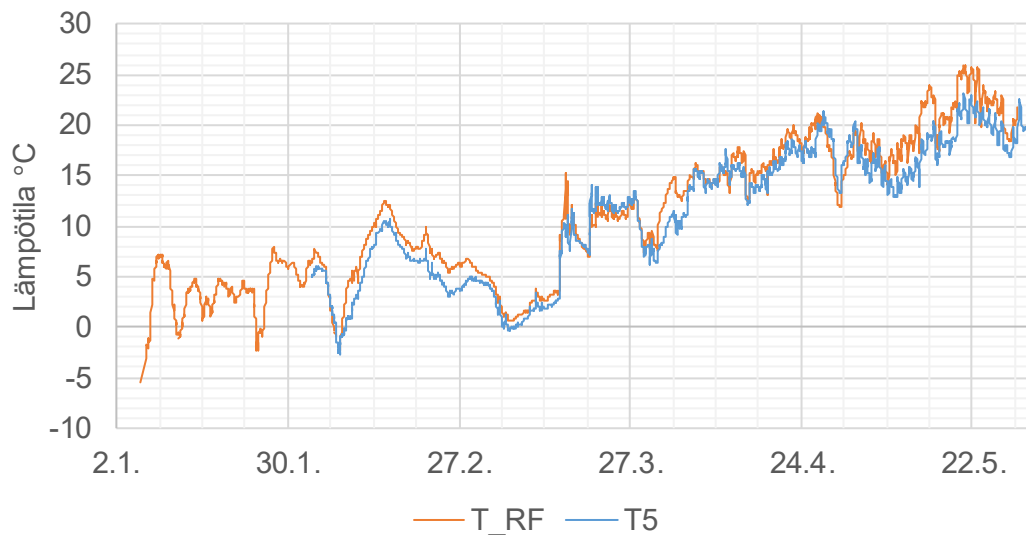
Seitsemännen kerroksen välipohjan porareikämittauksen 23 ilman suhteellisen kosteuden viiden päivän keskiarvo oli 75 % RH:ta (keskihajonta 3 %) ja näytepalan punnituksen tulos noin 14 painoprosenttia kyseisessä kohdassa. Porareikämittauksen keskilämpötila oli 22 °C (keskihajonta 0,5 °C). Näytepalan painoprosenttia vastaava tasapainokosteus kyseisessä lämpötilassa on arviolta 72 % RH ilman suhteellista kosteutta (RT 21-10978 2009). Tarkasteltaessa desorptiokäyrää kuuselle tasapainokosteutta vastaava ilman suhteellinen kosteus olisi 60 % RH (Hedlin 1967). Mittauspisteen tuloksessa on suurta vaihtelua eikä selkeää kuivumistilannetta, joten desorptiokäyrän tarkastelu ei välttämättä anna oikeaa tulosta. Hedlinin (1967) esittämät kuusen keskimääräistä tasapainokosteutta vastaavat ilman suhteelliset kosteuden ovat muita lähteitä alhaisempia kyseisellä kosteusalueella (kuva 2.4).

Osassa toteutettuja mittauksia on ollut mahdollinen kondenssiriski porareikässä, koska mitatut arvot ovat viikkoja olleet lähellä ilman vesihöyryn kyllästyspitoisuutta ja samanaikaisesti on tapahtunut yli 5 °C aleneminen lämpötilassa. Puun lämpökapasiteetti hidastaa porareikässä tapahtuvia lämpötilan muutoksia. On myös mahdollista, että puupinta porareikässä sitoo irrallisen ilmasta kondensoituvan kosteuden. Vesihöyrypitoisuus porareikässä on rajallinen. Näistä ilmiöistä johtuen ei ole selkeää, että kondensoituminen tapahtuisi riittävällä nopeudella, jotta mittauksiin aiheutuisi merkittävä vaikutus. Ilmiö olisi voimakkaampi nopeasti jäädytettävässä vesihöyrytiiviässä astiassa, mutta tässä tapauksessa mittauksen toteutus eroaa tilanteesta. Esimerkiksi rakennemittauksessa 22 °C lämpötilan hetkellisen muutosnopeuden maksimi ja minimi olivat +0,4 ja -0,3 °C/h. Suurin lämpötilan muutos 24 tunnin jakson aikana tapahtui keskimäärin nopeudella +0,26 °C/h, mikä vastasi 6,2 °C lämpötilamuutosta vuorokauden aikana 1. huhtikuuta (Liite C: kuva

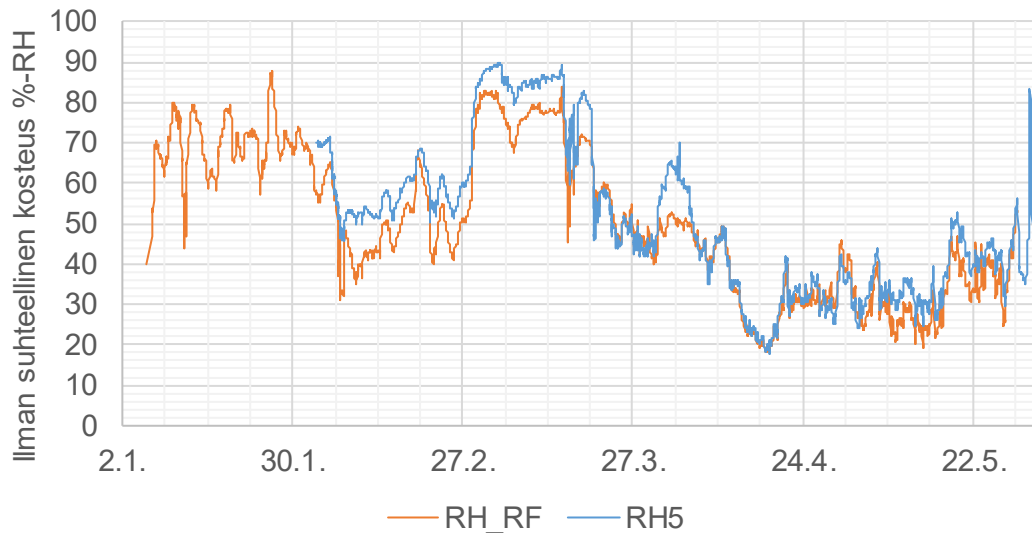
23). Merkittävimmät lämpötilamuutokset tapahtuivat työmaalla mittapisteissä, joihin auringo pääsi väliaikaisesti paistamaan. Auringonpaiste näkyy selkeästi mittaustuloksissa lämpötilapiikkinä päivisin.

5.2 Lämpötila- ja kosteusolosuhteet pinnan lähellä

Toisessa kerroksessa RF SensIT:in liimapuupilarin kylkeen asentamasta olosuhdemittauksesta kahden metrin päässä oli toinen olosuhteiden mittauspiste ripustettu katosta huonetilan ilmaan. Lähellä pintaa oleva mittauspiste antaa tuloksena olosuhteet ilman ja materiaalipinnan olosuhteiden väliltä. Olosuhdemittausten tulokset on esitetty kuvissa 5.4 ja 5.5. Ennen varsinaista lämmitysvaihetta maaliskuun puolivälissä pinnan lämpötila on ollut usein 1-2 °C ilman lämpötilaa korkeampi. Lämpötilamittauksen virhe on tyypillisesti suuruudeltaan $\pm 0,1-0,3$ °C. Osaltaan lämpötilaeroa voi aiheuttaa korkeusero, koska pintamittaus on ollut noin 30 senttimetriä korkeammalla.

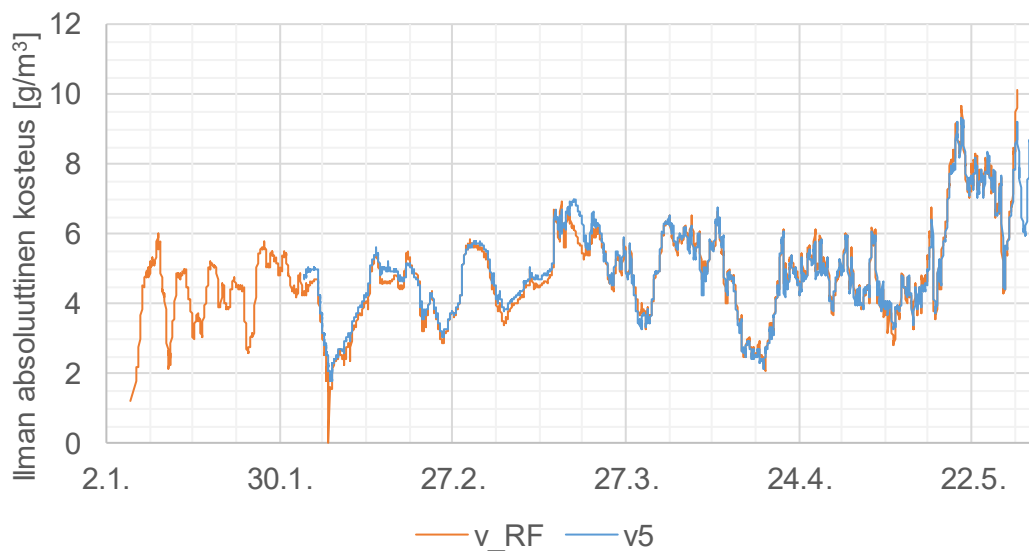


Kuva 5.4. Lämpötilan mittaustulokset olosuhdemittauksista läheltä toisiaan pinnan vierestä (T_{RF}) ja etäällä pinnoista ($T5$) 2. kerroksesta B-talosta.



Kuva 5.5. Ilman suhteellisen kosteuden mittaustulokset olosuhdemittauksista läheltä toisiaan pinnan vierestä (RH_RF) ja etäällä pinnoista ($RH5$) 2. kerroksesta B-talosta.

Erot ilman suhteellisessa kosteudessa vastaavat pääasiassa lämpötilaeroa, mikä näkyy ilman vesihöyrypitoisuudesta kuvasta 5.6. Kyseisessä kohdassa rakennusta ilman olosuhteet ovat olleet pintaolosuhteita kriittisemät kosteusolosuhteiden kannalta. Homeenkasvun riskiä tarkastellaan pinnan olosuhteista. Tässä tapauksessa korkeampi lämpötila rakenteessa on ollut edullista ja laskenut ilman suhteellista kosteutta lähellä pintaa.

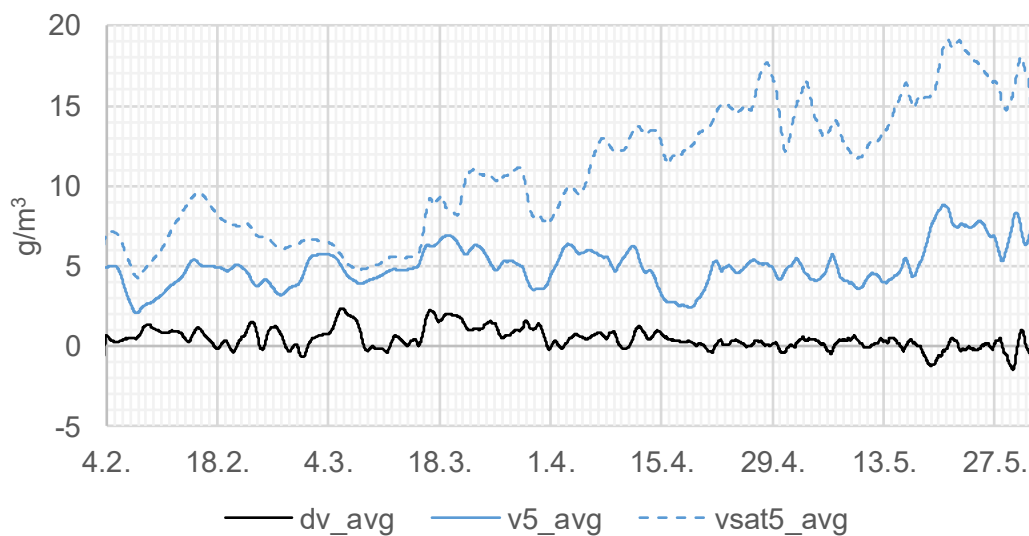


Kuva 5.6. Ilman vesihöyrypitoisuudesta lasketut arvot olosuhdemittauksista läheltä toisiaan pinnan vierestä (v_RF) ja etäällä pinnoista ($v5$) 2. kerroksesta B-talosta.

5.3 Kosteuslisän arviointi

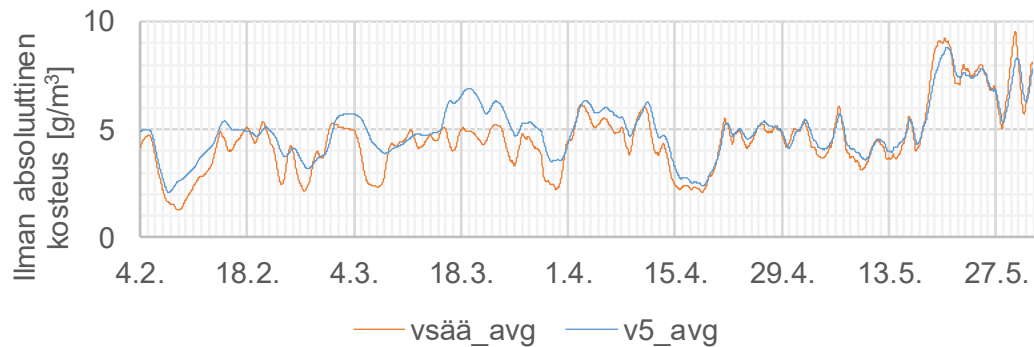
Kosteuslisällä tarkoitetaan sisä- ja ulkoilman vesihöyrypitoisuuksien välistä eroa, jossa sisäilman vesihöyrypitoisuus on tavanomaisesti korkeampi. Käytönaikana rakennuksessa

kosteuslisä aiheutuu ihmisistä sekä veden käytöstä ja se pyritään poistamaan hallitusti ilmanvaihdon kautta. Rakennusaikana ja sen jälkeen rakennuskosteus materiaaleista aiheuttaa kosteuslisää sisäilmassa. Lähtöoletuksena oli kuivumisen sekä lattiavalutöiden näkyminen kosteuslisänä olosuhdemittauksissa. Kuvassa 5.7 on esitetty vuorokauden liukuvana keskiarvona ulko- ja sisäilman välisen vesihöyrypitoisuuden ero. Lisäksi on esitetty laskennassa käytetyn olosuhdemittauksen vesihöyrypitoisuus ja lämpötilan mukainen vesihöyryn kyllästyspitoisuus. Ilman suhteellisella kosteudella tarkoitetaan ilman vesihöyrypitoisuuden osuutta vesihöyryn kyllästyspitoisuudesta. Ennen lämmitysvaihetta on reilun viikon ajanjakso, jossa ilman vesihöyryn kyllästyspitoisuus on lähellä ilman vesihöyrypitoisuutta, mikä tarkoittaa myös korkeaa ilman suhteellista kosteutta. Ilman suhteellinen kosteus kuvaa myös ilmassa olevaa kosteuskapasiteettia.



Kuva 5.7. Ulko- ja sisäilman välisen vesihöyrypitoisuuden ero ($dv_avg = v_{sisä} - v_{ulko}$) 24 tunnin liukuvana keskiarvona olosuhdemittauksesta 5 ja säähavaintojen tiedoista lasketuna sekä olosuhdemittauksen 5 ilman vesihöyrypitoisuus ($v5_avg$) ja vesihöyryn kyllästyspitoisuus ($vsat5_avg$).

Puukerrosten varsinaisen lämmityksen aloittamisen jälkeen maaliskuun puolivälistä huhtikuun puoliväliin kosteuslisän suuruus sisäilmassa on toisessa kerroksessa ollut pääasiassa 0-3 g/m³ ja kyseisen jakson jälkeen pääasiassa alle yhden gramman kuutiossa. Pintakosteus kuivuu materiaalista nopeammin kuin kosteus siirtyy materiaalin sisäosista pintaan, mikä usein selittää nopeaa kuivumista alkuvaiheessa. Negatiivinen kosteuslisä tarkoittaa, että ulkoilman vesihöyrypitoisuus on suurempi kuin sisäilman. Ulkoilman vesihöyrypitoisuus oli korkeimmillaan toukokuun lopulla (kuva 5.8).



Kuva 5.8. Ulkoilman ja mittauspisteen 5 vesihöyrypitoisuus vuorokauden liukuvana keskiarvona.

5.4 Säähavaintojen arviointi

Uudenmaan ja Varsinais-Suomen rannikko on Suomen lämpimintä aluetta ilmaston viilessä pohjoiseen päin. Sademäärä ei ole yhtä selkeästi jakaantunut kuin lämpötila, mutta Turun ja Helsingin välinen alue on ilmastollisesti Suomen sateisimpia alueita. (Ilmatieteen laitos 2012) Jos lämpötila yhdistettynä sademäärään oletetaan homeenkasvun kannalta kriittiseksi, kyseinen alue olisi Suomen ilmastossa suotuisin homeen kasvulle ulkoilmassa. Vuodenajoista kriittisimmäksi on yleisesti arvioitu lämmin ja sateinen syksy. Lisäksi tulevaisuudessa seuraavien vuosikymmenten aikana sääolosuhteet ovat muuttumassa lämpimämmiksi ja sateisemmiksi (Vinha et al. 2013).

Ilmatieteenlaitos hyödyntää ilmaston tarkastelussa 30 vuoden jakson tilastoa, joka kuvaa paikallista ilmastoa paremmin kuin yksittäisen vuoden säähavainnot. Ilmatieteenlaitoksen mukaan 30 vuoden jaksoa voidaan pitää riittävän pitkänä, jotta yksittäinen vuosi ei vaikuta merkittävästi keskiarvoon. Lisäksi jakson aikana ilmasto ei vielä ehdi muuttua merkittävästi. Nykyinen 30 vuoden vertailujakso vuosilta 1981-2010 otettiin käyttöön vuonna 2012. Kansainvälisesti käytössä on myös Maailman ilmatieteen järjestön (WMO) virallinen vertailukausi vuosilta 1961-1990. (Ilmatieteen laitos 2017a) Vertailukauden tilastoja säästä eri paikkakunnille on esitetty vapaasti saatavilla olevassa Ilmatieteen laitoksen julkaisussa ”Tilastoja Suomen ilmastosta 1981-2010”.

Kevään säätä ei voida ennustaa esimerkiksi syksyllä useita kuukausia etukäteen, mikä voisi olla hyödyllistä rakentamisen toteutuksen näkökulmasta. Rakentamisen toteutus tulee siis suunnitella paikallisen ilmaston perusteella. Rakentamisen toteutuksessa on määritettävä riskiarvio kosteuden aiheuttamille vahingoille ja mitoitettava sääsuojauksen taso riskiarvion mukaiseksi. Keskimääräistä ilmastoa tarkasteltaessa riskiarviossa on otettava huomioon toteutuva sää tietyissä rajoissa, joita keskimääräiset arvot eivät kuvaa. Valmiiden rakenteiden toimintaa ja rakennuksen rakentamista tulee tarkastella eri olosuhteissa,

koska eri tekijät aiheuttavat kriittiset olosuhteet. Esimerkiksi sademäärän vaikutus on valmiille rakenteille vähäisempi kuin työmaalla. Valmiiden rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa voidaan tarkastella rakennusfysikaalisilla testivuosilla, jotka antavat mitoituksen mitoittavat olosuhteet.

Joulu-maaliskuun keskilämpötilat ovat olleet keskimäärin 2,3 °C lämpimämmät kuin vertailukaudella (taulukko 5.1). Taulukossa on esitetty myös viime talven kuukausittaisen keskiarvojen poikkeama vertailukaudesta. Huhtikuu ja toukokuu ovat olleet keskimääräistä hieman viileämpiä. Keskiarvojen poikkeama ilman suhteellisen kosteuden osalta on pieni verrattuna lämpötilan poikkeamaan. Ilman suhteellisen kosteuden kuukausikeskiarvot vaihtelevat 1-2 prosenttiyksikköä. Lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden välillä poikkeamissa keskiarvosta ei vaikuta olevan yhteyttä. Lämmin talvi on kriittisempi erilaisten kosteusvaurioiden kannalta.

Taulukko 5.1. *Helsingin Kaisaniemen kuukausittaiset keskilämpötilat rakennusajalta ja ilmaston 30 vuoden vertailukaudelta (Ilmatieteen laitos 2012, Ilmatieteen laitoksen avoin data).*

Kuukausi	Vertailukausi [°C]	Talvi 2016-17 [°C]	Poikkeama [°C]
Joulu	-2,0	0,2	+2,2
Tammi	-3,9	-1,9	+2,0
Helmi	-4,7	-2,0	+2,7
Maalis	-1,3	1,2	+2,5
Huhti	3,9	2,8	-1,1
Touko	10,2	9,5	-0,7

Sademäärässä esitetään kertynyt lumi- ja vesisade nestemäisenä vetenä. Rakennusaikana sadetta on satanut 62 prosenttia ilmaston keskiarvosta (taulukko 5.2). Joulukuun osalta sademäärä on ollut erittäin alhainen 24 prosenttia keskiarvosta ja maalis-huhtikuun osalta lähellä keskimääräistä. Joulu-huhtikuun sademäärä on ollut 82 millimetriä pienempi kuin ilmaston keskiarvo. Sadepäiviä on rakennusaikana joulu-huhtikuussa ollut 43 keskimääräistä vähemmän ja yli millimetrin kertymällä olevia sadepäiviä yhteensä 9 vähemmän kuin keskimäärin (taulukko 5.3). Sademäärältään yli 10 millimetrin sadepäiviä ei ole rakennusaikana ollut yhtäkään, vaikka keskimäärin kyseisiä sadepäiviä osuu yksi joka kuukaudelle. Yksi senttimetri lunta vastaa keskimäärin yhtä millimetriä vesisadetta. Lumen sisältämä vesimäärä riippuu lumen koostumuksesta.

Taulukko 5.2. Kuukausittainen keskimääräinen sademäärä Helsingin Kaisaniemessä rakennusajalta ja ilmaston vertailukaudesta (Ilmatieteen laitos 2012 ja Ilmatieteen laitoksen avoin data).

Kuukausi	Sademäärä vertailukausi [mm]	Sademäärä 2016-17 [mm]	Sademäärä vertailukaudesta (%)
Joulu	58	14	24
Tammi	52	22	42
Helmi	36	27	75
Maalis	38	34	89
Huhti	32	37	116
Yhteensä	216	134	62

Taulukko 5.3. Sadepäivät Helsingin Kaisaniemestä rakennusajalta ja ilmaston vertailukaudesta (Ilmatieteen laitos 2012 ja Ilmatieteen laitoksen avoin data).

Kuukausi	Sadepäivät vertailukausi			Sadepäivät 2016-17			Sadepäivien lukumäärän ero vertailukauteen		
	>0,1 mm	>1 mm	>10 mm	>0,1 mm	>1 mm	>10 mm	>0,1 mm	>1 mm	>10 mm
Joulu	20	11	1	5	5	0	-15	-6	-1
Tammi	19	12	1	10	6	0	-9	-6	-1
Helmi	17	8	1	8	6	0	-9	-2	-1
Maalis	15	8	1	10	9	0	-5	+1	-1
Huhti	11	7	1	6	11	0	-5	+4	-1
Yhteensä jouluhuhtikuun (pv)	82	46	5	39 47 %	37 80 %	0 0 %	-43	-9	-5

Jos lumi- ja vesisade aiheuttavat ongelmia työmaalla jo pienemmässä määrin, voidaan olettaa suuremman sademäärän yleisesti aiheuttavan enemmän haittaa. Sademäärän yhteys kosteusvaurioihin ja riskeihin työmaalla on joiltakin osin kuitenkin epäselvää. Esi-merkiksi sadepäivien lukumäärä ja sademäärä vaihtelevat. Jatkuva sade ja pitkittynyt kosteusrasitus lisää materiaaliin sitoutuvan kosteuden määrää. Hetkellinen kova sadekuuro ja sen aiheuttama vesilätäkkö kuivuu tasaiselta pinnalta tavanomaisesti nopeammin kuin imeytyy materiaaliin, jos vesi ei pääse kertymään rakenneväleihin ja olosuhteet sallivat kuivumisen.

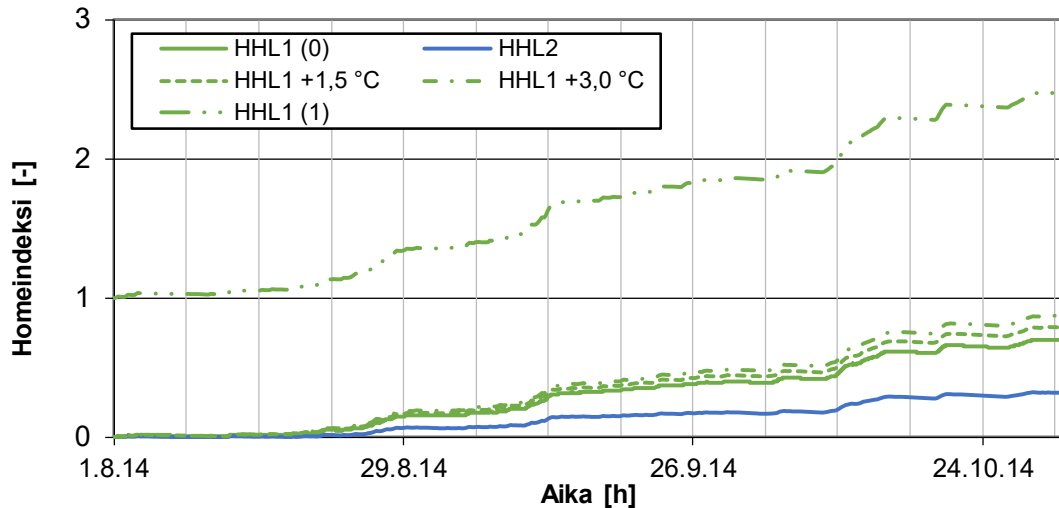
5.5 Sääolosuhteet ja homeen kasvun riski

Alkusyksystä lämpötilat ovat vielä suotuisat homeen kasvulle ja ilman suhteellinen kosteus on korkeampi kuin kesällä. Elokuu on myös Helsingin paikallilmaston sateisin kuukausi. (Ilmatieteen laitos 2012) Kriittisimpänä vuodenaikana homeenkasvulle ulkona voidaan pitää alkusyksyä. Suomalaisen homemallin avulla laskettavaan homeindeksiin on

saatavilla tuntikohtaisia säähavaintoja vain vuodesta 2010 alkaen Ilmatieteenlaitoksen avoimesta datasta. Vertailukohtana on tarkasteltu homeen kehittymistä Helsingin Kaisaniemen ulkoilman olosuhteissa vuonna 2014 elokuusta lokakuuhun. Vuoden 2014 elokuu on ollut kolmen edellisen syksyn lämpimin Kaisaniemessä.

Kuvassa 5.9 on laskettu homemallin mukainen homeindeksin kehittyminen ulkoilman olosuhteissa Helsingin Kaisaniemessä elo-lokakuussa vuonna 2014. Homemallin lähtötietona tulisi käyttää materiaalipinnan olosuhteita, jotka usein eroavat jossakin määrin ympäristön olosuhteista. Pintaolosuhteet voivat olla ympäröivän ilman olosuhteita kriittisemmät esimerkiksi pinnan kastuttua vesisateessa. Kuvassa 5.9 on esitetty homehtumisherkkyyssuokat (HHL) yksi ja kaksi. Luokkaan yksi kuuluvat esimerkiksi sahatavara ja höylätty mänty sekä luokkaan kaksi höylätty kuusi. Lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden arvot on haettu tunneittain Ilmatieteen laitoksen avoimesta datasta. Taantumakeroin on valittu laskennassa kohtalaiseksi ($C_d = 0,25$), koska taantumän vaikutus on tällöin varmalla puolella ja homeindeksin kehitys on voimakkaampaa. Suomalaisella homemallissa taantumakertoimet ovat lähtökohtaisesti varmalla puolella verrattuna alkuperäiseen malliin eikä kyseinen varmistus ole välttämätön. Herkkyyssuokalla yksi käytetään tavanomaisesti voimakkaampaa taantumaa ($C_d = 0,5$). Lisäksi kuvaajassa on esitetty homehtumisherkkyyssuokan yksi arvot laskettuna tunneittain korotetuilla lämpötilan arvoilla.

Lämpötilan korotuksella on muokattu suoraan datassa olevia lämpötilan arvoja ja käytetty alkuperäisiä ilman suhteellisen kosteuden arvoja. 1,5 °C lämpötilan korotuksella pyritään tarkastelemaan lämpimämmän pintaolosuhteen tai sääolosuhteen vaikutusta. Lämpötilan korotus on valittu vastaamaan keskiarvoltaan ilmaston vertailukauden lämpimintä elokuuta. Korotettu lämpötila ei välttämättä kuvaa homeindeksin kehittymistä kyseisenä vuonna, mutta korotuksen avulla voidaan arvioida lämpötilan vaikutusta. 3 °C korotuksella pyritään tarkastelemaan suurempaa eroa lämpötilassa. Kuvaajassa on esitetty myös homehtumisherkkyyssuokan yksi mukainen homeindeksin kehitys, kun homeindeksin suuruus on lähtötilanteessa yksi.



Kuva 5.9. Homeindeksin kehittyminen elo-lokakuussa vuonna 2014 ulkoilman olosuhteissa Helsingin Kaisaniemessä homehtumisherkkyyssuokkien 1 ja 2 materiaaleihin.

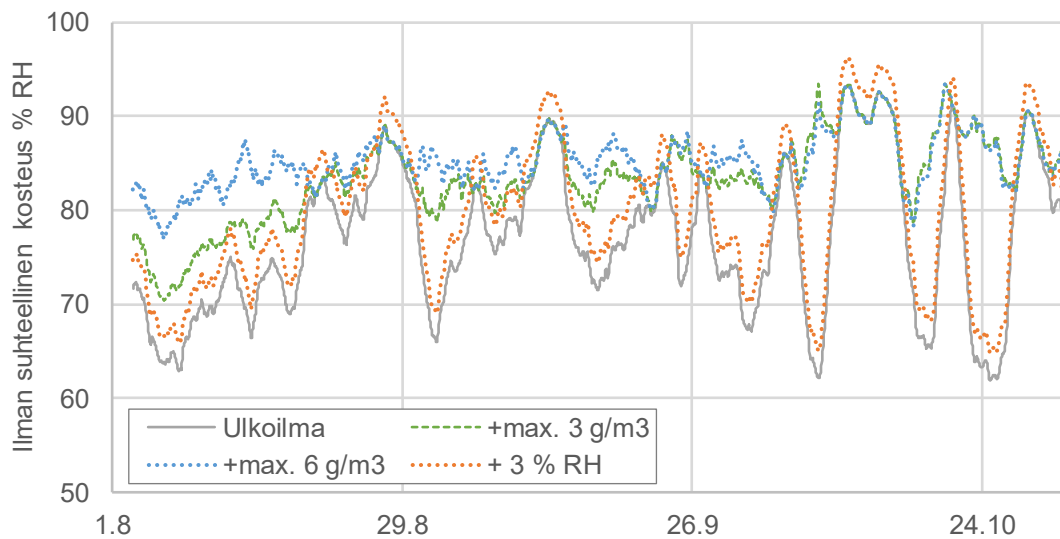
Homeindeksin kehittyminen kolmen kuukauden aikana on hyvin rajallista ulkoilman olosuhteissa. Lämpötilan korotuksella ei myöskään ole suurta vaikutusta tässä tilanteessa. Kuvassa esitetty riski homeenkasvulle kuvaa materiaalia, joka on lähtötilanteessa puhdas. Homeindeksin kehittyminen on tässä tapauksessa noin kaksinkertaista, jos home on lähtenyt kehittymään jo ennen tarkastelujakson alkua. Homeindeksi suuruudeltaan kolme kuvaisi silmin nähtävää homeen kasvua. Viilupuun homehtumisherkkyyssuokka voi olla höylättyä kuusta kestävämpi, koska pinnalla olevat liimajäämät voivat estää homeen kasvua pinnalla. Myös syrjäpintojen hydrofobisella käsittelyllä voi olla vastaava vaikutus.

Ulkoilman suhteellisen kosteuden vaikutusta homeindeksin kehittymiseen on arvioitu myös lisäämällä ilman suhteellista kosteutta (kuva 5.10). Ilman suhteellisen kosteuden korotuksessa on muokattu suoraan lähtödatan ilman suhteellisen kosteuden arvoja. Ilman suhteellisen kosteuden lisääminen ei kuitenkaan kuvaa kuivumista ilmiönä, koska kuivumista ei tapahdu yhtä paljon kosteaan kuin kuivaan ilmaan. Datan käsittelyn painopiste on ollut kuvaajan visuaalisessa tarkastelussa eikä varsinaisesti kuivumisen fysikaalisessa mallintamisessa. Dataa on käsitelty myös lisäämällä ilman vesihöyrypitoisuutta ehdoilla:

- vesihöyrypitoisuutta lisätään vain, kun ilman suhteellinen kosteus on alle 70 % RH:ta
- vesihöyrypitoisuuden lisäyksen yläraja on ilman vapaa kosteuskapasiteetti lämpötilaa vastaavan vesihöyryn kyllästyspitoisuuden mukaan ja
- valitun kosteuslisän ylittäessä vesihöyryn kyllästyspitoisuuden on lisäyksen suuruus vain 80 prosenttia ilman kosteuskapasiteetista.

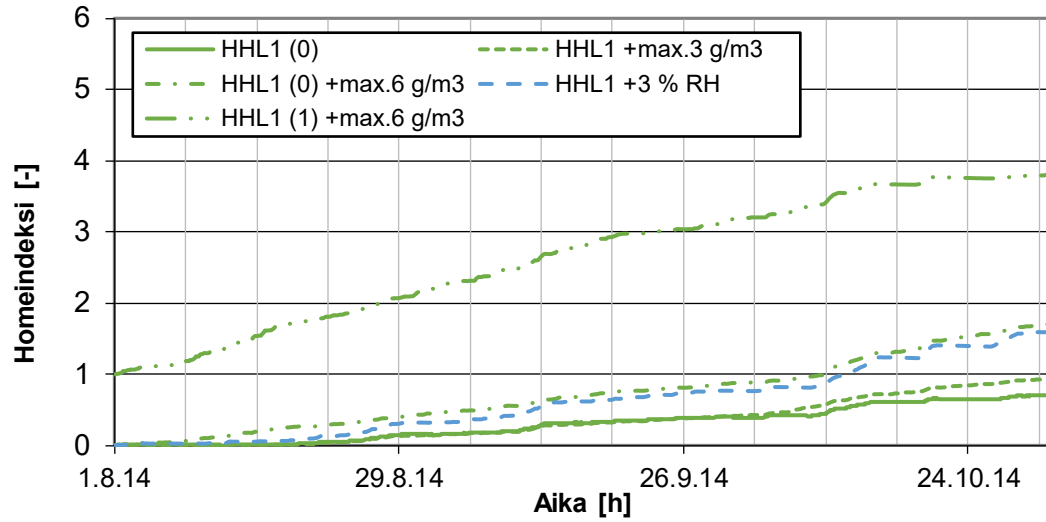
Rajoittamalla ilman suhteellista kosteutta pyritään kuvaamaan kuivumista, joka tavallisesti tapahtuu alhaisilla ilman suhteellisen kosteuden arvoilla. Kyseisellä rajoituksella on merkittävä vaikutus olosuhteiden kriittisyyteen homeen kasvun kannalta, mikä huomattiin nostamalla raja-arvoa. Homeindeksin laskennan ja homeenkasvun kannalta

oleellista on kriittisen ilman suhteellisen kosteuden ylittyminen. Näillä muuttujilla mallin mukainen puulle kriittinen kosteusolosuhde lämpötilassa alle +8 °C:tta yli 85 % RH:ta (kuva 2.7) ei ole olosuhteissa jatkuva ja ajoittain tapahtuu homeiden taantumaa. Viimeisessä ehdossa kosteuspitoisuuden lisäys on rajattu, koska myös kosteuden siirtymisnopeus ilmaan materiaalista on rajallista eikä ilman suhteellinen kosteus tavanomaisesti nouse vesihöyryn kyllästyspitoisuuteen asti.



Kuva 5.10. Ilman suhteellisen kosteuden 48 tunnin liukuvat keskiarvot säähavainnoista ja muokatusta kosteuslisästä suuruudeltaan enintään 3 ja 6 g/m³ sekä säähavainnoista korotettuna +3 % RH.

Muokatuilla ilman suhteellisilla kosteuksilla lasketut homeindeksin arvot on esitetty kuvassa 5.11. Pelkän ilman suhteellisen korottaminen suoraan (HHL1 +3 % RH) ja kuivumisolosuhteiden mallintaminen ehdoilla (HHL1 +max.6 g/m³) ovat lähes yhtä kriittisiä, vaikka ilman suhteellinen kosteus on hyvin erilainen. Lyhyet jaksot suotuisia olosuhteita ovat tässä tilanteessa yhtä kriittisiä kuin olosuhde, joka on jatkuvasti lähellä kriittistä 85 % RH rajaa. Kuvaajassa on esitetty myös homeindeksistä 1 kehittyvä lähtötilanne, joka kuten aiemmin kehittyä huomattavasti nopeammin. Homeindeksin käytöstä olisi hyvä saada kokemuksia käytännössä. On todennäköistä, että rakennusmateriaalit voivat vaurioitua jo kuljetuksessa tai varastoinnissa ilman visuaalisia vaurioita. Jos materiaaleja vielä tämän jälkeen laitetaan kuivuvaan rakenteeseen, laajempi mikrobivaurio kehittyä huomattavasti nopeammin.



Kuva 5.11. Homeindeksin kehittyminen elo-lokakuussa vuonna 2014 Helsingissä homeh-
tumisherkkyyssluokan yksi materiaalissa ulkoilman olosuhteissa ja teoreettisen kuivumi-
sen aiheuttaman kosteuslisän avulla laskettuna.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Puukerrostalon kosteusolosuhteet ja kosteudenhallinta -tutkimuksen tavoitteena oli seurata puurakenteisen asuinkerrostalon työmaatoteutusta sekä lämpö- ja kosteusolosuhteita, dokumentoida ne ja antaa niiden perusteella suosituksia puukerrostalokohteiden työmaan kosteudenhallinnasta. Tämän diplomityön päätavoitteena oli tarkastella rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa rakennusaikana mittausten avulla ja osatavoitteita olivat:

- 1) rakenteiden kenttämittausten toteutus
- 2) muiden työmaalla olevien kenttämittausten toteutuksen seuranta sekä niiden kehittäminen ja etujen arviointi
- 3) mittaustulosten seuranta ja analysointi sekä
- 4) dokumentoida tehtyjen kenttämittauksien toteutustavat ja tulokset sekä antaa ohjeita myöhemmin tehtäviä vastaavia mittauksia varten.

Diplomityössä toteutettiin kenttämittaukset arvioituihin ja havaittuihin kosteusrasitettuihin paikkoihin, joissa kosteuden siirtymisen rakenteeseen arvioitiin olevan mahdollista. Muita mittauksia olivat RF SensIT:in toteuttamat rakenne- ja olosuhdemittaukset sekä työmaan laadunhallintaan liittyvät olosuhdemittaukset ja näytepalamittaukset. Helsingin Kaisaniemen sääaseman havaintojen todettiin vastaavan työmaalla tehtyjä lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden mittauksia. Sääaseman havaintoja hyödynnettiin eri tavoin työssä ulkoilman olosuhteena. Mittaustuloksista tarkasteltiin erilaisten raja-arvojen ylitymistä rakennusaikaisen tai työmaan jälkeisten kosteusvaurioiden näkökulmasta. Lisäksi verrattiin rakennusajan olosuhteita paikallisen ilmaston vertailukauteen. Kirjallisuudesta tarkasteltiin lämmön- ja kosteuden siirtymisen ilmiötä, puun kosteuden mittaamenetelmiä ja kosteusvaurioiden syntymisen raja-arvoja. Mittaukseen liittyen kirjallisuudesta tarkasteltiin myös puumateriaalien tasapainokosteutta ja lämpötilan vaikutusta tasapainokosteuteen.

Mittaustuloksissa ei havaittu massiivisten viilupuisten seinälevyjen kastumista sääaltituksen vaikutuksesta pintakerrosta lukuun ottamatta. Porraskäytävän välipohjan massiiviset viilupuulevyt kastuivat ja kuivuivat rakennusaikana työmaan omaan laadunvarmistukseen kuuluvan näytepalamittauksen mukaan. Kastuminen tapahtui porraskäytävän välipohjassa vain tietyissä paikoissa. Myös välipohjan ripalaatan kansilevy kastui ja kuivui rakennusaikana näytepalamittauksen mukaan. Välipohjan liitoskohdissa erityisesti elementtien päätypalkeissa havaittiin suuria kosteuspitoisuuksia porareikämittauksissa vielä kuivatusvaiheessakin.

Suunnittelussa ja työmaalla on pyrittävä välttämään rakenteiden liiallista kastumista sekä mahdollistamaan kuivuminen. Erilaisten suojausratkaisujen lisäksi sujuva rakentaminen

työmaalla vähentää rakenteiden kosteusaltistusta. Kerrostalorakentamisessa on pyrittävä valmiiden kerrosten kuivattamiseen, koska se vähentää niiden altistusaikaa kosteusrasitukselle. Puurakentamisen suunnittelussa tulee kiinnittää huomiota erityisesti puutuotteen valintaan, riittävään suojaukseen kosteudelta ja detaljien kosteusriskeihin. Eri puutuotteet ja puulajit vaihtelevat kosteusominaisuuksiltaan ja tuotekohtaisesti on otettava huomioon vaurioituminen sekä kuivuminen. Detaljeissa on otettava huomioon veden ohjautuminen pois rakenteesta ja kuivuminen. Kosteuden siirtyminen puumateriaalin syiden suunnassa on merkittävää.

Työmaalla on pyrittävä suojaamaan rakenteet pitkäaikaiselta kastumiselta ja reagoitava muuttuviin sääolosuhteisiin sekä puutteisiin suojauksessa. Erityisesti on hyvä kiinnittää huomiota veden kertymispaikkoihin, ilmatiloihin ja rakoihin sekä hitaasti kuivuviin liitoskohtiin. Rakenteiden kosteusrasitusta ja kuivumisaikaa voidaan vähentää poistamalla irtonainen vesi ja lumi työmaalla. Rakentamisen toteutus on suunniteltava kustannustehokkaasti myös kosteudenhallinnan osalta ja tarkasteltava erilaisia vaihtoehtoja. Sääsuojassa rakennettaessa voidaan käyttää kosteudelle herkempiä materiaaleja vapaammin työmaalla ja olosuhdehallinta on yksinkertaisempaa.

Kuivumisolosuhteet voidaan työmaalla saada aikaiseksi talvikaudella pienellä lämmityksellä koko rakennusajaksi. Jatkuvissa pakkasolosuhteissa talvella voi olla edullisempaa jättää lämmitys pois, jos lämmin ilma sulattaa lunta ylemmissä kerroksissa. Helsingin sääolosuhteet kuitenkin vaihtelivat talvella nollan molemmin puolin, mikä aiheutti irtonaisen veden jäätymistä ja sulamista kohteessa. Kyseisissä olosuhteissa pieni lämmitys on kannattavaa. Seuraavien vuosikymmenten aikana sääolosuhteet ovat muuttumassa lämpimimmiksi ja sateisemmiksi.

Hyvin tuuletetusta rungosta lämmin ja kostea ilma pääsee poistumaan ja ilman kierrosta katvealueilla voidaan varmistua erillisillä puhaltimilla. Lämpimällä ja kostealla ilmalla on riski kondensoitua viileille pinnoille, mikä on hyvä ottaa huomioon betonirakenteita kuivatettaessa puukerrostalossa. Muovipressujen käytössä suojauksessa on riskinä, että luodaan jopa sadealtistusta huonommat olosuhteet. Muovipressua käytettäessä on sen alle järjestettävä tuuletus. Muovin ja puun kosketuspintaan tiivistyy havaintojen perusteella kosteutta suhteellisen kuivissakin olosuhteissa tai pakkasessa.

Vaikka massiiviset viilupuulevyt eivät sitoneet itseensä kosteutta tutkimuskohteessa pitkittyneestä rakennusajasta huolimatta, toteutus eri detaljilla sateisemmissä olosuhteissa voi aiheuttaa kosteuden kertymistä viilupuulevyyn. Seinälevyjen kosteuspitoisuuksia ei mitattu niiden yläreunasta, missä kyseinen ilmiö olisi voitu havaita. Paikallisesti havaittua homeenkasvua rakennusaikana voidaan pitää kosteusvauriona, mutta koivuvaneriin rajoittuneena korjausten määrä on rajallinen. Porraskäytävien massiiviset välipohjalevyt kastuivat rakennusaikana, mutta myös kuivuivat sopivissa olosuhteissa. Välipohjalevyjen kuivumisesta on mahdollisesti helpottanut ilman kiertäminen niiden reunoilla päätyypintojen vieressä olevien rakojen kautta. Alaosastaan avoin ripalaatta ei päätyypalkkejaan lukuun

ottamatta varastoi merkittävästi kosteutta. Seinälevyn juureen kertyvä kosteus voi päästä kapillaarisesti kertymään, mutta kuivuu huomattavasti hitaammin.

Kirjallisuudessa esitettyjen vesihöyrynläpäisevyyden arvojen perusteella viilupuun viilut läpäisevät syysuunnassa noin 20-kertaisesti vesihöyryä poikkisuuntaan verrattuna. Viilupuupalkin ja -levyn ominaisuudet riippuvat viilujen suunnasta. Vesihöyrynläpäisy syitä vasten kohtisuoraan ja liimakerrosten läpi vastaa lähes toisiaan. Liimakerros viilupuussa ei merkittävästi vaikuta havupuumateriaalin vesihöyrynläpäisevyyteen, joka on osateki-jänä myös kuivumisessa. Havupuu läpäisee heikosti vesihöyryä syitä kohtisuoraan, mikä yhdistettynä paksuihin massiivipuorakenteisiin aiheuttaa kastuneelle materiaalille pitkän kuivumisajan. Rakennuskosteutta on kaikki ylimääräinen poistuva kosteus, mutta massiivirakenteissa kuivumista voi tapahtua pitkään eikä liiallista kosteusrasitusta tapahdu, jos pintarakenne läpäisee vesihöyryä nopeammin kuin kosteus siirtyy materiaalissa pinnalle. Massiivirakenteen kosteuspitoisuus voi tasaantua myös materiaalin sisällä.

Puun pitkäaikaisen kosteuspitoisuuden tulisi olla alle 17 painoprosenttia homeen kasvun estämiseksi. Ympäröivien pitkäaikaisten olosuhteiden ilman suhteellisen kosteuden tulisi vastaavasti olla alle 80 % RH:ta, joka vastaa Suomalaisen homemallin mukaista kriittistä olosuhdetta puumateriaalien homeen kasvulle yli 15 °C lämpötilassa (kuva 2.7). On kuitenkin todennäköistä, että kyseisessä kosteusolosuhteessa voi esiintyä homeenkasvua rajallisissa määrin, joten kosteusolosuhteet on hyvä rajata selkeästi kyseisen arvon alapuolelle. Myös lämpötila on merkittävä tekijä ja esimerkiksi alle +5 °C homeen kasvu on oleellisesti optimiolosuhteita hitaampaa.

Yleisesti olosuhteiden hallinta ja erityisesti lämmitys on haastavaa rakennusrungossa, jossa ei ole ilmatiiviyttä eikä lämmöneristystä. Olosuhdemittaukset olivat toisessa kerroksessa kattavimmat, mutta olosuhteet ovat voineet paikallisesti olla kriittisemmät muualla kuin mittauspisteiden kohdalla. Kokonaiskuva olosuhteista jää puutteelliseksi, vaikka mittauspisteitä on yhdessä kerroksessa useita kappaleita. Olosuhteita olisi tärkeää kartoittaa hetkellisillä havainnoilla eri tiloissa ja esimerkiksi huoneiden nurkka-alueilla, jotta olosuhdemittaus pystytään kohdistamaan kriittisimpään tilaan. Myös työmaan olisi hyvä varmistaa olosuhdemittaustensa luotettavuus hetkellisillä havainnoilla.

Puun tavanomaiset kosteusmittausmenetelmät toimivat liimakerroksellisessa viilupuussa epäluotettavasti. Resistanssimenetelmällä viilupuusta voidaan saada mittaustuloksia, jos piikeillä osutaan samaan viiluun. Menetelmä voisi toimia luotettavammin, jos suurempien elektrodien kosketuspinta osuisi useampaan viiluun kerralla. Lisäksi olisi syytä varmistua viilupuun ja sahatavaran resistanssiarvojen vastaavuudesta, vaikka ne todennäköisesti ovat lähellä toisiaan. Testatulla kapasitiivisella pintakosteusmittarilla saatiin kohtalaisen kuivasta väliseinäpinnasta lukemia 30-50 painoprosenttia, vaikka oletetusti väliseinän sisäosat ovat olleet kosteuspitoisuudeltaan alle 12 painoprosenttia ja pintaosa korkeintaan 14 painoprosenttia. Liimapuupilarista mitattiin kosteuspitoisuudeksi noin 14 painoprosenttia. Syytä pintakosteusmittarin erikoisiin lukemiin viilupuumateriaalista ei

ole tiedossa. Pintakosteusmittarin toimintaa myöhemmin varsinaisessa kuivumisvaiheessa ei testattu ja on mahdollista, että pintakosteusmittarilla voitaisiin havaita poikkeavia kosteuspitoisuuksia viilupuumateriaalin sisällä kuivissa olosuhteissa. Erityisesti viilupuun kanssa pintakosteusmittarin toimivuudesta tulisi varmistua jatkotesteillä.

Näytepalojen ottaminen ja porareikämittaus ovat rakenteita rikkovia menetelmiä, mutta muut menetelmät eivät osoittautuneet erityisen luotettaviksi viilupuun osalta. Diplomityön tuloksena on esitetty menetelmä toteuttaa viilupuun porareikämittauksia ja arvioitu erilaisia virhetekijöitä. Porareikämittauksessa pienen anturipään esimerkiksi halkaisijaltaan alle 10 millimetrin käyttö olisi helpompaa kantavissa rakenteissa erityisesti liitosten kohdalla. Vaikka porareikämittauksen käyttö ei olisi tarkka menetelmä painoprosentin määrittämiseen, voidaan porareikämittausta käyttää kuivumisen seurantaan, materiaalin kosteustilan ja kosteusvaurioriskin määrittämiseen. Kuivumisvaiheessa ilman suhteellisen kosteuden tavoite on asetettava karkeasti 5 % RH:ta alemmaksi kuin keskimääräinen tasapainokosteus hystereesistä johtuen. Puumateriaalin porareikämittaus eroaa selkeästi betonin porareikämittauksesta syysuunnan vesihöyrynläpäisevyyden osalta, mikä vaikuttaa esimerkiksi tulosten tulkintaan ja tasaantumisaikoihin. Puumateriaali ei vastaavalla tavalla vaikuta mittalaitteisiin kuin emäksinen tuore betoni, mikä mahdollistaa luotettavamman jatkuvan mittauksen rakenteessa. Mittausanturin toiminta-alueen on kuitenkin oltava mittauspisteen lämpö- ja kosteusolosuhteiden mukainen.

Koska kaikkia ilmiöitä ei välttämättä mittaussuunnitelmassa pystytä ottamaan huomioon, olisi kohteessa hyvä tehdä laajempaa kartoitusta. Tavanomaisesti kartoitus tehdään pintakosteusmittarilla tai muulla helposti käytettävällä laitteella. Tässä tutkimuksessa kartoitusta olisi voinut pyrkiä tekemään piikkimittauksella porareiästä. Toisena vaihtoehtona olisi ollut näytepalojen ottaminen tai porareikämittauksen toteuttaminen myös paikkoihin, joita ei pidetä riskinä, mutta jotka eroavat oleellisesti sijainniltaan rakenteessa. Esimerkiksi seinälevyihin olisi ollut syytä tehdä mittauspisteitä myös yläosiin. Veden valuminen rakenteissa on paikallinen ilmiö ja sen havaitseminen mittauksilla vaatisi mittauspisteitä noin metrin välein rakenteeseen. Olosuhde- ja rakennemittausten kattavuus on syytä varmistaa kartoittavilla mittauksilla. Lähtökohtaisesti rakennemittaukset olisi syytä kohdistaa tämän tyyppisessä puukerrostalokohteessa liitoskohtien sekä ilmatilojen ja -rakojen tarkasteluun.

LÄHTEET

- Dietsch P., Franke S., Franke B., Gamper A., Winter S. 2014. Methods to determine wood moisture content and their applicability in monitoring concepts. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 13 p.
- Forsén H., Tarvainen V. 2000. Accuracy and functionality of hand held wood moisture content meters. VTT, 79 p.
- Hagentoft C. 2001. *Introduction to Building Physics*. Kirja, Studentlitteratur AB, 444 p.
- Hedlin, C. P. 1967. Sorption isotherms of twelve woods at subfreezing temperatures. *Forest Products Journal*, 8 p.
- Hens H. 2012. *Building Physics – Heat, Air and Moisture*. Kirja, Ernst & Sohn, 270 p.
- Häglund M. 2007. Moisture content penetration in wood elements under varying boundary conditions. *Wood Science Technology*, 14 p.
- Ilmatieteen laitos (Pirinen P., Simola H., Aalto J., Kaukoranta J., Karlsson P., Ruuhela R.). 2012. *Tilastoja Suomen ilmastosta 1981-2010*. 82 s.
- Ilmatieteen laitos: Ilmastollinen vertailukausi 1981-2010 <http://ilmatieteenlaitos.fi/ilmastollinen-vertailukausi-1981-2010> (Luettu: 15.5.2017)
- Ilmatieteen laitos: Avoin data <https://ilmatieteenlaitos.fi/avoin-data>
- Jääskeläinen A., Sundqvist H. 2007. *Puun rakenne ja kemia*. Kirja, Otatieto, 142 s.
- Leivo V., Pirinen J., Reiman M., Uitti J., Ruotsalainen R., Rautiala S., Suojanen P. 1998. *Opas kosteusongelmiin*. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Rakennustekniikan osasto, 158 s.
- Lämpöpuuyhdistys ry, *ThermoWood-käsikirja*, 2003.
- Merikallio T. 2009. Betonilattian ”riittävän” kuivumisen määrittäminen uudisrakentamisessa. Väitöskirja, 136 s.
- Ojanen T., Viitanen H., Peuhkuri R., Lähdesmäki K., Vinha J., Salminen K. 2010. Mould growth modeling of building structures using sensitivity classes of materials. *ASHRAE Buildings XI Conference*, 10 p.
- Puuinfo: Puutieto <http://www.puuinfo.fi/puutieto> (Luettu: 17.5.2017).

Rotronic AG, HygroClip 2 (HC2) Humidity Temperature Probes: User Guide v.1.38, 2016.

Rotronic AG, Technical note: The capacitive humidity sensor, 2017 (Luettu: 19.5.2017).

Siikanen U. 2016. Puurakentaminen. Kirja, Rakennustieto Oy, 367 s.

Sipilä E. 2016. Novel Manufacturing Methods and Materials for UHF RFID Tags in Identification and Sensing Applications. 140 p.

Stora Enso, LVL General Fact Sheet, 2016. Tuoteseloste.

Suomen metsäyhdistys: Sanasto <http://www.smy.fi/forest-fi/sanasto> (Luettu: 17.5.2017).

Talotekniikka, Lavento, Kosteusnuuskija paljastaa ongelmat, 1/2013. Lehtiartikkeli, s.62-63.

Time B. 1998. Hygroscopic Moisture Transport in Wood. A thesis presented for the degree of Doktor Ingeniør, Norwegian University of Science and Technology, 232 p.

Viitanen H., Vinha J., Salminen K., Ojanen T., Peuhkuri R., Paajanen L., Lähdesmäki K. 2010. Moisture and Bio-deterioration Risk of Building Materials and Structures. Journal of Building Physics, 24 p.

Vinha J., Valovirta I., Korpi M., Mikkilä A., Käkelä P. 2005. Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona, tutkimusraportti. Tampereen teknillinen yliopisto, Talonrakennustekniikan laboratorio, 321 s.

Vinha J., Laukkarinen A., Mäkitalo M., Nurmi S., Huttunen P., Pakkanen T., Kero P., Manelius E., Lahdensivu J., Köliö A., Lähdesmäki K., Piironen J., Kuhno V., Pirinen M., Aaltonen A., Suonketo J., Jokisalo J., Teriö O., Koskenvesa A., Palolahti T. 2013. Ilmastonmuutokset ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa, tutkimusraportti. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, 405 s.

Vinha J., Rakennusfysiikan kurssin luentomateriaali, 2011.

Vinha J., Rakennusfysiikan kurssin luentokalvot, 2017.

LIITE A

Näytepalojen uunikuivausmenetelmän tulokset 26.4.2017

4. kerroksen ulkoseinästä ja 7. kerroksen välipohjasta otettu näytteet 26.4. noin klo 13. Osa näytteistä punnittu illalla noin klo 18:30 ja tämän jälkeen aamulla noin klo 9 ennen astioihin siirtämistä. Tarkistettujen näytteiden paino alentunut 1-2 gramman sadasosaa. Viulun jakautuminen eri kappaleiksi tuo virhettä kappaleen mittaukseen arviolta ± 3 millimetriä mittauksen oman epätarkkuuden lisäksi.

Vaaka: Sartorius ED62025-CW (702022011012)

Näyte	Syvyyspinnasta päin (mm) ± 3 mm	Keski-kohta (mm)	Tarkistus säilytyksessä (g)	Astia (g)	Näyte astiassa (g) 27.4.2017	Kuivattu astiassa vaihe 1 (g) 2.5.2017	Vaihe 2 (g) 16.5.	Vaihe 3 (g) 26.5.	Vaihe 4 (g) 13.6.	Painon muutos (g)	Kuivan näytteen paino (g)	Paino-prosentti
4-1	0-10 (sisä)	5		2,69	9,34	8,70	8,67	8,64	8,62	0,72	5,93	12,1
4-2	10-23	17		2,69	12,03	11,08	11,05	11,02	11,01	1,02	8,32	12,3
4-3	23-42	33		2,68	16,20	14,75	14,72	14,68	14,68	1,52	12,00	12,7
4-4	42-62	52		2,69	16,73	15,36	15,32	15,29	15,27	1,46	12,58	11,6
4-5	62-86	74		2,69	19,21	17,60	17,56	17,53	17,51	1,70	14,82	11,5
4-6	86-103	95	14,03 / 14,01	2,68	14,77	13,66	13,60		13,59	1,18	10,91	10,8
4-7	103-115	109	9,92 / 9,91	2,65	11,15	10,25	10,23		10,23	0,92	7,58	12,1
4-8	115-129	122	10,86 / 10,84	2,67	12,10	11,11	11,08		11,11	0,99	8,44	11,7
4-9	129-141	135	10,29 / 10,28	2,68	11,63	10,56	10,53		10,50	1,13	7,82	14,5
7-1	0-15 (sisä)	8		2,68	13,02	12,07	12,03		12,02	1,00	9,34	10,7
7-2	15-25	20		2,67	9,54	8,80	8,76		8,77	0,77	6,10	12,6
7-3	25-39	32		2,65	12,79	11,62	11,58		11,58	1,21	8,93	13,5
7-4	39-50	45		2,67	10,39	9,47	9,44		9,45	0,94	6,78	13,9
7-5	50-66	58		2,68	13,99	12,62	12,58		12,55	1,44	9,87	14,6
7-6	66-79	73		2,65	11,71	10,65	10,62		10,60	1,11	7,95	14,0
7-7	79-93	86		2,67	12,64	11,50	11,45		11,44	1,20	8,77	13,7
7-8	93-112	103		2,70	19,03	16,98	16,94		16,92	2,11	14,22	14,8

LIITE B

Havainnot B-talon puurungon rakentamisen edistymisestä

Taulukossa on esitetty työmaakäyntien ajankohdat ja työmaan edistyminen omien havaintojen perusteella. Kolmannessa sarakkeessa on esitetty valmistuneet rungon kerrokset ja tilannetta on kuvailtu sanallisesti neljännessä sarakkeessa.

Viikko	Päivämäärä	Kerros	Asennusvaiheen kuvaus
3	16.1.2017	3/8	Toinen kerros eli ensimmäinen puurunkoinen kerros on asennettu. Kolmas kerros on asennettu. Neljännessä kerroksessa ei ole vielä seiniä.
4	26.1.2017	4/8	Neljäs kerros on asennettu. Viidennessä kerroksessa on asennettu suurin osa seinistä. Kylpyhuonetilaelementtien asennus on käynnissä. Suojausta eli LVL-levyjä ei ole asennettu ja alimmassa kerroksessa pressut.
5	2.2.2017	4/8	Viidennen kerroksen välipohja asennettu. Suojaukset on asennettu toiseen kerrokseen ja ollaan asentamassa kolmanteen kerrokseen.
6	9.2.2017	5/8	Kuudennen kerroksen seinät on asennettu ja tilaelementtejä asennetaan. Suojaus on asennettu kolmeen kerrokseen.
7	16.2.2017	6/8	Seitsemännen kerroksen seinät on asennettu ja tilaelementtejä asennetaan. Suojaus on asennettu viidenteen kerrokseen ja asennetaan kuudenteen.
8	23.2.2017	7/8	Kuusi puurunkoista kerrosta on asennettu ja suojattu. Seitsemännen kerroksen seinät on ainakin asennettu ja päällä pressuja. Seitsemännen kerroksen viimeisiä suoja asennetaan.
10	6.3.2017	7/8	Seitsemännen kerroksen välipohjan päältä poistetaan pressuja ja jäätä pressun alta.
11	13.3.2017	7/8	Kahdeksannen kerroksen seinät on asennettu. Ei havaintoa asennetuista tilaelementeistä vielä. Tilaelementtejä työmaalla varastossa.
12	21.3.2017	8/8	Vesikattoelementtien ensimmäinen taso on asennettu (IV-kanava porraskäytävän päällä ja konehuone ovat omissa kattotasoissaan). Ei havaintoa muista kattotasoista.
13	28.3.2017	8/8	IV-kanavan vesikatto on asennettu. Konehuone puuttuu vesikatolta vielä.
14	4.4.2017	8/8	Julkisivuelementtien asennus on aloitettu. Asennusaikataulu vielä avoin. Detalja muutettu ei-kantavalla seinällä ja LVL-levy on poistettu rakennedetaljista.
15	12.4.2017	8/8	Julkisivuelementtejä ikkunoineen paikalla arviolta noin puolet sivuseinällä. Parvekkeiden asennusta ei ole aloitettu. Asennusjärjestys on epäselvä, koska asennuksia on tehty ylös asti sekä sivusuunnassa alempana.
16	27.4.2017	8/8	Alimpien kerrosten porraskäytävien lattiavalut tehty.



***Kuva 1** Ensimmäinen asuinkerrostalo työmaavierailulla tammikuussa 16. päivä (vas.) ja 26. päivä (oik.)*



***Kuva 2** Ensimmäinen asuinkerrostalo työmaavierailulla helmikuussa 2. päivä (vas.) ja 10. päivä (oik.)*



***Kuva 3** Ensimmäinen asuinkerrostalo työmaavierailulla maaliskuussa 13. päivä (vas.) ja 28. päivä (oik.)*

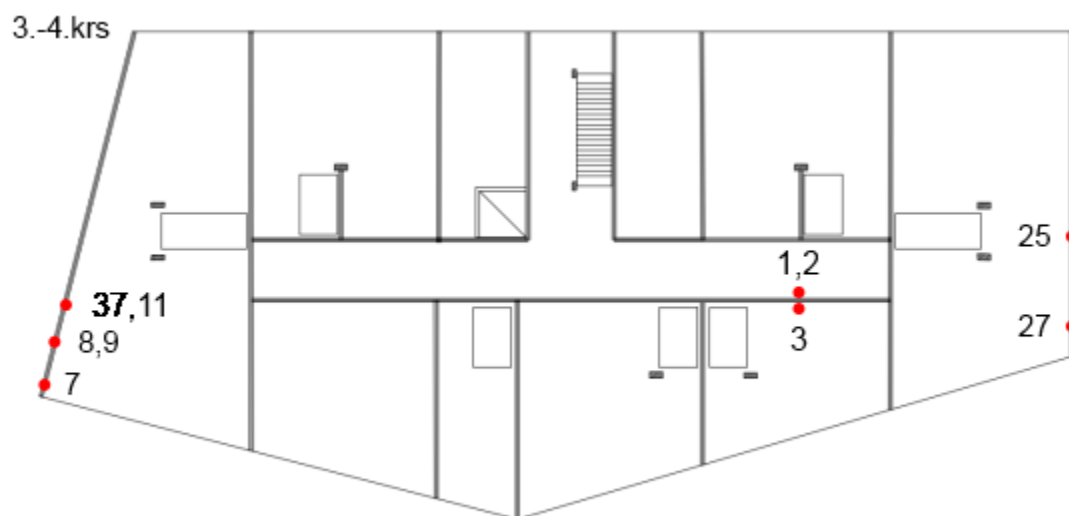
LIITE C

Mittaustulokset diplomityössä toteutetuista mittauksista B-talossa

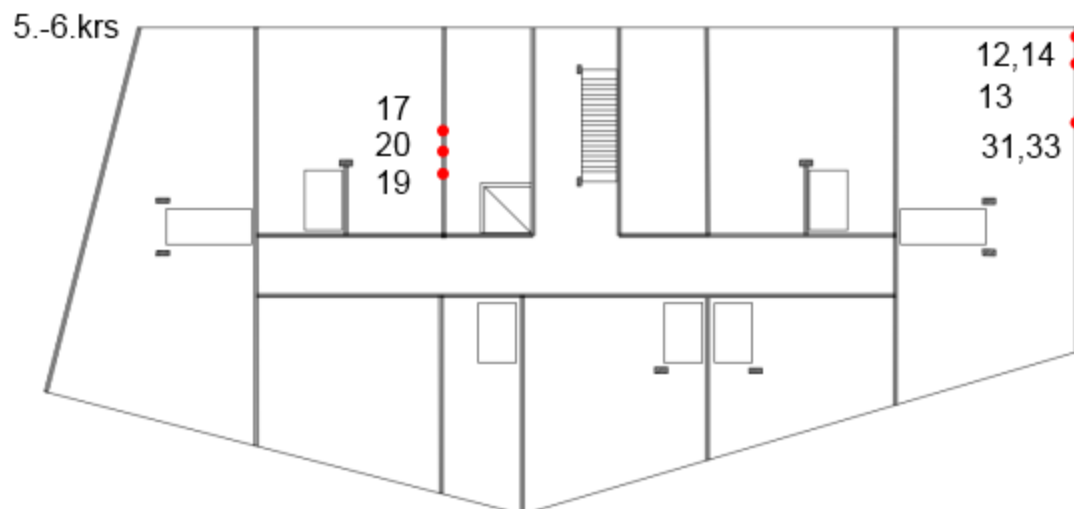
MITTAUSPISTEIDEN SIJAINTI



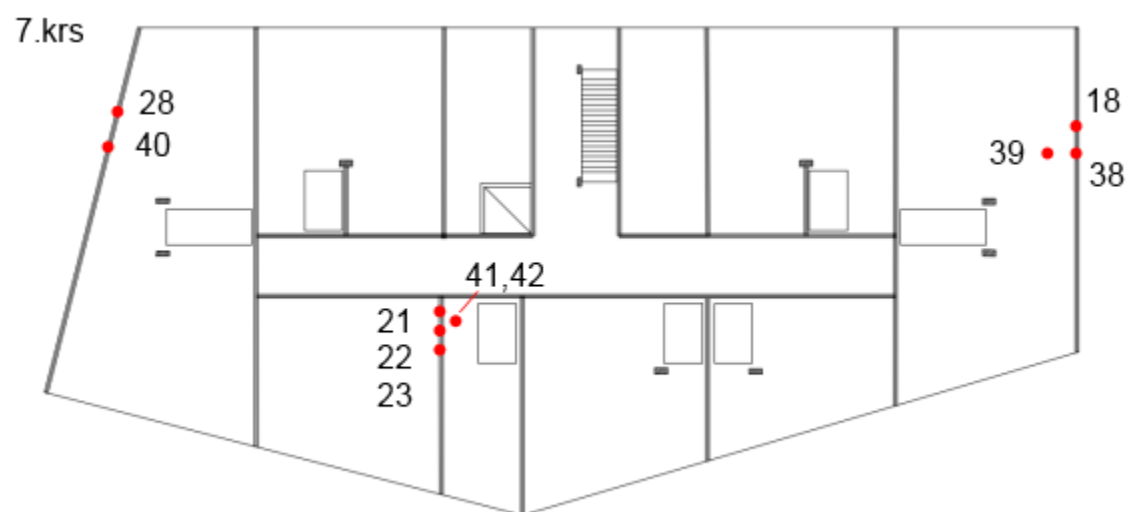
Kuva 1. Mittauspisteiden sijainti toisessa kerroksessa.



Kuva 2. Mittauspisteiden sijainti kolmannessa ja neljännessä kerroksessa.



Kuva 3. Mittauspisteiden sijainti viidennessä ja kuudennessa kerroksessa.



Kuva 4. Mittauspisteiden sijainti seitsemännessä kerroksessa.

ULKOSEINÄLEVY 4. KERROS (2.2. - 1.6.)

Taulukko 1. Mittauspisteiden 7, 8 ja 9 sijainti.

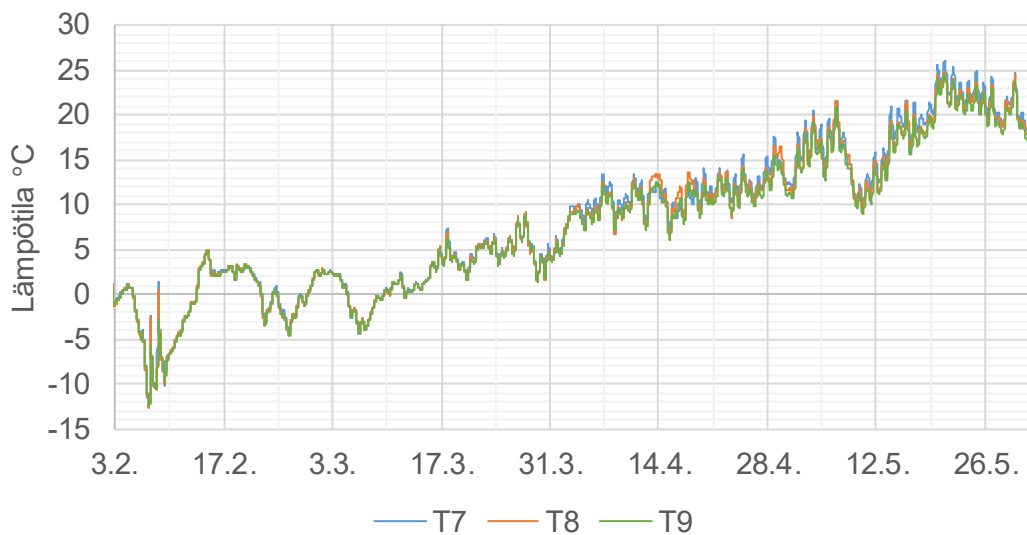
Piste	Syvyys (cm)	Halkaisija (mm)	Sijainnin kuvaus
7	7,7	21	Ulkoseinälevyissä ikkuna-aukon sivussa. Mittapisteen keskelle ikkuna-aukon sivusta 10,5 cm.
8	7,6	21	Ulkoseinälevyissä ikkuna-aukon alapuolella. Mittapisteen keskelle ikkuna-aukon alareunasta 6 cm.
9	7,6	21	Ulkoseinälevyissä ikkuna-aukon alapuolella. Mittapisteen keskelle ikkuna-aukon alareunasta 16 cm.

Taulukko 2. Mittauspisteiden 7, 8 ja 9 toteutus.

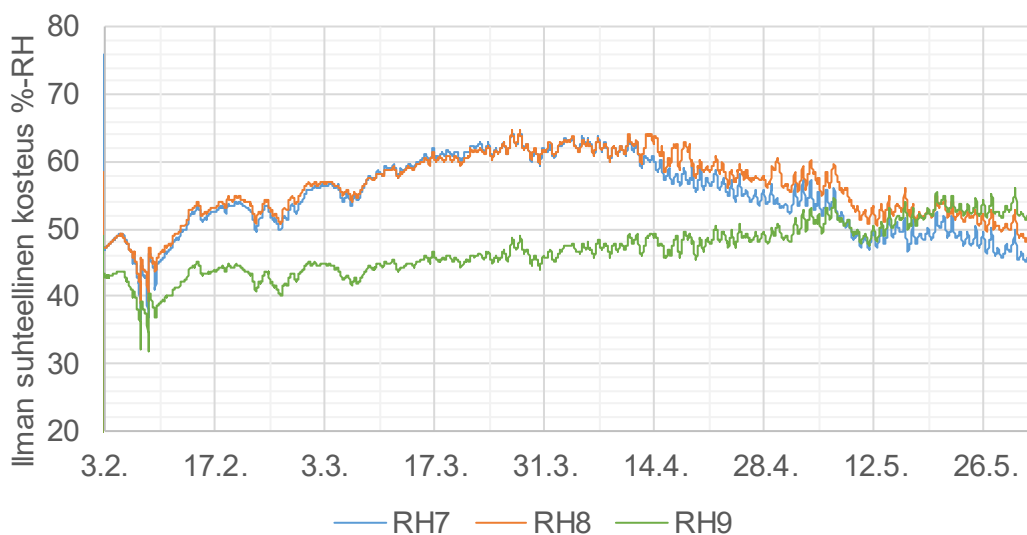
Piste	Mittaussyvyys (cm)	Toteutuksen kuvaus
7	6,2 - 7,7	Mittausputken avoin osa kohti ikkunan sivua keskilevyn syiden suuntaan.
8	6,1 - 7,6	Mittausputken avoin osa kohti ikkunan alareunaa syyt kohtisuoraan.
9	6,1 - 7,6	Mittausputken avoin osa kohti ikkunan alareunaa syyt kohtisuoraan.



Kuva 5. Rakennuksen päätyseinän nurkka ja mittauspisteiden 7 (vas.), 8 (kesk.) ja 9 (oik.) sijainti (2.2.2017).



Kuva 6. Lämpötilan mittaustulos ulkoseinälevyn rakennemittauksessa pisteissä 7, 8 ja 9.



Kuva 7. Ilman suhteellisen kosteuden mittaustulos ulkoseinälevyn rakennemittauksessa pisteissä 7, 8 ja 9.

ULKOSEINÄLEVY 5. KERROS (16.2. - 12.5.)

Poikkeamana mittauksissa loggerin kastuminen kahdesti kyseisessä paikassa, mikä näkyy mittaustulosten katkeamisena helmi- ja huhtikuussa. Loggeri ja mittauspisteen 14 anturi vaihdettiin 6. maaliskuuta. Loggausdataa ei ennen kyseistä ajanhetkeä voida luotettavasti yhdistää eri mittausantureihin ja tulokset on esitetty harmaalla kuvaajassa. Anturin vaihtaminen on pudottanut pisteen 14 mittaustulosta noin viisi prosenttiyksikköä, mikä voi liittyä mittauspisteiden kastumiseen.

Taulukko 3. Mittauspisteiden 12, 13 ja 14 sijainti.

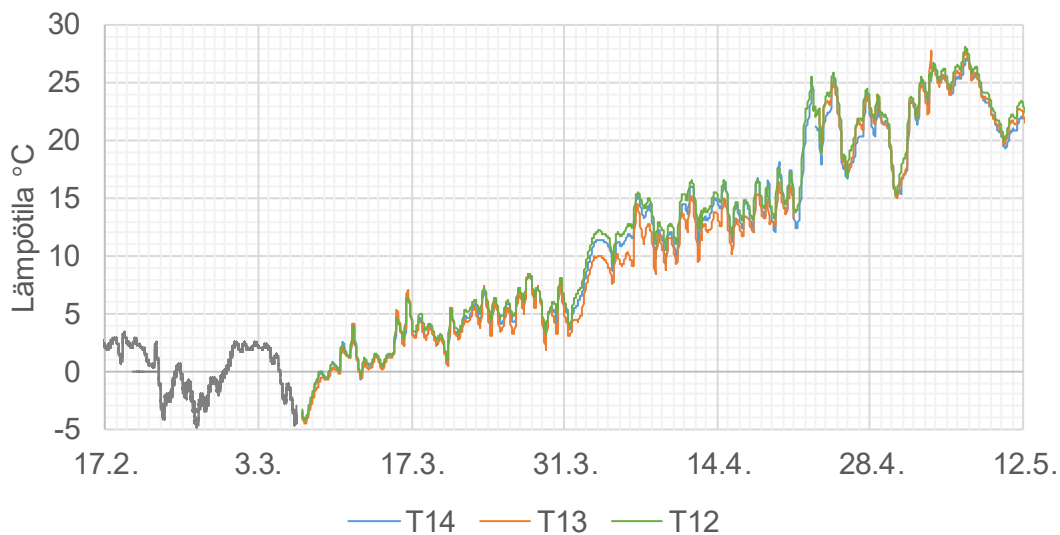
Piste	Syvyys (cm)	Halkaisija (mm)	Sijainnin kuvaus
12	7,9	21	Ulkoseinälevyssä. Mittapisteen keskelle ikkuna-aukon sivusta 5,7 cm.
13	7,7	21	Ulkoseinälevyssä. Mittapisteen keskelle ikkuna-aukon alareunasta 5,5 cm.
14	7,9	21	Ulkoseinälevyssä. Mittapisteen keskelle ikkuna-aukon sivusta 15,5 cm.

Taulukko 4. Mittauspisteiden 12, 13 ja 14 toteutus.

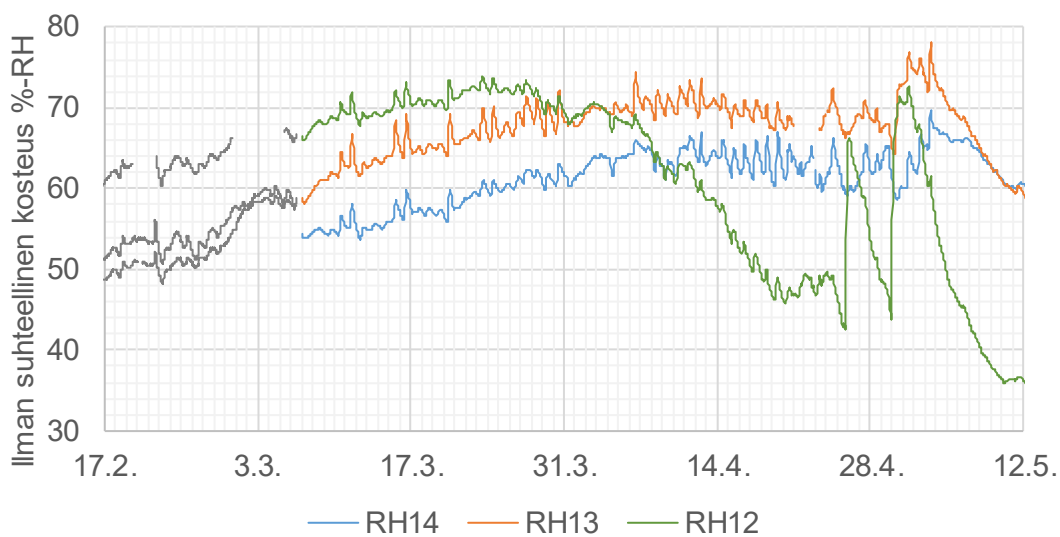
Piste	Mittaussyvyys (cm)	Toteutuksen kuvaus
12	6,4 - 7,9	Mittausputken avoin osa kohti ikkunan sivua keskilevyn syiden suuntaan.
13	6,2 - 7,7	Mittausputken avoin osa kohti ikkunan alareunaa syyt kohtisuoraan.
14	6,4 - 7,9	Mittausputken avoin osa kohti ikkunan sivua keskilevyn syiden suuntaan. Huom. pilarimainen rakenneosa.



Kuva 8. Rakennuksen päätyseinän nurkka, väliaikaisia suojauksia ja mittauspisteiden 12 (kesk.), 13 (oik.) ja 14 (vas.) sijainti (16.2.2017).



Kuva 9. Lämpötilan mittaustulos ulkoseinän rakennemittauksessa pisteissä 12, 13 ja 14.



Kuva 10. Ilman suhteellisen kosteuden mittaustulos ulkoseinän rakennemittauksessa pisteissä 12, 13 ja 14.

VÄLISEINÄLEVY JA OLOSUHDE 2. KERROS (2.2. – 1.6.)

Mittauspisteen asennuksen ajankohtana suurin osa toisen kerroksen suojauksista oli asennettu.

Taulukko 5. Mittauspisteiden 4 ja 5 sijainti.

Piste	Syvyys (cm)	Halkaisija (mm)	Sijainnin kuvaus
4	7,9	21	Väliseinälevyssä. Noin 15 cm oviaukon reunasta. Huom. pilarimainen rakenneosaa.
5	-	-	Yli metrin etäisyydellä seinäpinnoista ja puoli metriä ripojen alareunasta.

Taulukko 6. Mittauspisteiden 4 ja 5 toteutus.

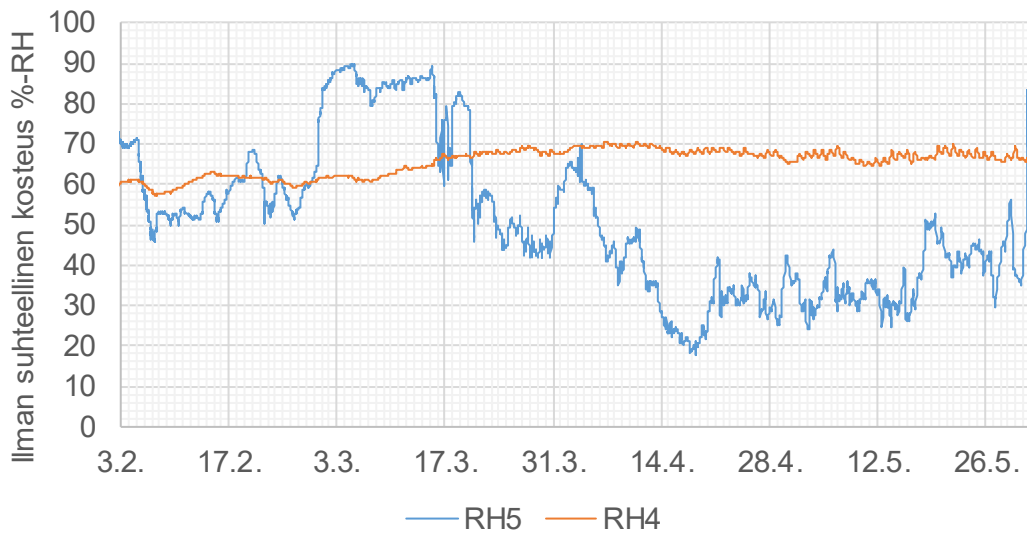
Piste	Mittaussyvyys (cm)	Toteutuksen kuvaus
4	6,4 - 7,9	Mittausputken avoin osa kohti oviaukon sivua keskilevyn syiden suuntaan.
5	Huonetila	-



Kuva 11. Mittauspisteen 4 sijainti väliseinälevyssä ja olosuhdemittauspiste 5 (2.2.2017).



Kuva 12. Lämpötilan mittaustulos väliseinälevyn rakennemittauksessa pisteessä 4 ja olosuhdemittauksessa 5.



Kuva 13. Ilman suhteellisen kosteuden mittaustulos väliseinälevyn rakennemittauksessa pisteessä 4 ja olosuhdemittauksessa 5.

VÄLIPOHJARAKENNE 2. KERROS, MÄRKÄTILA (13.3. – 1.6.)

Poikkeamana kaikkien mittauspisteiden toimivuus tarkastettu ja tiivistys rikottu ensimmäisen kerran 4. huhtikuuta. Mittauspisteen 34 anturi todettu työmaalla toimimattomaksi ilman suhteellisen kosteuden mittauksen osalta ja vaihdettu 12. toukokuuta, mikä näkyy myös kuvaajassa kyseisenä ajankohtana. Jälkitestauksessa anturi on toiminut mittauksen virheen ollessa +4 %-RH olosuhteessa 96 %-RH (lukema 100 %-RH) ja -3 %-RH olosuhteessa 84 %-RH. Mittaus ei ole mahdollisesti käynnistynyt yhdellä ajanjaksolla, mikä näkyy katkoksenä tuloksessa.

Taulukko 7. Mittauspisteiden 34 ja 35 sijainti.

Piste	Asennus-syvyys (cm)	Reiän halkaisija (mm)	Sijainnin kuvaus
34	9,5	21	Ripalaatan ja välipohjaelementin päätypalkkien väli, joka mahdollisesti laajentunut hieman kuivumisvaiheessa. Ripalaatan kannen alareunasta mittauspisteen keskelle 11 cm.
35	n.8	21	Ilmatilassa kylpyhuoneen putkitilassa.

Taulukko 8. Mittauspisteiden 34 ja 35 toteutus.

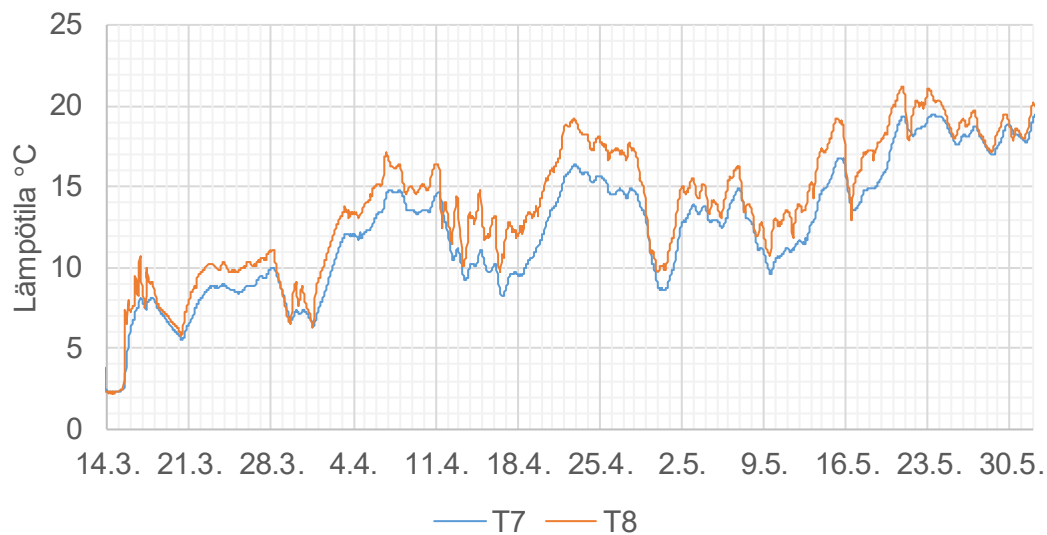
Piste	Mittaussyvyys (cm)	Toteutuksen kuvaus
34	7 – 9,5	Mittausputken avoin osa ylöspäin kohtisuoraan syitä vasten. Ei pohjassa asti.
35	Ilmatila	-



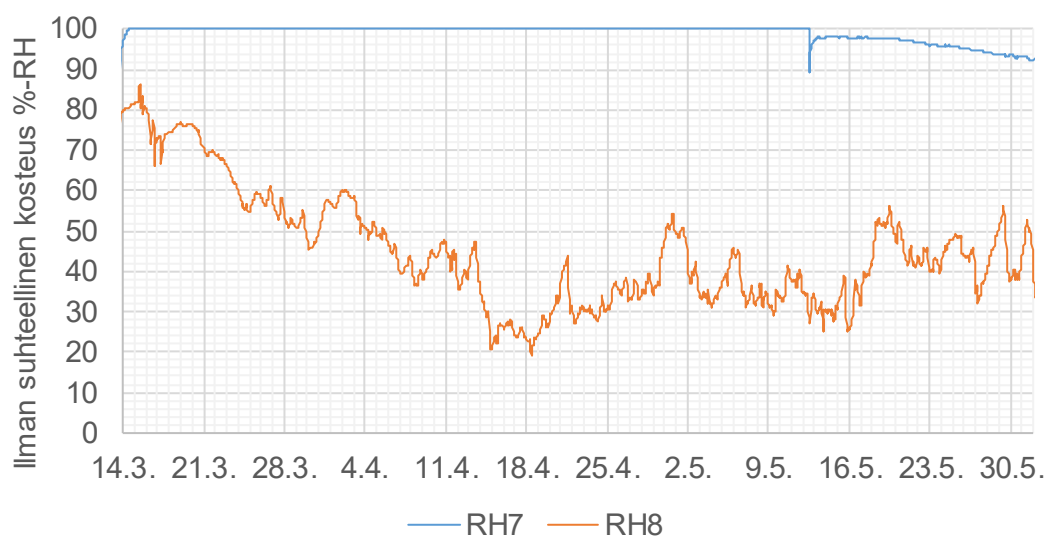
Kuva 14. Kylpyhuonesyvennys välipohjassa ja pilari sekä mittauspisteen 34 sijainti (vas. ripaväli ja 11 cm yläreunasta) (13.3.2017).



Kuva 15. Kylpyhuonesyvennys välipohjassa sekä mittauspisteen 35 sijainti (kesk. ripaväli) (13.3.2017).



Kuva 16. Lämpötilan mittaustulos päätypalkkien välissä (34) ja syvennyksen ilmatilassa (35).



Kuva 17. Ilman suhteellisen kosteuden mittaustulos päätypalkkien välissä (34) ja syvennyksen ilmatilassa (35).

VÄLIPOHJARAKENNE 2. KERROS (16.2. – 1.6.)

Kuvat (Kuva 18 ja Kuva 19) on otettu väliseinän eri puolilta. Mittauspiste 24 asennettiin jälkimmäisessä kuvassa näkyvään seuraavaan ripaväliin vasemmalle. Kuvaajissa Kuva 20 ja Kuva 21 on esitetty mittauspisteiden mittaustulokset helmi-toukokuun ajalta. Mittauspisteen 24 toiminta katkeili ja loppui kokonaan mittauksen aikana mahdollisesti loggerin johtoliitoksen vian tai anturin kastumisen vuoksi. Kaikkien mittauspisteiden toimivuus tarkastettu ja tiivistys rikottu ensimmäisen kerran 4. huhtikuuta.

Taulukko 9. Mittauspisteiden 15, 16 ja 24 sijainnista.

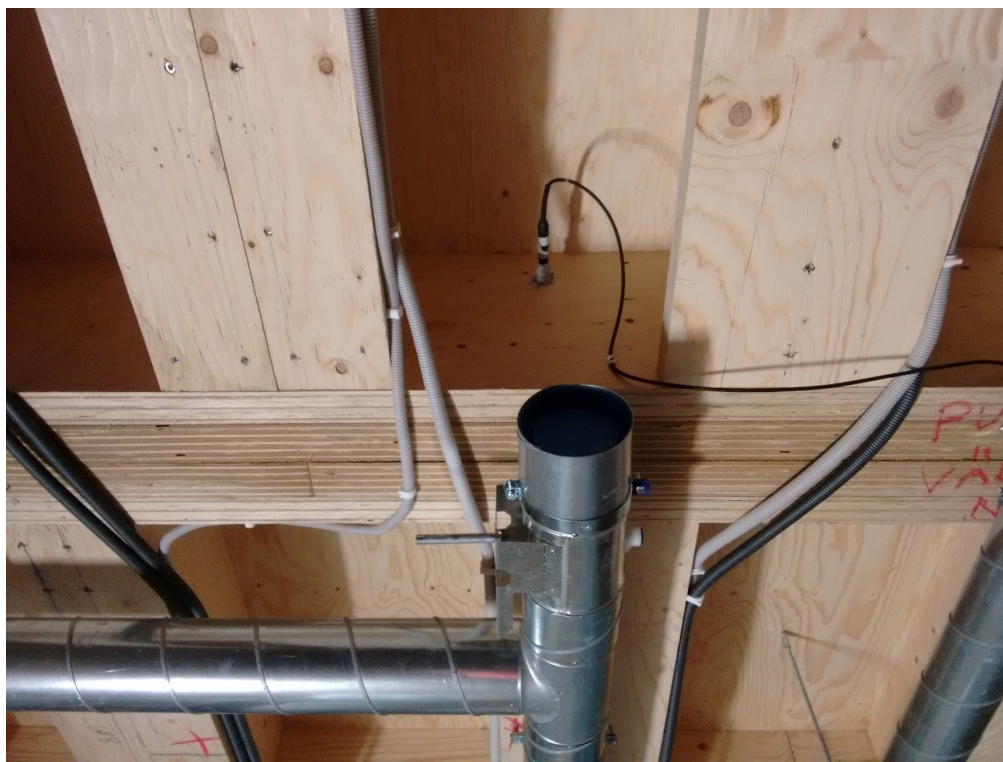
Piste	Asennus-syvyys (cm)	Halkaisija (mm)	Sijainnin kuvaus
15	7,5	21	Väliseinän kohdalla. Mittapisteen keskelle ripalaatan kannen alareunasta 10 cm.
16	7,5	21	Aukon kohdalla. Mittapisteen keskelle ripalaatan kannen alareunasta 10 cm.
24	13,2	21	Aukon ja aukkopalkin kohdalla. Palkkiväli. Mittapisteen keskelle ripalaatan kannen alareunasta 11,5 cm.

Taulukko 10. Mittauspisteiden 15, 16 ja 24 toteutus.

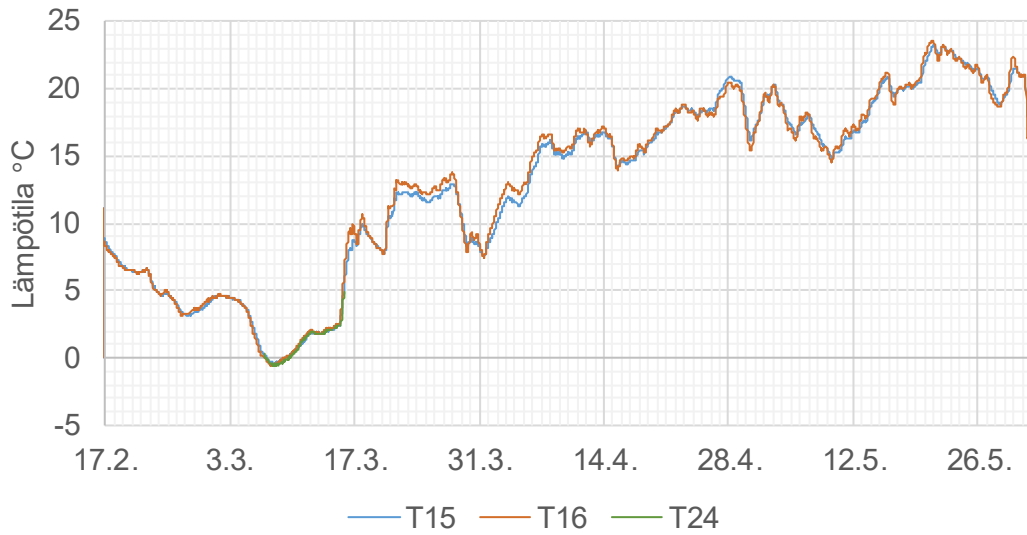
Piste	Mittaussyvyys (cm)	Toteutuksen kuvaus
15	6 – 7,5	Mittausputken avoin osa ylöspäin syysuuntaan.
16	6 – 7,5	Mittausputken avoin osa ylöspäin syysuuntaan.
24	6,5 – 13,2	Mittausputken avoin osa ylöspäin syysuuntaan. Ei reiän pohjassa asti.



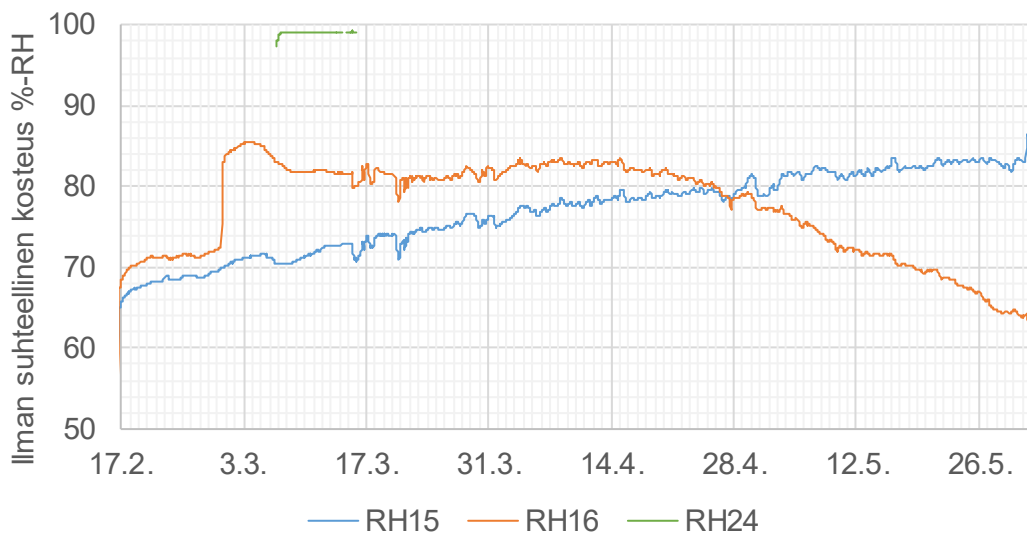
Kuva 18. Ripalaatta väliseinän päällä ja mittauspisteen 15 sijainti (16.2.2017).



Kuva 19. Ripalaattojen päätypalkit aukon kohdalla ja mittauspisteen 16 sijainti. Mittauspiste 24 asennettu ripaväliin vasemmalla (16.2.2017).



Kuva 20. Lämpötilan mittaustulos välipohjan rakennemittauksen pisteissä 15, 16 ja 24.



Kuva 21. Ilman suhteellisen kosteuden mittaustulos välipohjan rakennemittauksen pisteissä 15, 16 ja 24.

VÄLIPOHJARAKENNE 6. KERROS (16.2. – 1.6.)

Poikkeamana kaikkien mittauspisteiden toimivuus tarkastettu ja tiivistys rikottu ensimmäisen kerran 4. huhtikuuta, mikä näkyy hetkellisesti mittaustuloksen kuvaajassa. Työmaakäynnillä 6. maaliskuuta havaittu kyseisten mittauspisteiden kohdalla ylemmässä kerroksessa vesilätäkkö ja kasa pressuja.

Taulukko 11. Tiivistelmä mittauspisteiden 17, 19 ja 20 sijainnista.

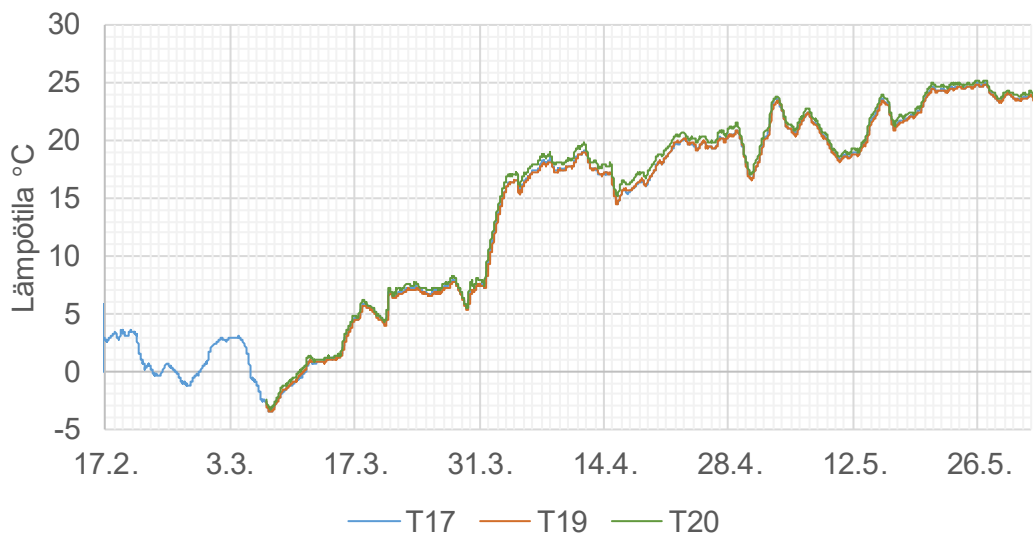
Piste	Asennus-syvyys (cm)	Halkaisija (mm)	Sijainnin kuvaus
17	8,5	21	Aukon ja aukkopalkin kohdalla. Mittapisteen keskelle ripalaatan alareunasta 5,5 cm.
19	15,5	21	Aukon ja aukkopalkin kohdalla. Päätypalkkien väli, joka kuivumisvaiheessa hieman laajentunut. Mittapisteen keskelle ripalaatan alareunasta 5,5 cm.
20	6,1	21	Aukon ja aukkopalkin kohdalla. Mittapisteen keskelle ripalaatan alareunasta 5,5 cm.

Taulukko 12. Mittauspisteiden 17, 19 ja 20 toteutus.

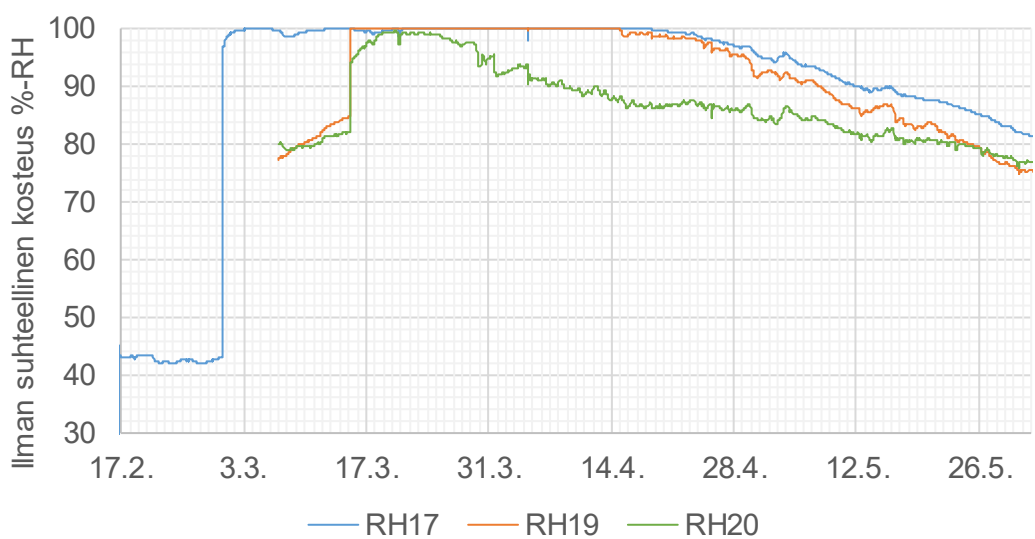
Piste	Mittaussyvyys (cm)	Toteutuksen kuvaus
17	7 – 8,5	Mittausputken avoin osa alaspäin syysuuntaan.
19	6,5 – 15,5	Mittausputken avoin osa alaspäin syysuuntaan.
20	4,6 – 6,1	Mittausputken avoin osa alaspäin syysuuntaan.



Kuva 22. Ripalaatat väliseinän ja aukkopalkin päällä sekä mittauspisteiden 17 (oik.), 19 (vas.) ja 20 (kesk.) sijainti (6.3.2017).



Kuva 23. Lämpötilan mittaustulos välipohjan rakennemittauksen pisteissä 17,19 ja 20.



Kuva 24. Ilman suhteellisen kosteuden mittaustulos välipohjan rakennemittauksen pisteissä 17,19 ja 20.

VÄLIPOHJARAKENNE 7. KERROS (6.3. – 1.6.)

Poikkeamana kaikkien mittauspisteiden toimivuus tarkastettu ensimmäisen kerran 4. huhtikuuta rikkomalla tiivistys. Toisen kerran tarkistettu 12. toukokuuta. Mittauspisteen 23 ilman suhteellisessa kosteuden mittaustuloksessa näkyy vaihtelua, joka mahdollisesti johtuu mittauspisteeseen vuotavasta ilmasta. Pisteen 23 vierestä otettiin näytepala 26. huhtikuuta, minkä voidaan olettaa vaikuttavan mittaustulokseen.

Taulukko 13. Tiivistelmä mittauspisteiden 21,22 ja 23 sijainnista.

Piste	Asennussyvyys (cm)	Halkaisija (mm)	Sijainnin kuvaus
21	10,1	21	Ripalaatan kansilevyn alapinnasta mittapisteen keskelle 11,5 cm. Aukon kohdalla.
22	15,5	21	Ripalaatan kansilevyn alapinnasta mittapisteen keskelle 10,0 cm. Aukon kohdalla. Päätypalkkien välissä.
23	5,3	21	Ripalaatan kansilevyn alapinnasta mittapisteen keskelle 9,5 cm. Väliseinän kohdalla.

Taulukko 14. Mittauspisteiden 21, 22 ja 23 toteutus.

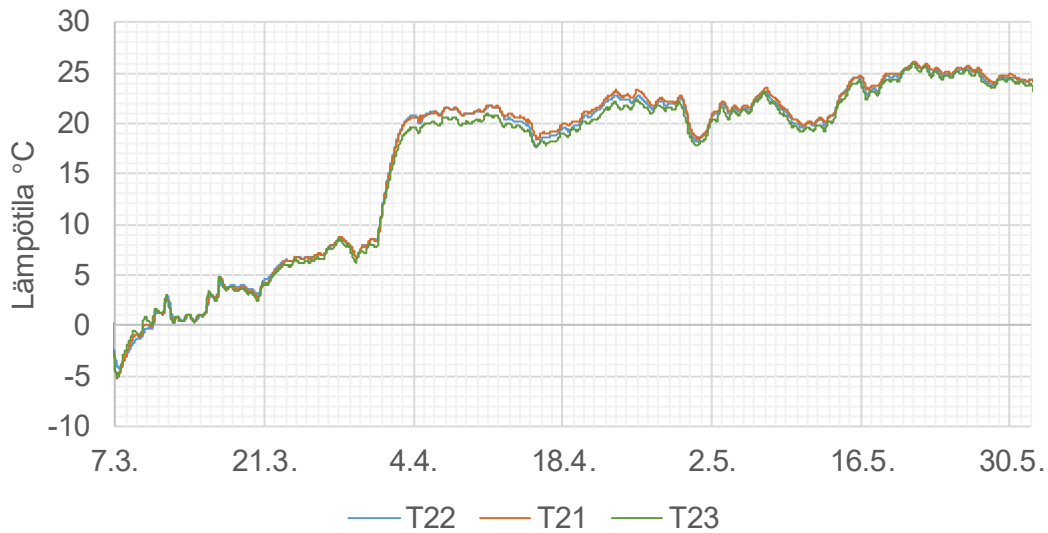
Piste	Mittaussyvyys (cm)	Toteutuksen kuvaus
21	6,6 – 10,1	Mittausputken avoin osa ylöspäin syysuuntaan.
22	6,5 – 15,5	Mittausputken avoin osa ylöspäin syysuuntaan.
23	3,8 – 5,3	Mittausputken avoin osa ylöspäin ja arviolta kohdassa syyt pääasiassa kohtisuoraan.



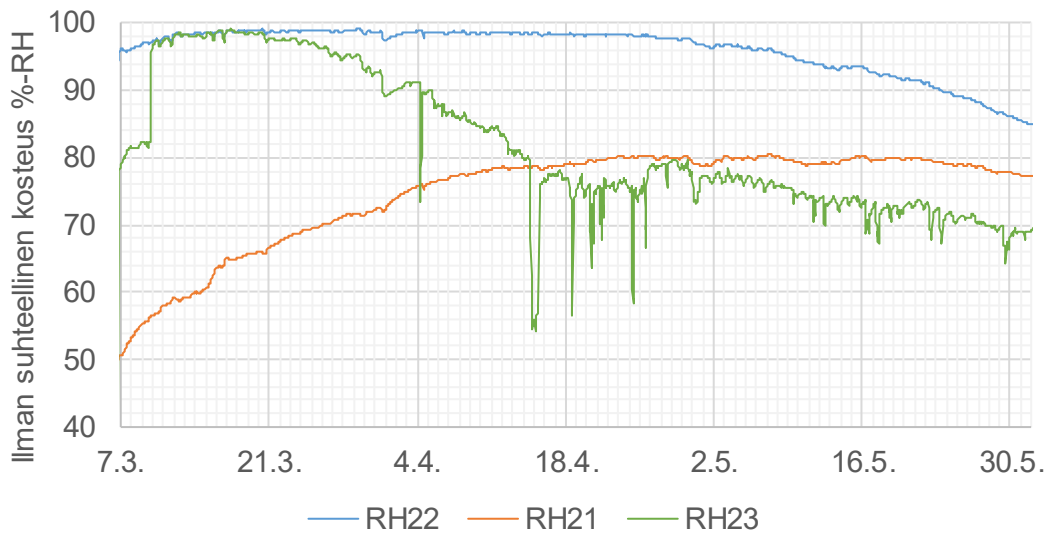
Kuva 25. Ripalaattojen päätypalkit aukon kohdalla sekä mittauspisteiden 21 (vas.) ja 22 (oik.) sijainti (6.3.2017).



Kuva 26. Ripalaatat väliseinän kohdalla ja mittauspisteen 23 sijainti, jonka alta otettu näytepala (26.4.2017).



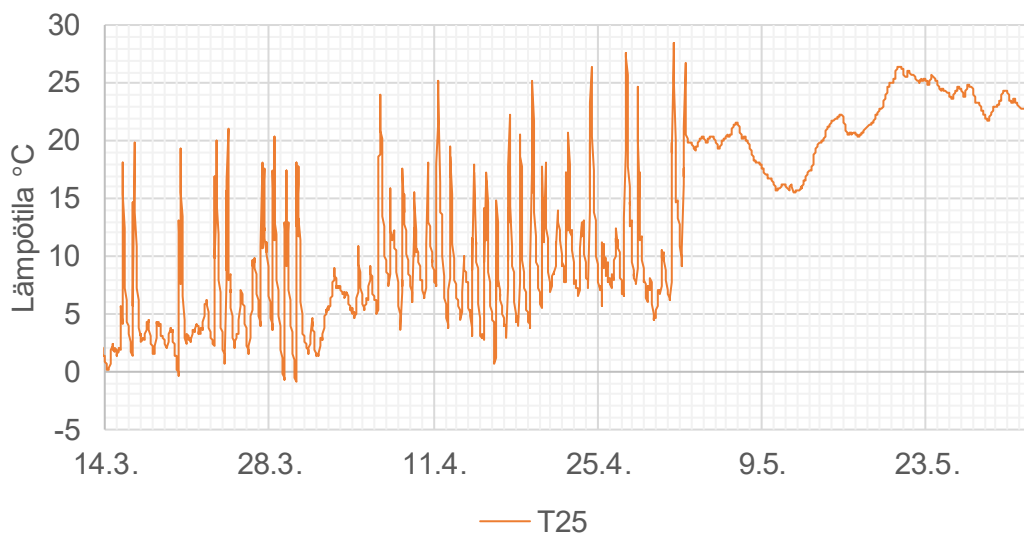
Kuva 27. Lämpötilan mittaustulos välipohjan rakennemittauksen pisteissä 21, 22 ja 23.



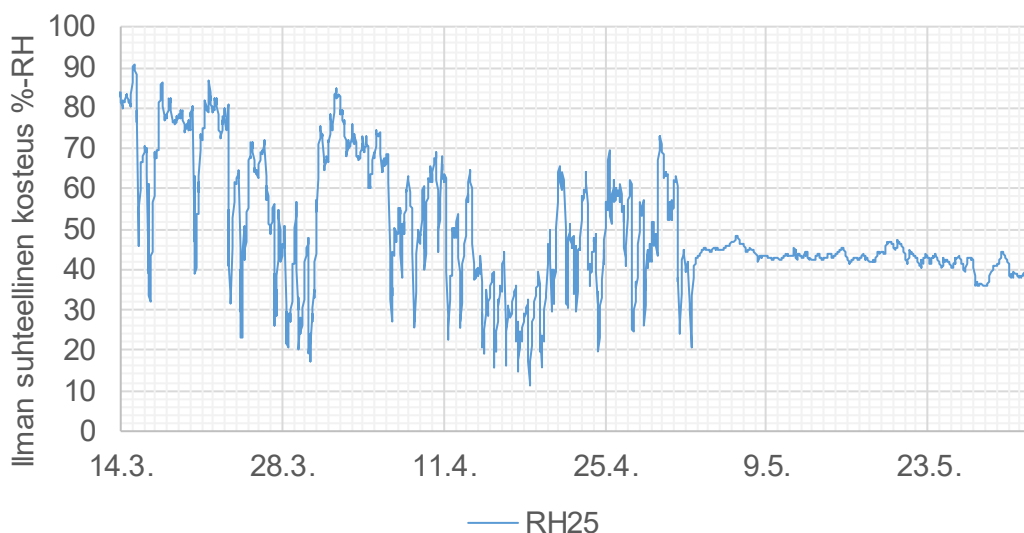
Kuva 28. Ilman suhteellisen kosteuden mittaustulos välipohjan rakennemittauksen pisteissä 21, 22 ja 23.

MUITA MITTAUKSIA

Kaakkoispäädyn ulkoseinälevyn mittauspiste 3. kerroksessa. Seinälevyssä porareikä läpi halkaisijaltaan 4,5 cm. Mittausanturi porareiän ilmatilassa, jonka olosuhteet lähellä ulkoilman olosuhteita. Tiivistetty sisäpinnasta. Toukokuun alussa mittauspisteen päälle asennettu julkisivuelementti lämmöneristeinen. Mittaustulokseen vaikuttaa viilupuun sekä lämmöneristetilän kosteus. Varsinaiset julkisivumittaukset päädyttiin toteuttamaan rakenteeseen jäävillä mittausantureilla ilman porareikää seinälevyn läpi.

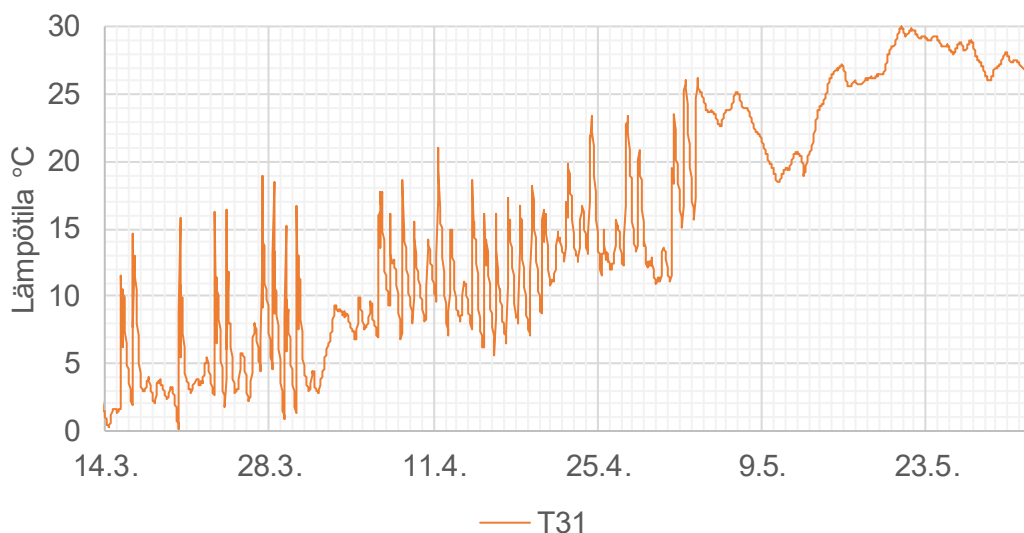


Kuva 29. Lämpötilan mittaustulos pisteessä 25.

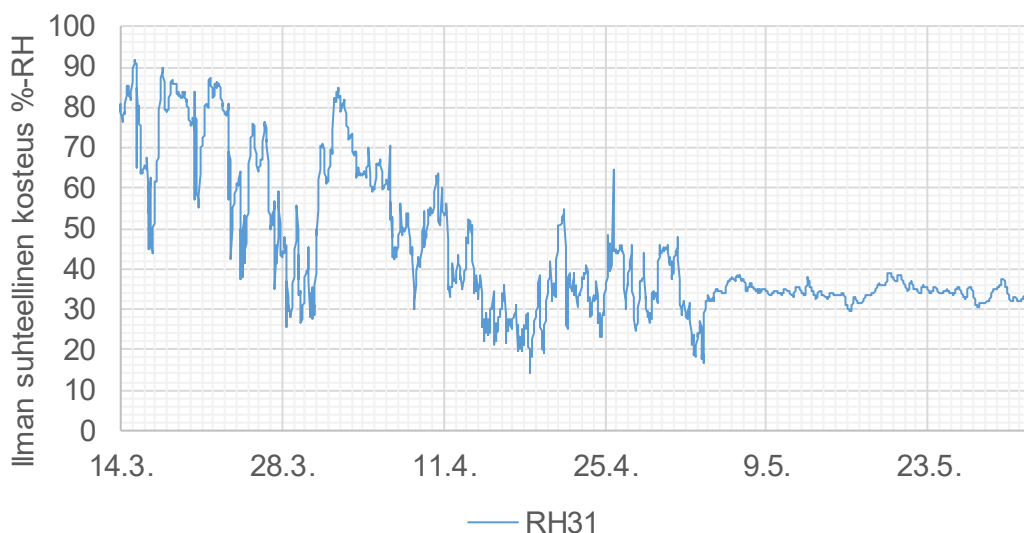


Kuva 30. Ilman suhteellisen kosteuden mittaustulos pisteessä 25.

Kaakkoispäädyn ulkoseinälevyn mittauspiste 5. kerroksessa Seinälevyssä porareikä läpi halkaisijaltaan 4,5 cm. Mittausanturi lähellä porareian ulkoreunaa, jossa olosuhteet lähellä ulkoilman olosuhteita. Tiivistetty porareian sisältä solumuovilla (leveys 2,5 cm) 2-3 cm ulkopinnasta ja polyuretaanimassalla. Toukokuun alussa mittauspisteen päälle asennettu julkisivuelementti lämmöneristeinen. Mittaustulokseen vaikuttaa viilupuun sekä lämmöneristetilän kosteus.



Kuva 31. Lämpötilan mittaustulos pisteessä 31.



Kuva 32. Ilman suhteellisen kosteuden mittaustulos pisteessä 31.



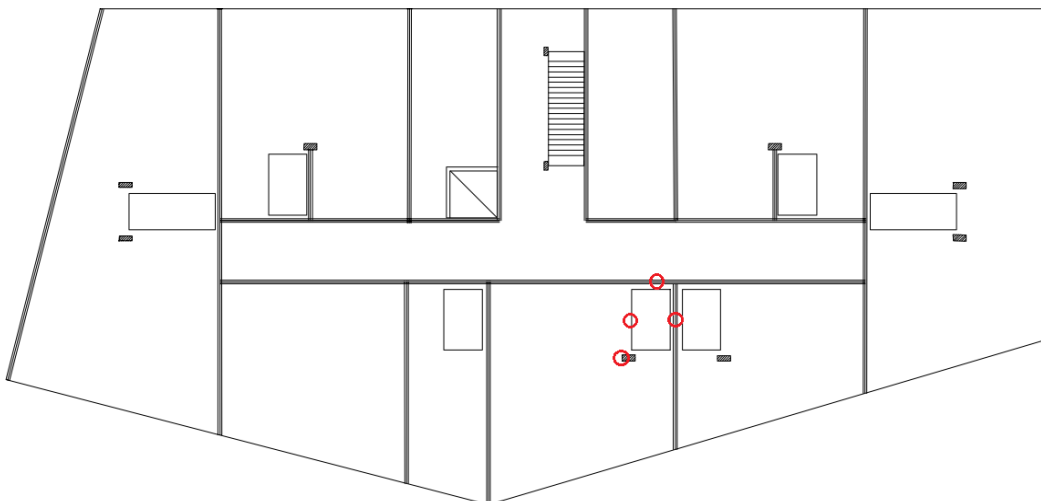
Kuva 33. Julkisivun alle jäävää mittausta varten toteutettu porareikä päädyn ulkoseinän läpi välipohjan kohdalla (12.4.2017).

LIITE D

Mittaustulokset RF SensIT:in toteuttamista mittauksista B-talossa

MITTAUSPISTEIDEN TOTEUTUS JA SIJAINTI

RF SensIT:in toteuttamat mittaukset on sijoitettu yhden kylpyhuoneen kohdalle eri kerroksiin ja jokaiseen kerrokseen on toteutettu neljä mittauspistettä. Mittauspisteistä yksi on olosuhdemittaus ja kolme rakennemittauksia. Mittauspisteet on sijoitettu sahatavararimaan välipohjajaelementin syvennykseen, porraskäytävään johtavan viemäriläpiviennin alapuolelle ja välipohjajaelementtien väliin. Syvennykseen tehtyä asennustapaa on muutettu viidennestä kerroksesta ylöspäin poraamalla mittauspiste viilupuupalkkiin. Viemäriläpiviennin alla asennustapa on kolmannessa kerroksessa muista poiketen asennettu pystysuunnassa. Lisäksi vesikatonlelle on toteutettu kattoelementtien lämmöneriste-onteloon kaksi mittauspistettä sekä yksi mittauspiste IV-konehuoneen alapuoliseen ilmatilaan. Kylpyhuoneet ja IV-konehuone ovat teräsrunkoisia tilaelementtejä. Mittaukset on porattu 50 millimetrin syvyyteen tai mahdollisuuden mukaan asennettu rakenneväliin suoraan.



Kuva 1 RF SensitIT:in mittauspisteiden sijainti B-talon 3.-8. kerroksen pohjapiirroksessa

OLOSUHDEMITTAUKSET

Olosuhdemittaukset toteutettiin eri kerrosten huoneistoihin mittausanturi liimapuupilariin pintaan kiinnittäen samalle pystylinjalle (Kuva 1, Kuva 2 ja Kuva 3).



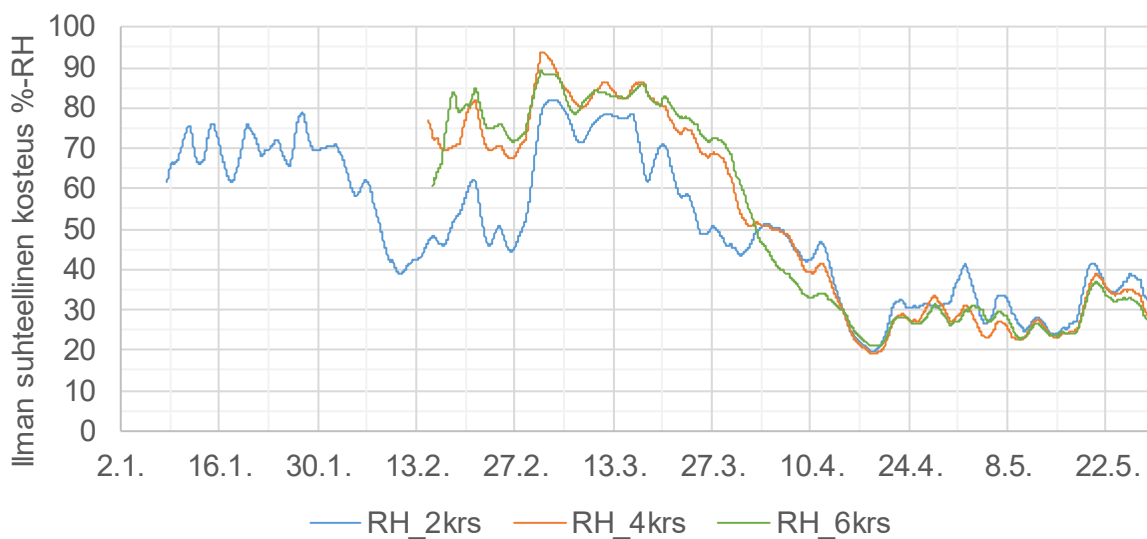
Kuva 2 Lähikuva RF SensIT:in toteuttaman olosuhdemittauksen anturi pilarin kyljessä kohteessa (RF SensIT Oy)



Kuva 3 RF SensIT:in toteuttaman olosuhdemittauksen anturi pilarin kyljessä kohteessa (10.2.2017)



Kuva 4 Lämpötilan mittaustuloksen 48 tunnin liukuva keskiarvo 2., 4. ja 6. kerroksesta



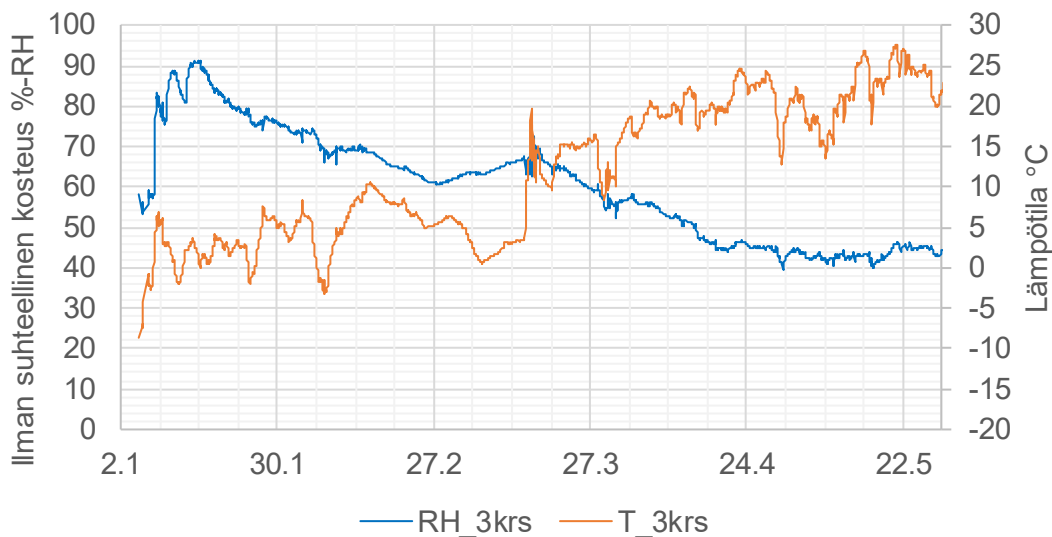
Kuva 5 Ilman suhteellisen kosteuden mittaustuloksen 48 tunnin liukuva keskiarvo 2., 4. ja 6. kerroksesta

VIEMÄRILÄPIVIENNIN ALAPUOLELLA

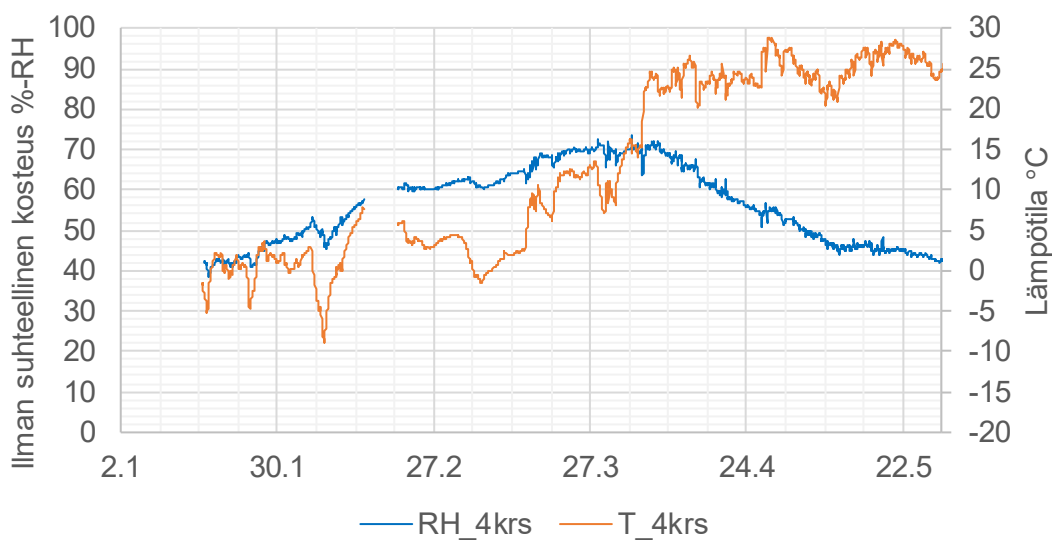
Viemäri­läpiviennin alapuolelle mittausanturi asennettiin porraskäytävän puolelta kylpyhuoneen kohdalla olevaan välipohjaelementtiin (Kuva 6). Mittauksen asennuksen sijainti tehtiin toisen ja kolmannen kerroksen väliseen välipohjaan ylhäältäpäin.



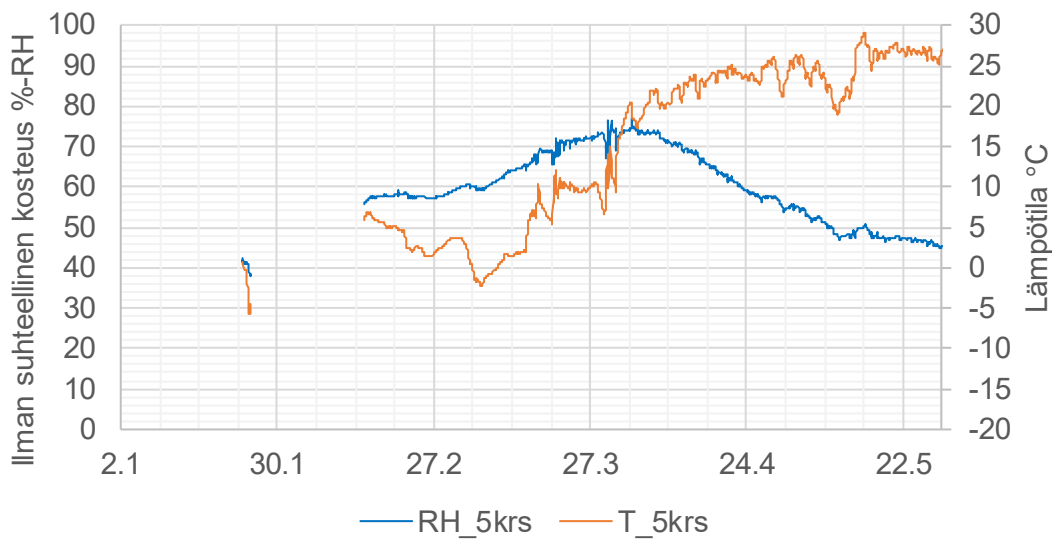
Kuva 6 Anturin asennuspaikan sijainti viemäri­läpiviennin alapuolella (RF SensIT Oy)



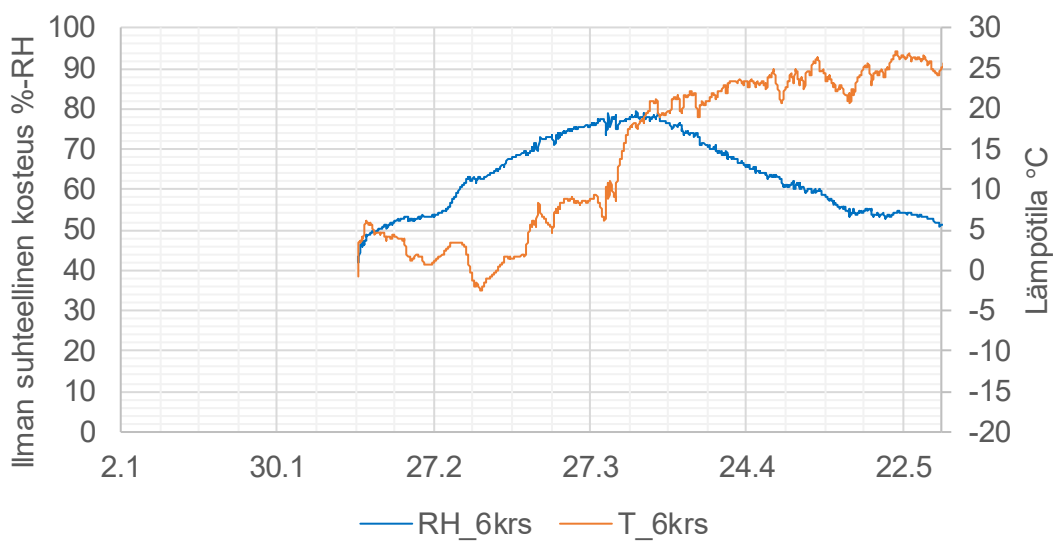
Kuva 7 Lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden mittauksen tulokset viemäri­läpiviennin alapuolelta 3. kerroksesta



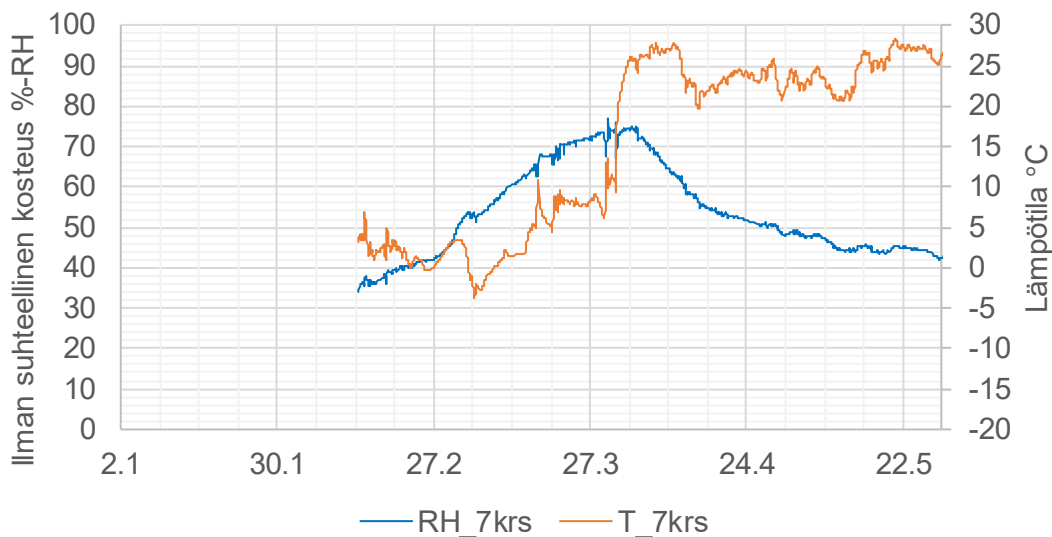
Kuva 8 Lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden mittauksen tulokset viemäri­läpiviennin alapuolelta 4. kerroksesta



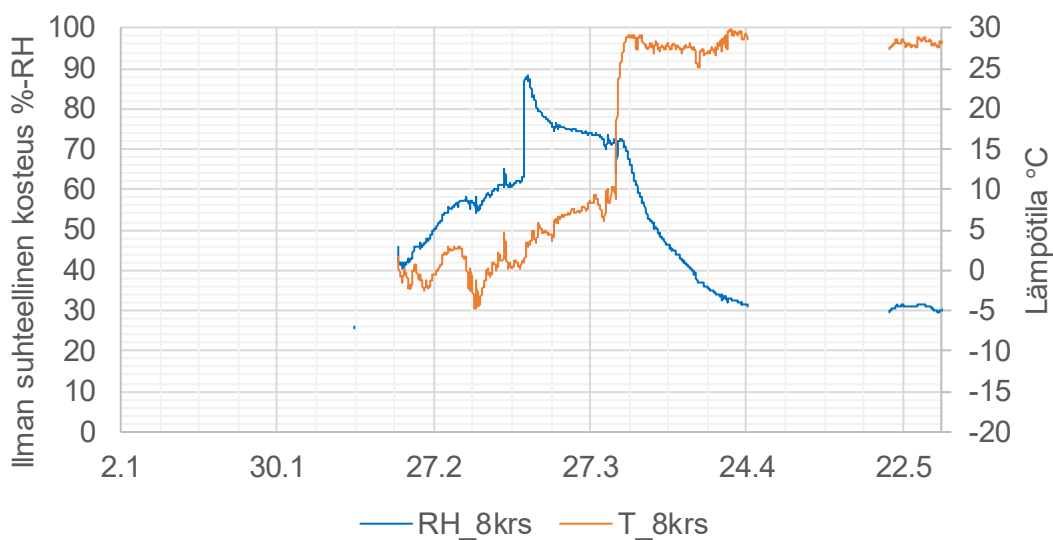
Kuva 9 Lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden mittauksen tulokset viemäriläpiviennin alapuolelta 5. kerroksesta



Kuva 10 Lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden mittauksen tulokset viemäriläpiviennin alapuolelta 6. kerroksesta



Kuva 11 Lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden mittauksen tulokset viemäriläpiviennin alapuolelta 7. kerroksesta

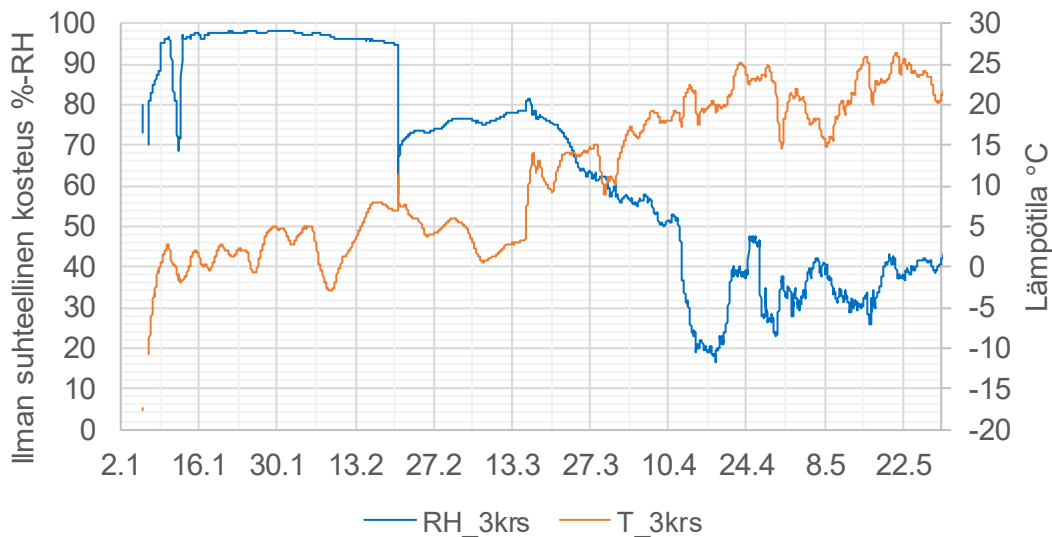


Kuva 12 Lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden mittauksen tulokset viemäriläpiviennin alapuolelta 8. kerroksesta

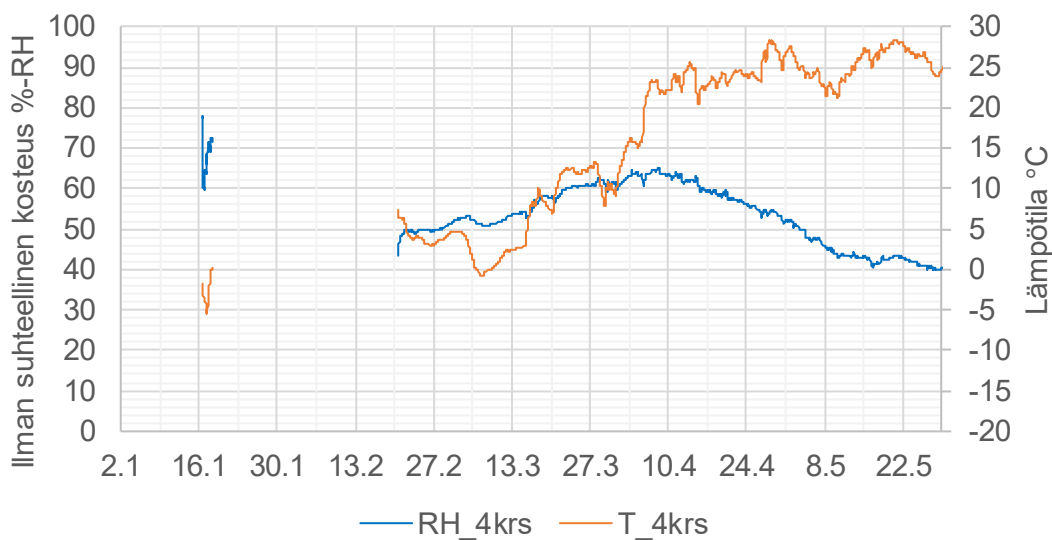
VÄLIPOHJAELEMENTTIEN VÄLIT



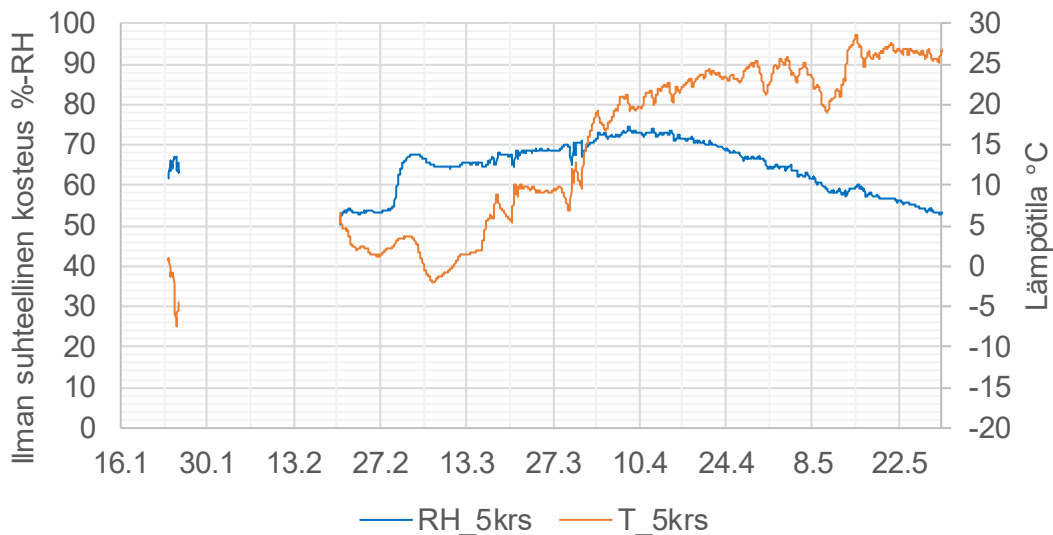
Kuva 13 Anturin asennuspaikan sijainti välipohjaelementtien välissä (RF SensIT Oy)



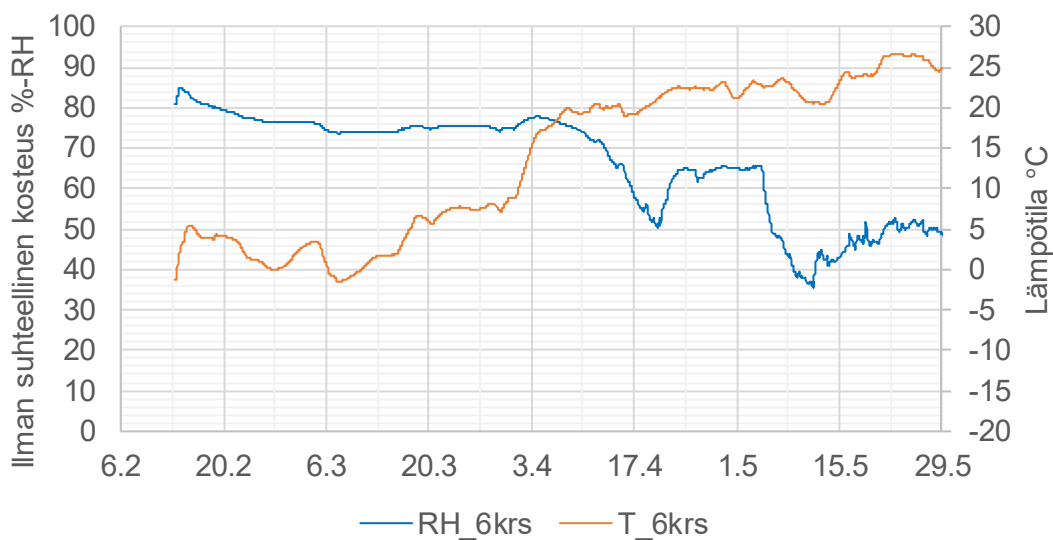
Kuva 14 Lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden mittauksen tulokset välipohjaelementtien välistä 3. kerroksesta



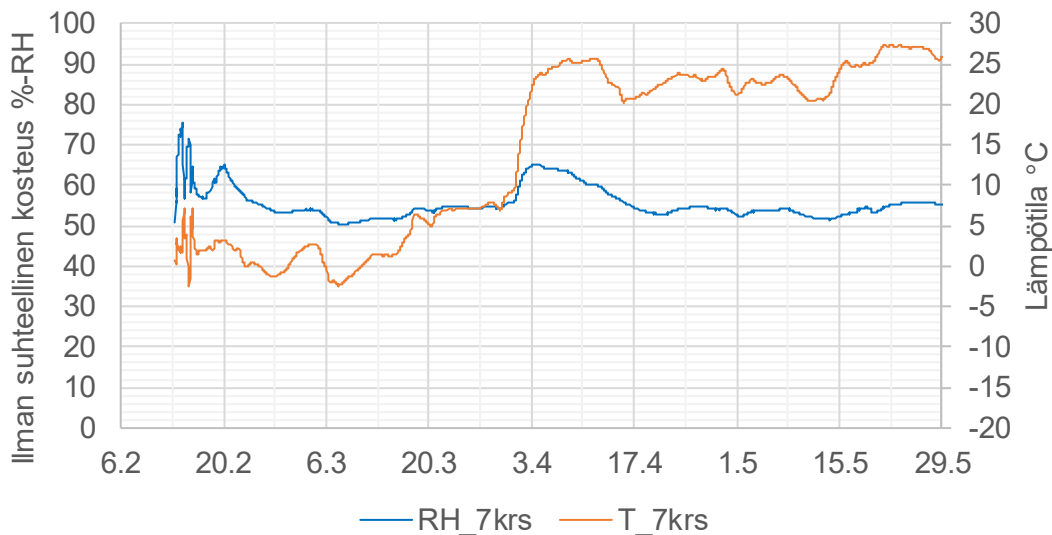
Kuva 15 Lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden mittauksen tulokset välipohjaelementtien välistä 4. kerroksesta



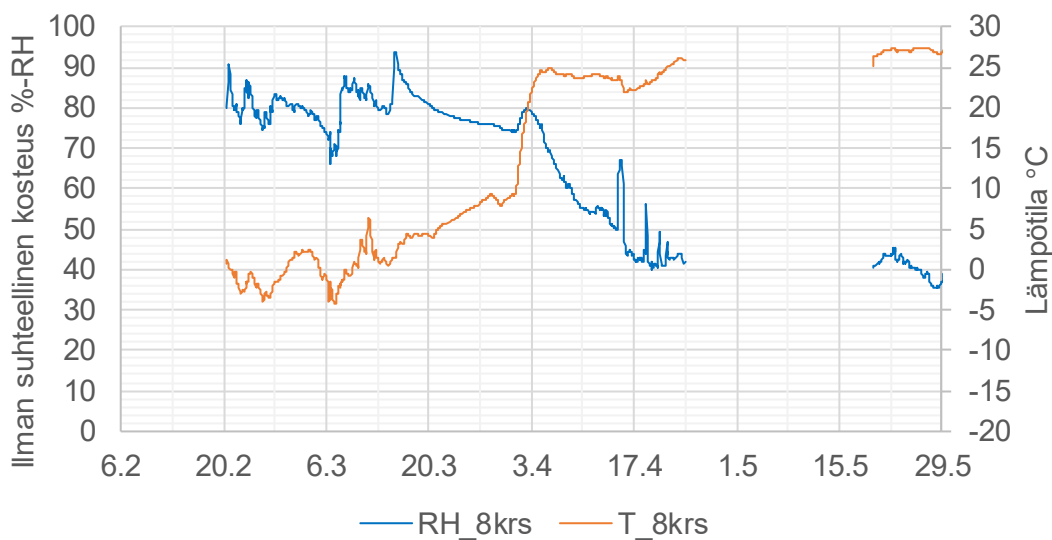
Kuva 16 Lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden mittauksen tulokset välipohjaelementtien välistä 5. kerroksesta



Kuva 17 Lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden mittauksen tulokset välipohjaelementtien välistä 6. kerroksesta

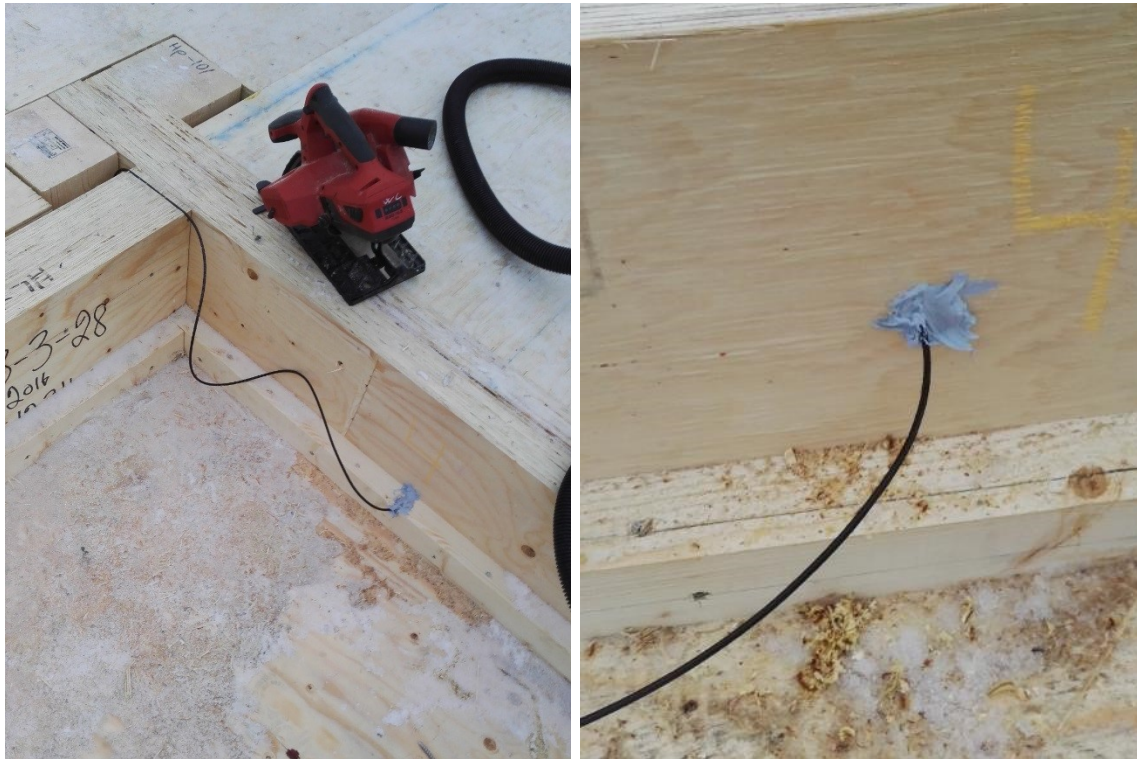


Kuva 18 Lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden mittauksen tulokset välipohjaelementtien välistä 7. kerroksesta

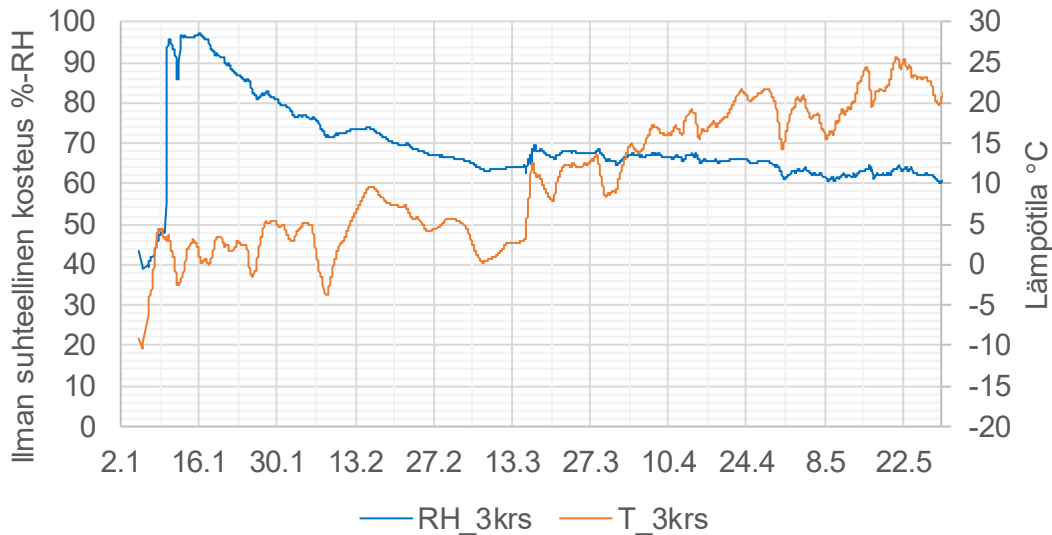


Kuva 19 Lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden mittauksen tulokset välipohjaelementtien välistä 8. kerroksesta

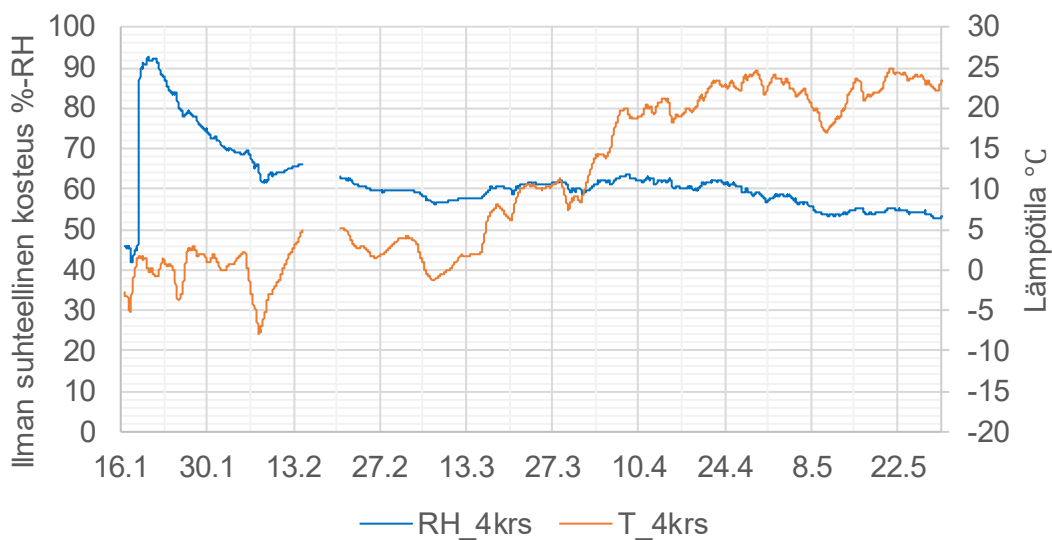
VÄLIPOHJAELEMENTTIEN SYVENNYKSET



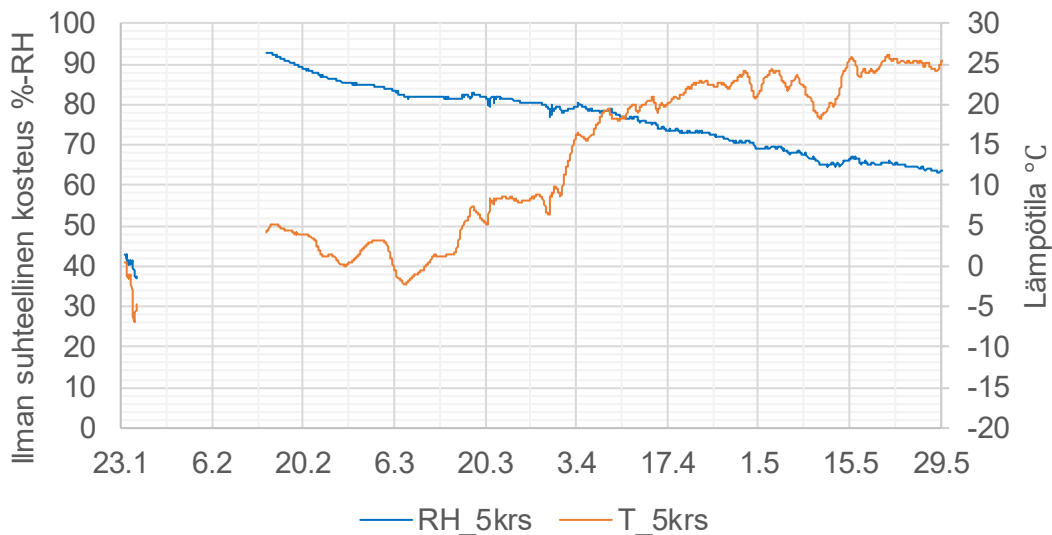
Kuva 20 Anturin asennuspaikan sijainti välipohjaelementtien välissä kerroksissa 3 – 4 (vas.) ja kerroksissa 5 – 8 (oik.) (RF SensIT Oy)



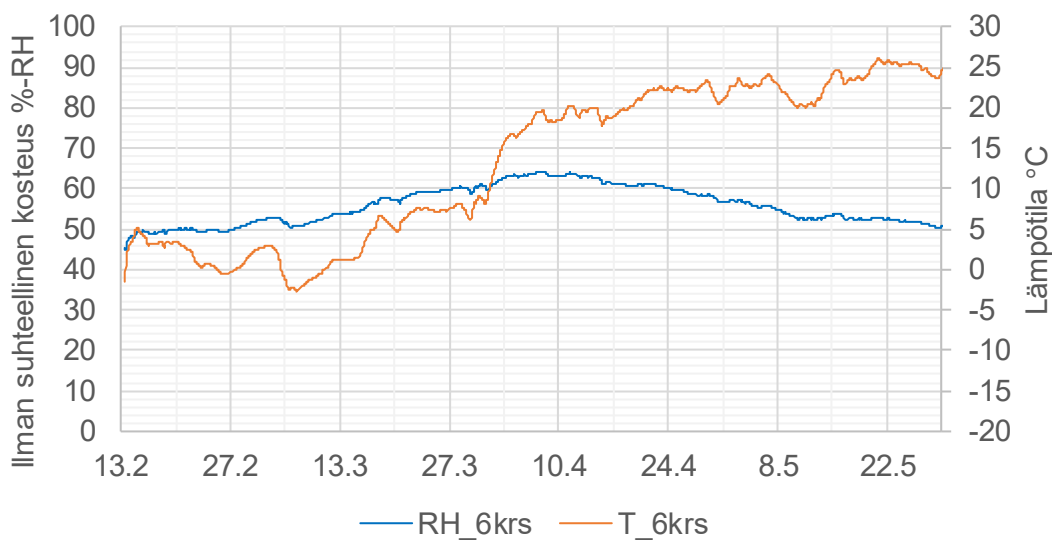
Kuva 21 Lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden mittauksen tulokset välipohjaelementtien syvennyksen rimasta 3. kerroksesta



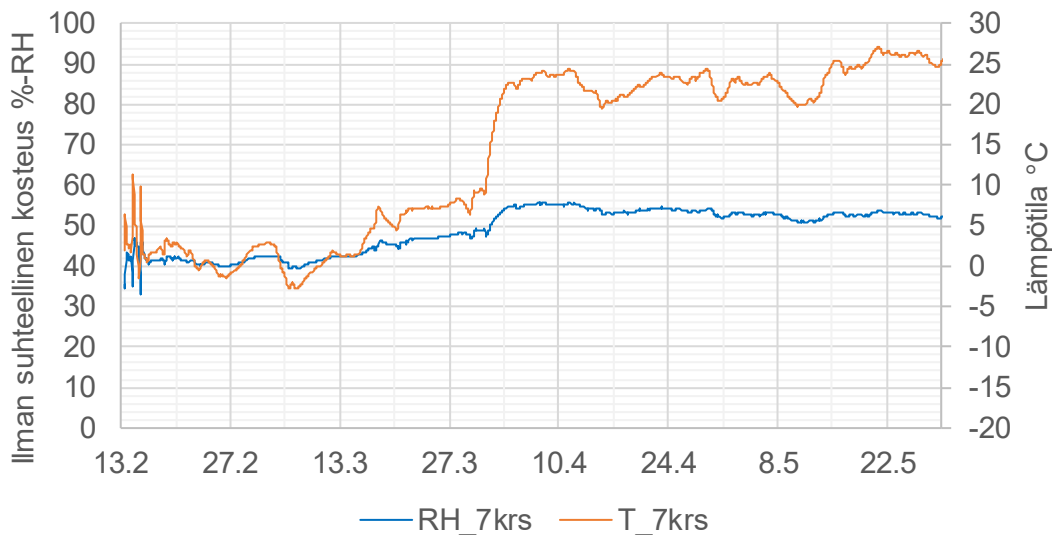
Kuva 22 Lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden mittauksen tulokset välipohjaelementtien syvennyksen rimasta 4. kerroksesta



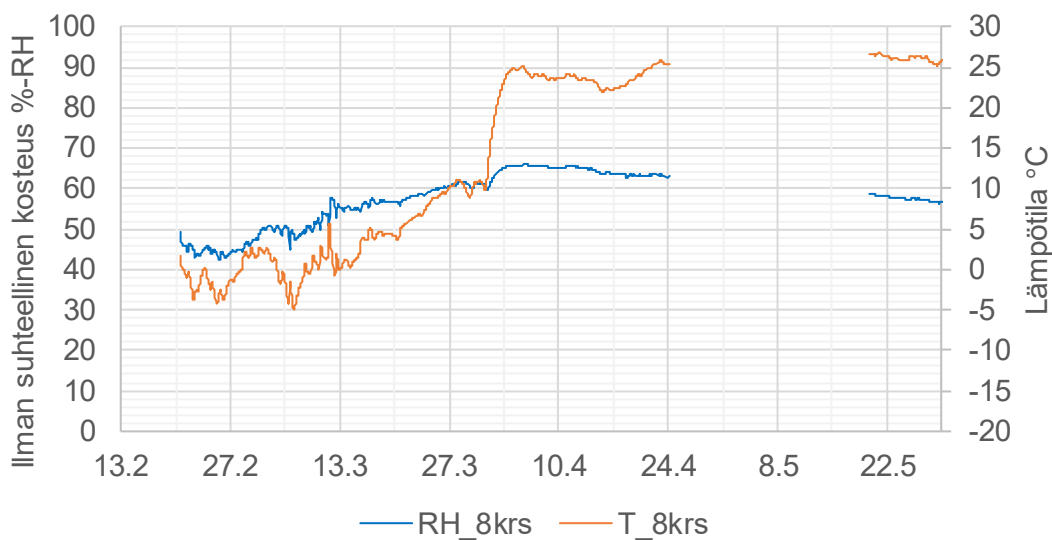
Kuva 23 Lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden mittauksen tulokset välipohjaelementtien syvennyksen rimasta 5. kerroksesta



Kuva 24 Lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden mittauksen tulokset välipohjaelementtien syvennyksen rimasta 6. kerroksesta

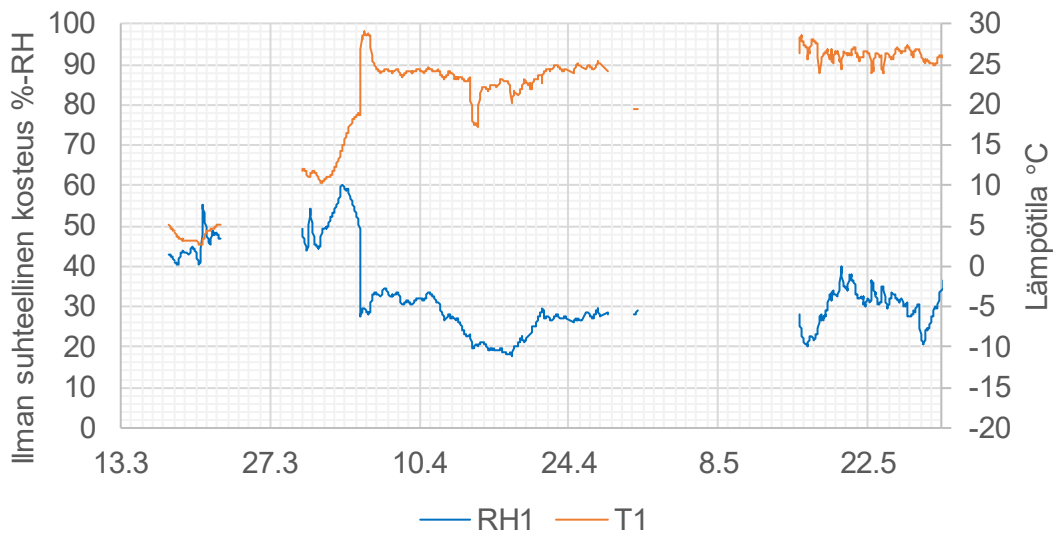


Kuva 25 Lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden mittauksen tulokset välipohjaelementtien syvennyksen rimasta 7. kerroksesta

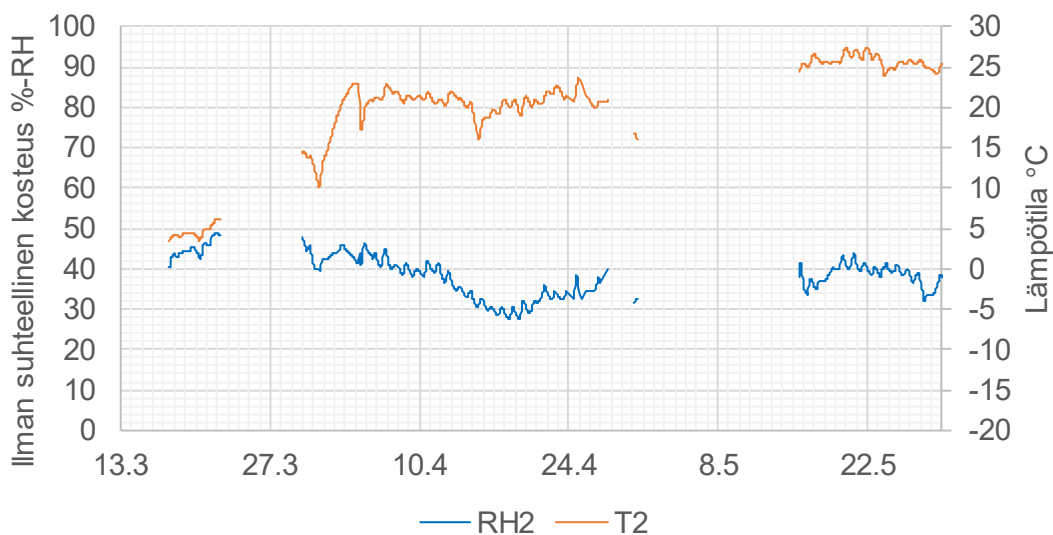


Kuva 26 Lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden mittauksen tulokset välipohjaelementtien syvennyksen rimasta 8. kerroksesta

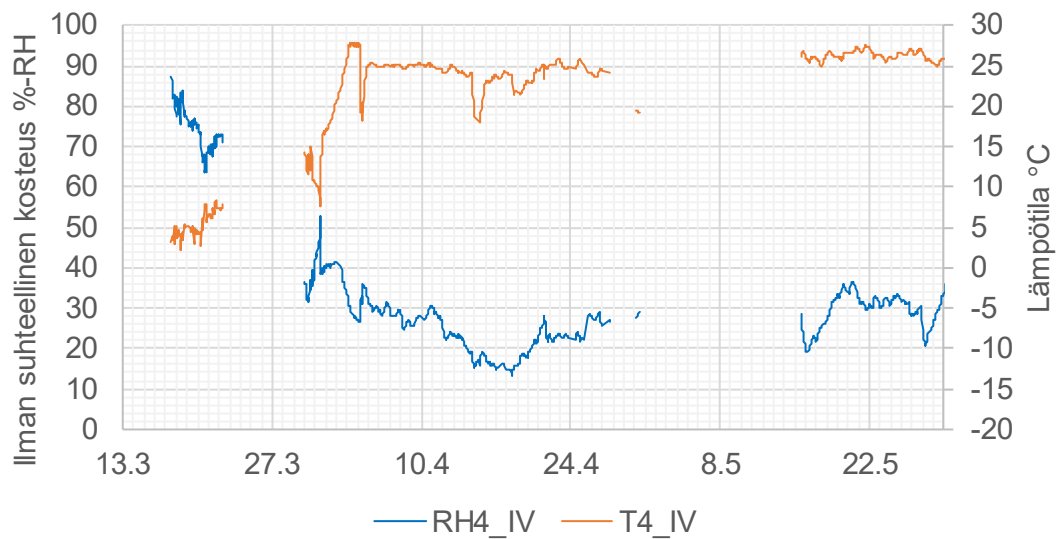
VESIKATON MITTAUKSET



Kuva 27 Lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden mittauksen tulokset vesikattoelementin lämmöneristeontelosta



Kuva 28 Lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden mittauksen tulokset vesikattoelementin lämmöneristeontelosta



Kuva 29 Lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden mittauksen tulokset IV-konehuoneen (tilaelementti) alapuolisesta ilmatilasta

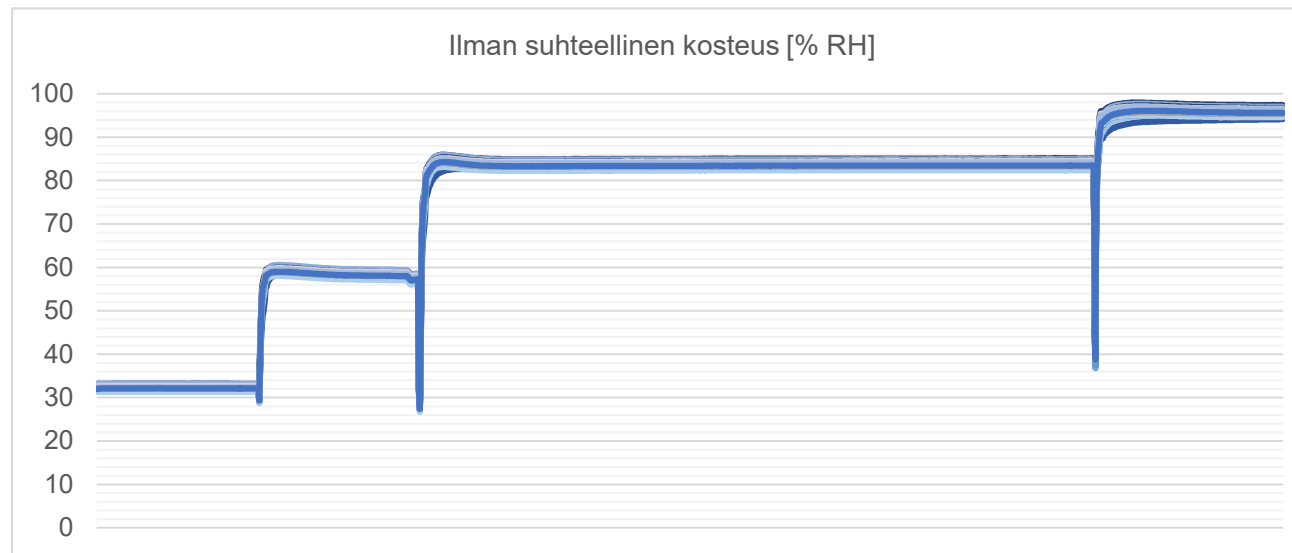
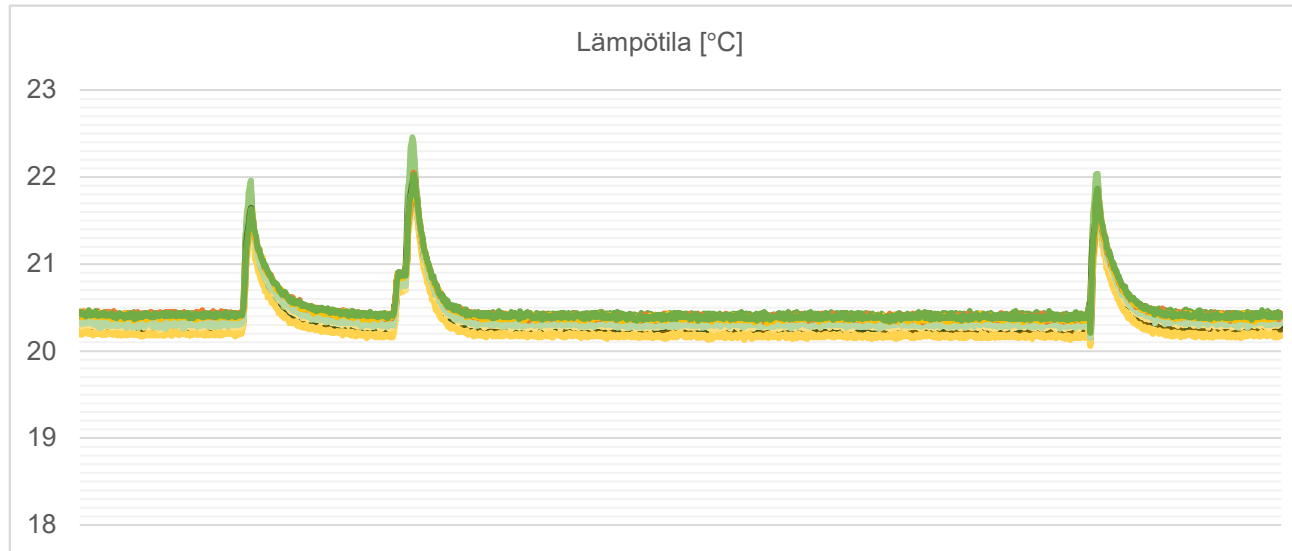
LIITE E

Mittalaitteiden jälkitarkistus 5.6.2017

Anturi	Mittaus	Referenssi	Anturi	Erotus	Ref	Anturi	Erotus	Ref	Anturi	Erotus	Ref	Anturi	Erotus
V3.2-1/0020105179	14 (6.3.-)	95,81	93,70	-2,11	83,72	81,65	-2,06	59,26	57,75	-1,51	33,02	32,34	-0,67
V3.2-1/0020105201	22	95,81	93,30	-2,51	83,72	81,26	-2,46	59,26	57,40	-1,85	33,02	31,88	-1,14
V1.2-0/0060204156	35	95,81	94,90	-0,91	83,72	82,69	-1,03	59,26	58,38	-0,87	33,02	32,72	-0,30
V1.3-1/0060264008	25	95,81	95,03	-0,78	83,72	82,58	-1,14	59,26	58,24	-1,02	33,02	32,45	-0,56
V1.4-1/0060326399	17	95,81	96,07	0,26	83,72	83,22	-0,49	59,26	58,55	-0,71	33,02	32,50	-0,52
V1.6-1/0060528159	28	95,81	98,30	2,49	83,72	83,33	-0,38	59,26	58,63	-0,63	33,02	32,90	-0,11
V1.6-1/0060528164	19	95,81	97,02	1,21	83,72	83,77	0,05	59,26	59,05	-0,21	33,02	32,71	-0,30
V1.6-1/0060528168	38	95,81	97,22	1,41	83,72	84,42	0,70	59,26	59,79	0,53	33,02	33,61	0,59
V1.6-1/0060528170	9	95,81	94,95	-0,86	83,72	82,93	-0,79	59,26	58,70	-0,55	33,02	32,88	-0,14
V1.6-1/0060528176	16	95,81	94,60	-1,21	83,72	82,56	-1,16	59,26	58,53	-0,72	33,02	32,92	-0,10
V1.6-1/0060528178	20	95,81	95,85	0,04	83,72	82,99	-0,72	59,26	58,55	-0,71	33,02	32,53	-0,49
V1.6-1/0060528192	27	95,81	96,77	0,96	83,72	83,33	-0,38	59,26	58,40	-0,85	33,02	32,53	-0,49
V1.6-1/0060537348	13	95,81	92,72	-3,09	83,72	80,76	-2,96	59,26	57,36	-1,90	33,02	31,97	-1,05
V1.6-1/0060537386	31	95,81	94,91	-0,90	83,72	82,81	-0,90	59,26	58,72	-0,53	33,02	32,69	-0,33
V1.6-1/0060537388	34 (-12.5.)	95,81	100,00	4,19	83,72	81,25	-2,47	59,26	56,80	-2,46	33,02	31,49	-1,53
V1.6-1/0060537405	15	95,81	93,67	-2,14	83,72	81,60	-2,11	59,26	58,17	-1,09	33,02	32,58	-0,43
V1.6-1/0060537406	33	95,81	92,31	-3,50	83,72	80,78	-2,94	59,26	57,50	-1,76	33,02	32,25	-0,77
V2.0-1/0060537380	7	95,81	95,78	-0,03	83,72	82,82	-0,89	59,26	58,54	-0,71	33,02	32,86	-0,16
V2.0-1/0060537419	8	95,81	94,65	-1,16	83,72	82,55	-1,17	59,26	58,30	-0,95	33,02	32,65	-0,37
V3.2-1/0020105062	14 (-6.3.)	95,81	95,60	-0,21	83,72	83,42	-0,30	59,26	59,06	-0,20	33,02	33,24	0,23
V3.2-1/0020105063	21	95,81	96,63	0,82	83,72	84,37	0,65	59,26	59,51	0,25	33,02	32,97	-0,05
V3.2-1/0020105064	4	95,81	96,44	0,63	83,72	84,19	0,48	59,26	59,71	0,45	33,02	33,76	0,75
V3.2-1/0020105076	39	95,81	94,42	-1,39	83,72	82,02	-1,70	59,26	57,60	-1,66	33,02	31,75	-1,26
V3.2-1/0020105187	24 (-21.3.)	95,81	94,70	-1,11	83,72	82,42	-1,29	59,26	57,53	-1,73	33,02	31,26	-1,76
	34 (12.5.-)												
V3.2-1/0020105189	1, 5 (2.2.-)	95,81	94,79	-1,02	83,72	82,46	-1,25	59,26	58,03	-1,22	33,02	32,26	-0,76
V3.2-1/0020105190	23	95,81	94,88	-0,93	83,72	82,72	-1,00	59,26	58,37	-0,88	33,02	32,51	-0,51

Mittalaitteiden tarkistusmittaus 21.12.2017

REF-1 V3.2-1/0020105924
REF-2 V3.2-1/0020105949
REF-3 V3.2-1/0020106539
V1.4-1/0060326399
V2.0-1/0060537419
V1.2-0/0060204156
V1.3-1/0060264008
V1.6-1/0060528164
V1.6-1/0060528169
V1.6-1/0060528170
V1.6-1/0060528176
V1.6-1/0060528177
V1.6-1/0060528178
V1.6-1/0060528179
V1.6-1/0060537348
V1.6-1/0060537405
V1.6-1/0060537406
V1.6-1/0060537407
V2.0-1/0060537380
V3.2-1/0020105062
V3.2-1/0020105063
V3.2-1/0020105076
V3.2-1/0020105179
V3.2-1/0020105187
V3.2-1/0020105188
V3.2-1/0020105190
V3.2-1/0020105201
V1.6-1/0060537388
V3.2-1/0020105064
V3.2-1/0020105189



Mittalaitteiden tarkastusmittaus 17.2.2017

REF-1 V3.2-1/0020105924

REF-2 V3.2-1/0020105949

REF-3 V3.2-1/0020106539

V1.6-1/0060537386

V1.6-1/0060528168

V1.6-1/0060528192

V1.6-1/0060528157

V2.0-1/0060537345

V1.6-1/0060528155

V1.6-1/0060528156

V1.6-1/0060537371

V1.6-1/0060528159

