

Energiatehokkaat elementti- ratkaisut arktisissa olosuhteissa

EFCONE 2015–2017



Energiätehokkaat elementtiratkaisut arktisisissa olosuhteissa

Alakunnas Tuomas & Pirttinen Valtteri (toim.)

Energiatehokkaat elementti- ratkaisut arktisissa olosuhteissa

EFCONE 2015-2017

Sarja B. Tutkimusraportit ja kokoomateokset 21/2017

© Lapin ammattikorkeakoulu ja tekijät

ISBN 978-952-316-196-2 (pdf)
ISSN 2489-2637 (verkkojulkaisu)

Lapin ammattikorkeakoulun julkaisuja
Sarja B. Tutkimusraportit ja kokoomateokset
21/2017

Rahoittajat: Tekes (EAKR), Lapin ammattikorkeakoulu, Betoniteollisuus ry, YBT, Paroc, Kingspan Insulation, Rovaniemen insinööritoimisto, Skaala

Toimittajat: Alakunnas Tuomas ja Pirttinen Valtteri
Kirjoittajat: Tuomas Alakunnas, Juha Autioniemi, Petri Kuisma, Niko Pernu, Valtteri Pirttinen, Antti Sirkka, Mikko Vatanen
Kansikuva: Tuomas Alakunnas
Taitto: Lapin AMK, viestintäyksikkö

Lapin ammattikorkeakoulu
Jokiväylä 11 C
96300 Rovaniemi

Puh. 020 798 6000
www.lapinamk.fi/julkaisut

Lapin korkeakoulukonserni



Lapin korkeakoulukonserni LUC on yliopiston ja ammattikorkeakoulun strateginen yhteenliittymä. Konserniin kuuluvat Lapin yliopisto ja Lapin ammattikorkeakoulu.
www.luc.fi

Sisällys

Tuomas Alakunnas

ESIPUHE	9
----------------	----------

Tuomas Alakunnas

PROJEKTIESITTELY	13
Yleistä	13
Tutkimusjärjestelyt	13

Petri Kuisma

TUTKIMUSKOHDE KOULUTUS- JA TYÖHYVINVOINTIKESKUS WELLEVI	15
Tausta	15
Tutkimusmahdollisuudet Wellevisissä.	16

Mikko Vatanen & Juha Autioniemi

NYKYAIKAISTEN BETONIELEMENTTIEN LÄMPÖ- JA KOSTEUSTEKNINEN TOIMINTA ARKTISISSA OLOSUHTEISSA – TUTKIMUSJÄRJESTELYT	19
Tutkimuksen tausta	19
Tutkimuksen rakennusfysikaalinen tausta	20
Tutkimusjärjestelyt	24
Lähdeluettelo	31

Mikko Vatanen, Juha Autioniemi & Valtteri Pirttinen

MITTAUSTULOKSIA NYKYAIKAISTEN BETONIELEMENTTIEN LÄMPÖTEKNISESTÄ TOIMINNASTA ARKTISISSA OLOSUHTEISSA	33
Johdanto	33
Elementtien lämpötekninen toiminta, mittaustulokset	34
Tulosten yhteenveto	44
Lähdeluettelo	44

Mikko Vatanen, Juha Autioniemi & Valtteri Pirttinen

**MITTAUSTULOKSIA NYKYAIKAISTEN BETONIELEMENTTIEN
KOSTEUSTEKNISESTÄ TOIMINNASTA ARKTISISSA OLOSUHTEISSA 45**

Johdanto	45
Elementtien kosteustekninen toiminta, mittaustulokset	46
Yhteenvedo	53
Lähdeluettelo	54

Tuomas Alakunnas

KÄYTTÖLIITTYMÄ MITTAUSTULOSTEN VISUALISOINTIIN 55

Visuaalinen ja intuitiivinen käyttökokemus	55
--	----

Valtteri Pirttinen

**ELEMENTTIEN LÄMPÖ- JA KOSTEUSTEKNISEN
TOIMIVUUDEN SIMULOINTI 59**

Johdanto	59
Simuloinnin lähtötiedot	59
Simuloidun ja mitatun mittaustulosten vertailu	64
US1 PAROC Cortex One	65
US1 PAROC Cortex One	66
Yhteenvedo	75

Valtteri Pirttinen

**ELEMENTTIEN LÄMPÖ- JA KOSTEUSTEKNINEN
SIMULOINTI PASSIIVITASON RATKAISUILLA 77**

Johdanto	77
Simuloinnin lähtötiedot	78
Passiivitaso ja simuloitujen mittaustulosten vertailu	81
Yhteenvedo	91

Valtteri Pirttinen

**ELEMENTTIEN LÄMPÖ- JA KOSTEUSTEKNINEN
SIMULOINTI TULEVAISUUDEN ILMASTOENNUSTEMALLEILLA 93**

Johdanto	93
Simuloinnin lähtötiedot	95
Lämpö- ja kosteustekniset tulokset	99
Homeindeksilaskennan tulokset	111
Johtopäätökset	112
Lähdeluettelo	113

Tuomas Alakunnas & Valtteri Pirttinen

**IKKUNOIDEN SYVYYSSUUNTAISEN SIOJITTAMINEN
BETONIELEMENTTISSÄ 115**

Johdanto	115
Simuloinnin lähtötiedot	116

Yleistä	116
Simuloitavat rakenteet	116
Simuloinnin tulokset	119
Johtopäätökset	137
Lähteet	137

Niko Pernu

RAKENTEEN TEHOLLISEN ERISTÄVYYDEN MITTAUS	139
Tausta	139
Tutkimusmenetelmä ja -järjestelyt	140
Tulokset	141
Johtopäätökset	146
Lähteet	147

Niko Pernu

RAKENTEEN KOSTEUDEN MITTAAMINEN PORAREIKÄMENETELMÄLLÄ	149
Johdanto	149
Tutkimusmenetelmä	150
Tulokset	152
Johtopäätökset	157
Lähteet	157

Antti Sirkka

LÄMPÖ- JA KOSTEUSTEKNISEN TOIMINNAN TARKASTELU CLT- JA BETONIRAKENTEISSA	159
Johdanto	159
Tarkasteltavat rakenteet	160
Tarkastelujakso	161
Lämpötekniinen toiminta	161
Kosteustekniinen toiminta	164

Tuomas Alakunnas, Valtteri Pirttinen & Mikko Vatanen

YHTEENVETO	165
KIRJOITTAJAT	169

Esipuhe

Energia on yksi rakennetun ympäristön arvokkaimmista resursseista ja sen tarpeeton tuhlaaminen on sekä vastuutonta että kallista. Rakennussektorin toiminta on yhteiskunnan energiankäytön tehostamisessa avainasemassa, sillä nykyisellä tasolla sen osuus energiankäytöstä on yli 40 % ja kasvihuonepäästöistä noin yksi kolmasosa.

Rakennusteollisuuden teettämän kyselytutkimuksen mukaan kuntapäätäjät kokivat koko rakennusalan keskeisenä kehittämistarpeena rakenteiden kosteusturvallisuuden kehittämisen. Vuonna 2013 rakennusmateriaalien ominaisuuksista tärkeimmiksi nousivat kosteusturvallisuus, pitkäikäisyys ja paloturvallisuus. Nykyisten määräysten mukaisia rakenteita on pitänyt toteuttaa viimeistään vuodesta 2010 alkaen.

Lapin Ammattikorkeakoulun Energy Efficient Concrete Structures in Arctic Environment eli EFCONE –projektissa tutkitaan Levillä, Kittilässä sijaitsevan betonielementtirakenteisen koulutus- ja työhyvinvointikeskus Wellevin lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa vuosien 2015-2017 välillä. Lisäksi tutkittiin ikkunoiden syvyyssuuntaisen sijoittamisen merkitystä ulkovaipan kosteus- ja lämpötekniiseen toimivuuteen sekä huurtumattomien ikkunoiden toimivuudesta osana elementtirakennetta.

Vastaavanlaisia tutkimusjärjestelyitä ei toteuteta yleensä käytännössä. Yleensä lämpö- ja kosteusteknistä toimivuutta tutkitaan laboratorio-olosuhteissa tai simuloimalla. Tästä syystä tutkimuskohteena toimiva Rovaniemen koulutuskuntayhtymän omistama koulutus- ja hyvinvointikeskus Wellevi tarjosi poikkeukselliset lähtökohdat tutkimuksen toteuttamiseksi. Tutkimuksellisuus huomioitiin rakennuksen suunnitteluvaiheessa ja näin ollen antureita pystyttiin sijoittamaan rakenteiden sisään. Suunnitteluvaiheessa korostui elinkaariajattelu. Se korostuu mm. tilojen muunneltavuuden ja energiaratkaisuiden osalta. Welleviä hyödynnetään myös jatkossa tutkimushankkeissa.

Projektin aikana mittausjärjestelmää laajennettiin tiedonsiirron ja datan käsittelyn automatisoinnilla sekä tulosten esittämiseen käytettävällä nettikäyttöliittämällä. Betonielementtien lämpö- ja kosteusteknisessä analysoinnissa huomioitiin kosteuden osalta eri siirtymismuodot sekä kosteuden aiheuttamat vaikutukset rakenteissa. Lämpötekniisessä toiminnasta havainnoitiin pääasiassa lämmönläpäisykerrointa sekä lämpötilajakaumaa rakenteessa.

Projekti käynnistettiin yritysosaapuolten tarpeesta, kun yritykset halusivat vastuullisina toimijoina todentaa nykyisten tuotteidensa kosteusturvallisuutta todellisessa

käyttöympäristössä. Kenttätutkimuksia rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisestä toimivuudesta on tämän jälkeen toteutettu kuitenkin vielä vähän. Tutkimuskohteen pohjoinen sijainti loi tutkimukselle omat erityispiirteensä. Kittilän korkeudella esimerkiksi vuosittainen pakkasmäärä (Kh) on noin kaksinkertainen Etelä-Suomen olosuhteisiin verrattuna ja vuosittaisissa keskilämpötiloissa on 5–6 °C ero (VTI, 2000).

Tähän artikkelikokoelmaan on kerätty projektin aikana tehdyt tutkimukset omiksi artikkeleiksi. Kokoelman alussa esitellään projektin tausta, osapuolet ja tutkimusympäristö. Wellevin rakenteiden tutkimusjärjestelyt esitellään Nykyaikaisten betonielementtien lämpö- ja kosteustekninen toiminta arktisissa olosuhteissa – tutkimusjärjestelyt -artikkelissa, jossa esitellään tutkimuksen tausta, teoria sekä tutkimusjärjestelyt. Tutkimusmenetelminä hyödynnettiin betonielementtien sisään asennettuja lämpö- ja kosteussensoreita, simulointimalleja ja kenttämittauksina suoritettuja teollisen U-arvon mittausta sekä kosteuden mittausta seinäelementeistä porareikämenetelmällä. Ikkunatutkimusosiossa hyödynnettiin Vaasan yliopiston osaamista ostopalvelun kautta.

EFONE-projektin tutkimusten tulosten perusteella voidaan todeta, että nykymääräysten mukaiset betonielementtirakenteen toimivat suunnitellulla ja kosteusteknisesti turvallisella tavalla myös Lapin olosuhteissa. Energiatohokkuuden parantaminen eristekerrosta lisäämällä ei myöskään näyttänyt aiheuttavan kosteusturvallisuudelle riskiä tutkimusten perusteella. Tutkimuskohteessa käytetyt rakenneratkaisut toimivat kahden vuoden mittausajanjakson ajan suunnitellulla tavalla, eikä riskiolosuhteita esiintynyt.

EFCONE-projektin päärahoittajana toimii Tekes (EAKR). Projektin rahoittajat ja tuloksia hyödyntävät osapuolet:

YBT Oy	Tutkittavien betonielementtien valmistaja ja asiantuntija
Betoniteollisuus Ry	Projektin tulosten tiedottaminen ja tiedon jalkauttaminen rakennusosalalle
Kingspan Insulation Oy	Tutkittavien polyuretaanieristeiden valmistaja
Paroc Oy	Tutkittavien kivillaeristeiden valmistaja
Skaala Oy	Tutkittavien ikkunoiden valmistaja ja asiantuntija
Rovaniemen insinööritoimisto Oy	Tutkittavien elementtien rakennesuunnittelu
Lapin ammattikorkeakoulu	Tutkimuksen toteutus, projektin koordinointi ja raportointi

Kuva 1. Hankkeen osapuolet ja roolit

EFCONE-projektin johtoryhmän puheenjohtaja Juha Alapuranen YBT Oy:sta totesi: ”Lähdimme mukaan, kun tällainen tilaisuus koitti Lapin ammattikorkeakoulun aloitteesta. Tämä oli yrityksille ainutlaatuinen tilaisuus todentaa omien tuotteidensa toimivuus todellisessa ympäristössä. Esimerkiksi eristeiden toimivuutta tutkitaan yleensä laboratorioissa. Tässä hankkeessa on hyvää myös se, että päästään testaamaan eri vuodenaikoina ja voidaan huomioida ilmansuuntien vaikutukset.”

Kiitämme EFCONE-projektin aktiivista johtoryhmää tutkimuksen suuntaamisesta. Haluamme myös kiittää projektin työryhmää, johon kuuluivat Lapin ammattikorkeakoulun tutkimusryhmät Arctic Civil Engineering, Arctic Power ja ohjelmistotekniikan laboratorio pLab sekä muita omalla panoksellaan projektiin osallistuneita ja sen toteuttamista edistäneitä henkilöitä.

24.8.2017 Rovaniemellä

Tuomas Alakunnas, projektipäällikkö, Lapin ammattikorkeakoulu

Projektiesittely

YLEISTÄ

EFCONE (Energy Efficient Concrete Structures in Arctic Environment) Energiatehokkaat elementtiratkaisut arktisissa olosuhteissa –projekti käynnistyi vuoden 2015 alussa. Projektin tarkoituksena on nykymääräysten mukaisten betonielementtien lämpö- ja kosteusteknisen toimivuuden varmentaminen todellisissa olosuhteissa. Rakennusteollisuuden teettämän kyselyn perusteella voidaan nähdä tuotteiden kosteusturvallisuuden merkityksen olevan tärkeämpi ominaisuus kuin tuotteen hinta. Ratkaisemalla kosteusturvallisuuteen liittyviä haasteita, osallistujayritykset parantavat kilpailukykyään suositamalla todennettuja kosteusturvallisia rakenneratkaisuja liiketoiminnassa. Projektin myötä elementtivalmistajat ja täydentävien rakenneosien (ikkunat, ovet) valmistajat saavat tutkittua tietoa rakenneosien ja elementtien liitosten merkityksestä kokonaisuuteen.

Rakenteiden kokonaispaksuus on kasvanut kiristyneiden lämmönläpäisyvaatimusten myötä. Tutkimusprojektin taustalla on rakennusteollisuuden tarve todentaa nykyisten elementtien kosteusturvallisuus käytännössä. Vastaavan tyyppisistä julkista tutkimuksista ei ole juurikaan toteutettu aiemmin. Lisäksi projektin keskeisenä tavoitteena on selvittää uudentyyppisten energiatehokkaiden ikkunoiden syvyysuuntaisen sijoittamisen vaikutuksia elementtien lämpö- ja kosteustekniseen toimivuuteen.

TUTKIMUSJÄRJESTELYT

Tutkimuskohteena toimii Rovaniemen koulutuskuntayhtymän omistama koulutus- ja työhyvinvointikeskus Wellevi Kittilän Levillä. Projektin tutkimusjärjestelyt ovat poikkeukselliset. Tutkimuskohteen rakennusvaiheessa betonielementteihin asennettiin kolmelle tai neljälle eri syvyydelle lämpö- ja kosteusanturit riippuen elementtityypistä, ja neljälle eri korkeudelle. Tutkimuskohteessa on viisi eri tyyppistä elementtiä kahteen eri ilmansuuntaan. Kaikkien elementtien lämmöneristävyuden suunnitteluarvot ovat saman tasoiset. Lisäksi selvitettiin ikkunoiden syvyysuuntaisen sijoittamisen merkitystä ulkovaipan kosteus- ja lämpötekniiseen toimivuuteen. Tutkimuksessa hyödynnettiin neljää erillistä menetelmää lämpö- ja kosteusteknisen toimivuuden varmentamiseksi;

1. Elementtikohtaiset lämpö- ja kosteustekniset mittaukset
2. Seinäelementtien ja ikkunarakenteiden lämpö- ja kosteustekniset simuloinnit
3. Toiminnallisen U-arvon mittaus seinäelementeistä
4. Kosteusmittaukset porarei'istä

Mitatun tiedon tueksi toteutettiin simulaatiomallit kaikista kohteen viidestä elementtityypistä. Simulaatiomallien avulla tutkittiin elementtien toimivuutta passiivitaso rakenteina Kittilän olosuhteissa sekä ilmastonmuutoksen vaikutuksia ilmasto-
mallien avulla. Elementeistä mitattua dataa varmennettiin myös ulkopuolisilla lämpö- ja kosteusmittauksilla porarei'istä.



Kuva 2. Tutkimuskohde Wellevi Kittilän Levillä.

Projektin tulosten hyödyntäminen

Projektin tulosten avulla lisätään betonieollisuuden tietotaitoa betonielementtien energiatehokkuutta parantavien ratkaisujen vaikutuksesta elementtien rakennusfysikaaliseen toimintaan erityisesti kosteusturvallisuuden näkökulmasta. Lisäksi edistetään uudentyypisten rakenneosien (ikkunat) ja betonielementtien yhteistoimivuutta ääriolosuhteissa.

Projektin suunnitteluvaiheessa määriteltiin seuraavia tavoitteita projektille:

- Mittausjärjestelmä ja visualisointi elementtien ja rakenneosien toiminnan seurantaan
- Tutkittua tietoa betonielementtien ja rakennuksen vaipan energiatehokkuutta parantavien ratkaisujen vaikutuksesta rakennusfysikaaliseen toimintaan Lapin olosuhteissa
- Analyysi riskiolosuhteista uuden tyyppisille betonielementeille
- Analyysi rakenneosien ja elementtien liitoskohtien toiminnasta
- Ikkunoiden syvyysuuntaisen sijoittamisen merkitys kosteus- ja lämpötekniiseen toimivuuteen
- Huurtumattomien ikkunoiden toimivuus osana elementtirakennetta
- Analyysi betonielementtien rakennusfysikaalisesta toiminta arktisissa olosuhteissa

Tutkimuskohde koulutus- ja työhyvinvointikeskus Wellevi

TAUSTA

Vahvassa kehitysvaiheessa olevan maakunnan ja sen toimijoiden kehittyminen edellyttää jatkuvaa kilpailuetujen etsimistä niin kansallisessa kuin kansainvälisessäkin kilpailussa. Tätä monitahoista ja pitkäjänteistä kehittämistyötä voidaan tutkia eri toimijoiden kanssa. Kylmissä olosuhteissa suoritettujen testauksien avulla pyritään varmistamaan teknologian asetetut tekniset vaatimukset ääriolosuhteissa. Tähän haasteeseen Levin koulutus- ja työhyvinvointikeskus tarjoaa erinomaiset mahdollisuudet.

Testauskeskukseen on tarkoitus rakentaa kattava mittaus teknologian keskittymä. Keskitettyjen tuloksia tullaan hyödyntämään sekä perusopetuksen että ylempien ammattikorkeakoulun opinnäytetöissä. Kiinnostuksen testausympäristön hyödyntämiseen ovat osoittaneet Aalto yliopisto, Tampereen teknillinen yliopisto, Oulun yliopisto, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Vaasan yliopisto, Lapin Yliopisto, Geologinen tutkimuskeskus ja Valtion teknillinen tutkimuskeskus Espoon yksikkö. Yliopistojen päämäärä on väitöskirja tasoisten tutkimusten julkaisu.

Opinnäytetöiden lisäksi Levin testauskeskusta tullaan hyödyntämään perusopetuksessa erilaisten projekti- ja harjoitustöissä. Keskus mahdollistaa hyvin opetuksen integroinnin T&K-toimintaan. Yritykset ovat valmiita testaamaan omia tuotteitaan esim. eristevalmistajat, maalämpöpumppuvalmistajat jne. Testausympäristön avulla tullaan lisäämään ammattikorkeakoulun osaamista kylmissä olosuhteissa suoritetuissa testauksissa.

Koulutus- ja työhyvinvointikeskuksen rakennushanke toteutettiin Rovaniemen koulutuskuntayhtymän rakentamisohjelman mukaisesti vuosina 2010-2014. Hankkeen rakentamisen aikataulu oli vuosille 2010 - 2012, sovittiin, että valmiusastetta arvioidaan hankkeen edetessä. Rakentamisen kokonaisaika oli n. 2,5 vuotta. Rakennuttaja käynnisti elokuussa 2010 tontin raivauksen. Syksyn 2010 aikana tehtiin maansiirtotyöt, salaojitus, perustukset ja routaeristys.

Hankkeeseen sisällytettiin kolme ohjaavaa tekijää:

1. Rakennushanke tuli toteuttaa pääosin Lapin ammattipiiston tuotantoalan Sodankylän, Kittilän ja Rovaniemen opiskelijoiden suorittamana työnä.
2. Hankkeeseen oli liitettävä tutkimusosio yhteistyötahoineen ja rahoituksineen.
3. Hanke liitettiin Rovaniemen koulutuskuntayhtymän energiansäästösuunnitelmaan.

Rovaniemen koulutuskuntayhtymän hallitukselle esitettiin tutkimusosion yhteistyötahot, suunniteltu rahoitus ja rakennuspiirustukset keväällä 2010 ja hallitus myönsi samalla keväällä luvan hankkeen rakentamistöiden aloittamiselle. Tutkimusosioon liit-tyvä rahoitus määriteltiin erikseen hankkeen edistyessä. Hankkeen viralliseksi nimeksi sovitaan asiakirjoissa Koulutus- ja työhyvinvointikeskus Levi, josta myöhemmin alettiin käyttämään nimitystä Wellevi. Kiinteistöjohtaja toimi hankkeen vastuullisena johtajana, joka hyväksyi suunnitteluun, kustannuksiin, tutkimusosioon ja toteutukseen liittyvät ratkaisut ja päätökset. Hankkeeseen nimitettiin projektipäällikkö, joka ohjasi hanketta kiinteistöjohtajan määrittelemän tehtäväluettelon mukaisesti ja raportointi tuli suorittaa kiinteistöjohtajalle.

Rakennushankkeen suunnitelmissa tuli huomioida rakentamiseen liittyvät määräykset ja suunnitteluratkaisujen nykyaikaisuus. Suunnitelmissa oli myös huomioitava erityisesti opetuksellisuus, tutkimusosion perusteet ja energiataloudellisuus. **Sovittiin, että tutkimusosion on oltava aina osana valittavia suunnitteluratkaisuja.**

Kiinteistö sijaitsee Levijärven rannalta noin 2 km:n päästä Levin keskustasta. Rakennus muodostuu kolmesta osasta. Kiinteistön rakentamiseen liittyvän tutkimusosion tarkoituksena on hyödyntää rakennettavaa kiinteistöä tutkimus- ja kehitystoiminnassa. Esimerkiksi yksi huoneistoa (a 15 m²) on rakennettu siten, että huoneiston seinät vastaavat ulkoseinän asettamia määräyksiä, näin varmistetaan eristeiden ja ikkunoiden yms. vaihtaminen kylmänä vuoden aikana häiritsemättä kiinteistön muuta samanaikaista käyttöä.

Kiinteistö tulee palvelemaan eri tutkimusorganisaatioiden tutkimustarpeita. Uusiutuvan energian osalta kattorakenteet on varustettu asianmukaisilla laitteistoilla esim. eri aurinkokeräinmallien testaamiseksi. Samoin on varustettu myös maalämmityksen ja ilmanvaihtokoneiden ympäristö. Tavoitteena on, että Levin tutkimusympäristö perustuu pitkäkestoiisiin tutkimuksiin kylmissä olosuhteissa. Tarkoituksena on, että yhtä tuotetta esim. maalämpöpumppua testattaisiin yhtäjaksoisesti useamman vuoden mittainen jakso, jonka jälkeen se vaihdettaisiin toiseen malliin. Tutkimuksien tehtävänä on selvittää pitkäkestoisten tutkimusten avulla laitteiden toimintaa luonnollisissa olosuhteissa ja näin kehittää laitteiden tuotekehitystä. Tiedot kerätään keskitetysti tutkimus-huoneistoon analysoitavaksi. Tarkoituksena on hyödyntää nykyaikaisia etätyökaluja siten, että tutkijoiden, opinnäytetöiden tekijöiden yms. ei tarvitsisi olla jatkuvasti läsnä Levillä vaan tulosten analysointi tapahtuisi omalla varsinaisella työpaikalla.

TUTKIMUSMAHDOLLISUUDET WELLEVISSÄ

Suomessa ei ole tällä hetkellä Levin tutkimuskeskuksen kaltaista testausympäristöä. Kylmän ilman alan olosuhteita ei tarvitse erikseen rakentaa, vaan Lapin ympäristö tarjoaa valmiin laboratorion, jonka kiinnostus tulee olemaan suuri myös Suomen rajojen ulkopuolellakin.

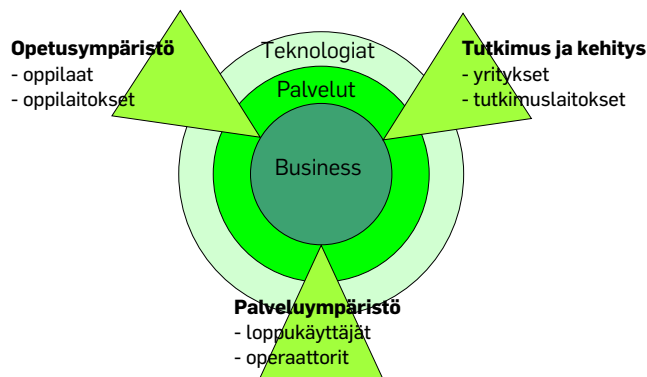
Levin koulutus- ja työhyvinvointikeskuksen tehtävänä on harjoittaa ammattikorkeakouluopetusta palvelevaa sekä työelämää ja aluekehitystä tukevaa ja alueen elinkeinorakenteen huomioon ottavaa soveltavaa tutkimusta ja kehittämistoimintaa. Levin koulutus- ja työhyvinvointikeskuksen tutkimus ja kehittämistoiminta perustuu monialaisen korkeatasoisen osaamisen synergiaan ja maakunnan kehittämisen kannalta oikeisiin strategisiin valintoihin. TKI-toiminnan vahvistamisen perustana on opiskelijoiden oppimistarpeet, henkilöstön monialaisen osaamisen jatkuva ylläpitäminen ja kehittäminen. Tätä tukee suunnitelmallinen ja tulevaisuutta ennakoiva avarakatseisuus sekä tehokas verkottuminen työelämän, kansallisen ja kansainvälisten toimijoiden ja tiedemaailman kanssa.

Tässä strategiassa tutkimuksella ja kehittämistoiminnalla tarkoitetaan yhteistyössä asiakkaan kanssa tai asiakkaan aloitteesta tai tarpeesta toteutettua toimintaa, jossa uutta tietoa, tutkimusta ja/tai kokemusta hyödynnetään uusien tuotteiden, palvelujen, tuotantoprosessien tai menetelmien luomiseen tai olemassa olevien parantamiseen.

Koulutus- ja työhyvinvointikeskuksen tehtävät:

1. toimia aktiivisesti alueen strategiatyössä
2. tukea alueellisten strategioiden toteutumista
3. toimia aktiivisesti alueen innovaatioverkostoissa
4. kehittää ja monipuolistaa yrittäjyyttä ja yritystoimintaa
5. nostaa alueen koulutus- ja osaamistasoa
6. nostaa alueen teknologista tasoa
7. kehittää inhimillisiä voimavaroja
8. vahvistaa maakunnan imagoa korkeakoulumaakuntana sekä
9. vahvistaa Lapin ja ympäristöalueiden imagoa elinvoimaisena ja hyvinvoivana alueena.

Kuvassa 3 on esitetty oppimis-, palvelu- ja tutkimus- ja kehitysympäristön rajapinnat. Oppimisympäristö tarjoaa koulutusta omalle henkilökunnalle ja asiakkaille mm. opinnäytetöitä. Palveluympäristö tarjoaa asiakkaille teknologisesti innovatiiviset ko-



Kuva 3. Oppimis-, palvelu- ja tutkimus- ja kehitysympäristön rajapinnat

kous- ja virkistystilat. Tutkimus- ja kehitysympäristö tarjoaa mahdollisuuden suorittaa pitkäaikaiskokeita kylmissä olosuhteissa.

Tutkimusosion tavoitteet:

- luodaan kansallisesti kuin kansainvälisesti arvostettu kylmissä olosuhteissa toimiva testauskeskus
- rakentamiseen liittyvän tekniikan oppimista ja kehittämistä tukevat fyysiset oppimis- ja kehittämissympäristöt koulutuksen eri tasoille
- ammattikorkeakoulun toteutusedellytykset ovat uusiutuvan energian ja energiatehokkuuden osalta valtakunnan huipputasoa
- ammattikorkeakoulun vetovoimaisuus kasvaa testausympäristön tuomien mahdollisuuksien kautta.
- verkostoidutaan arvostetuksi tutkimuskeskukseksi

Levin koulutus- ja työhyvinvointikeskuksen keskeinen tutkimusosio on energiatehokkuus. Kiinteistö luo hyvät mahdollisuudet tutkia mm. rakennusteknisten ratkaisujen ja uusien energiamuotojen tuomia mahdollisuuksia esim. energian säästämisesä. Levin hanke on saanut laajan kiinnostuksen yliopistojen, ammattikorkeakoulujen, tutkimuslaitoksien ja yritysten keskuudessa. Lapin ammattikorkeakoulu on matkailuun keskittyvä pohjoinen aluevaikuttaja. Levin keskus tulee palvelemaan Lapin AMK:n, LKKK:n ja Lapin energiastrategian kärkihankkeiden tavoitteita. Tutkimuslaitoksilta on saatu kirjallinen kuvaus heidän tutkimusosioista.

Alustavasti on sovittu, että seuraavia asioita tullaan tutkimaan:

- eriste-, ikkuna-, ovi- ja ilmanvaihtoratkaisujen vaikuttavuutta energiatehokkuuden parantamiseksi.
- uusien energiamuotojen optimointi tehokkaaksi kokonaisuudeksi pientaloissa
- uusien energiamuotojen avulla saatava rakennuksen jäähdytys kesäaikana
- betonirakenteissa muodostuneen kosteuden analysointi rakennetta rikkomattomilla mittausmenetelmillä
- sisäilman laatuun vaikuttavia tekijöitä
- talotekniikan tuomat mahdollisuudet tiedonkeräämisessä ja energiatehokkuudessa
- maaperän lämpövuon tutkiminen

Esimerkiksi EFCONE-hankkeessa tutkittavat betonielementit varustettiin anturoimalla rakennus jo rakennusvaiheessa mittauslaitteistolla rakenteiden käyttäytymisen selville saamiseksi.

Nykyaikaisten betonielementtien lämpö- ja kosteustekninen toiminta arktisissa olosuhteissa – tutkimusjärjestelyt

TUTKIMUKSEN TAUSTA

Koko rakennusalan keskeisenä kehittämistarpeena on rakenteiden kosteusturvallisuuden kehittäminen. Vuonna 2013 Rakennusteollisuuden teettämän kyselytutkimuksen mukaan kuntapäätäjät arvioivat rakennusmateriaalien ominaisuuksista tärkeimmiksi kosteusturvallisuuden, pitkäikäisyyden ja paloturvallisuuden (Rakennusteollisuus, 2016). Nykyisten rakentamismääräysten mukaisia rakenteita on pitänyt toteuttaa viimeistään vuodesta 2010 alkaen. Määräykset tähtäävät energiatehokkaan rakentamisen edistämiseen ja ovat tiukentuneet edelleen vuonna 2012. Ohjaus tapahtuu nykyisin ns. E-luvun tasojen määrittelyn kautta, eikä 2010 asetettuja vaipparakenteiden U-arvovaatimuksia ole suoraan enää muutettu. (Rakennusteollisuus, 2017) (2)

Tehokkaasti eristettyjen rakenteiden rakennusfysikaalisesta toimivuudesta on esitetty julkisuudessaakin monenlaisia mielipiteitä. Valtakunnallisesti merkittävässä, Tekes-rahoitteisessa Frame-tutkimushankkeessa toteutettiin laajaa arviointia lämmöneristyksen lisäyksen ja ilmastomuutoksen vaikutuksista vaipparakenteiden kosteustekniseen toimintaan, rakennusten energiankulutukseen ja sisäilman olosuhteisiin (Tampereen teknillinen yliopisto, 2017). Frame-hankkeessa tehdyt rakennusfysikaaliset analysoinnit perustuivat pääosin simulointiohjelmistolla tehtyihin tarkasteluihin. Simulointien lisäksi mittauksiin perustuvia kenttätutkimuksia rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisestä toimivuudesta on todettu tarvittavan lisää täydentämään näkemystä rakenteiden toiminnasta käytännössä.

Lapin ammattikorkeakoululla käynnistyi vuoden 2015 keväällä EFCONE-tutkimusprojekti, jossa tutkitaan nykyisten energiatehokkuusmääräysten mukaisten betonielementtien lämpö- ja kosteusteknistä käyttäytymistä. Tutkimus toteutetaan Kittilän Levillä, todellisessa käytössä olevassa tutkimuskohteessa, Rovaniemen koulutuskuntayhtymän omistamassa koulutus- ja työhyvinvointikeskus Welleissä. Tutkimusjärjestelyiden vaatimukset on huomioitu jo Wellevin rakennusvaiheessa; rakennuksen A-osion seinäelementit on toteutettu viidellä erilaisella tyyppirakenteella siten, että elementeissä käytetyt eristeet ovat erilaisia keskenään, kuitenkin lämmön-

eristävyys suunnitteluarvojen ollessa samantasoiset. Seinäelementit ovat varustettu lämpötila- ja kosteusantureilla jo rakennusvaiheessa.

EFCONE-projektin tavoitteena on nykyisten rakenteiden kosteusturvallisuuden todentaminen sekä tulosten huomioiminen uudentyyppisten rakenteiden suunnittelussa. Projektin tarkoituksena on tuottaa lämpö- ja kosteusteknisten mittausjärjestelyiden avulla tutkittua tietoa nykyaikaisten, energiatehokkaiden rakenteiden rakennusfysikaalisesta toiminnasta. Projektin tulosten avulla voidaan arvioida kohteeseen asennettujen tyyppirakenteiden lämpöteknisen toiminnan ominaispiirteitä ja kosteusturvallisuutta. Lisäksi projektin toteutuksessa saadaan tietoa ikkunoiden syvyyssuuntaisen sijoittamisen merkityksestä ulkovaipan kosteus- ja lämpötekniseen toimivuuteen sekä huurtumattomien ikkunoiden toimivuudesta osana elementtirakennetta.

Tässä artikkelissa on esitetty aluksi keskeisimmät rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan liittyvät rakennusfysikaaliset ilmiöt, joihin tutkimus erityisesti painottuu. Tämän jälkeen on esitetty tutkimuskohteen mittausjärjestelyt, antureiden sijainnit rakenteissa sekä datan käsittelyyn liittyvät periaatteet.

TUTKIMUKSEN RAKENNUSFYSIKAALINEN TAUSTA

EFCONE-projektissa toteutettavan tutkimuksen huomio kiinnittyy erityisesti vaipparakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan. Erityispiirteenä tutkimuskohteessa on arktinen toimintaympäristö. Kittilän korkeudella esimerkiksi vuosittainen pakkasmäärä (K_h) on noin kaksinkertainen Etelä-Suomen olosuhteisiin verrattuna ja vuosittaisissa keskilämpötiloissa on 5–6 °C ero (VTT, 2000). Keski- ja Etelä-Eurooppaan verrattuna toimintaympäristön arktisuus korostuu luonnollisesti vieläkin enemmän.

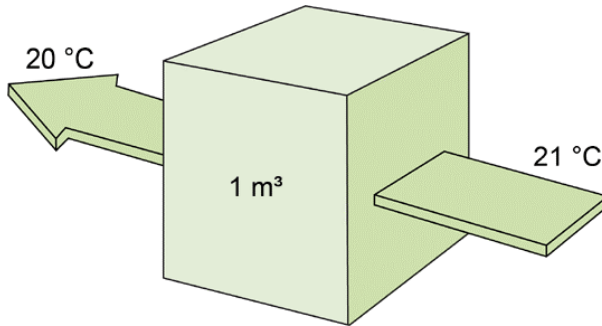
Tärkeimmät tässä tutkimuksessa käytettävät käsitteet liittyvät lämmön ja kosteuden siirtymiseen rakenteessa. Näistä rakenteiden lämpötekninen toiminta on yleisesti varsin hyvin hallittua ja useimpien nykyaikaisten tutkimusten päähuomio onkin erityisesti rakenteiden kosteusturvallisuudessa. Tässä raportissa esitetään tuloksia sekä lämpöteknisestä että kosteusteknisestä näkökulmasta.

Rakenteiden lämpöteknisessä toiminnassa suurin mielenkiinto kohdistuu eristerroksen toimintaan. Ulkoseinän lämpöteknisessä suunnittelussa tärkeimmät näkökulmat ovat:

- rakenteen lämpötilajakauma
- lämmönläpäisykerroin (U -arvo)
- rakenteen ilmatiiviys
- kylmäsiltojen minimointi
- lämmöneristeen tuulensuojaus (Betoniteollisuus, 2016).

Lämpötilajakauman ja U -arvon määrittämisessä tarvitaan materiaalien lämmönjohtavuuden arvoja tarkastelun lähtökohdaksi. **Lämmönjohtavuus** λ [$W/(m \cdot K)$] tarkoittaa lämpövirran tiheyttä ns. jatkuvuustilassa yhden metrin paksuisen ja yhden

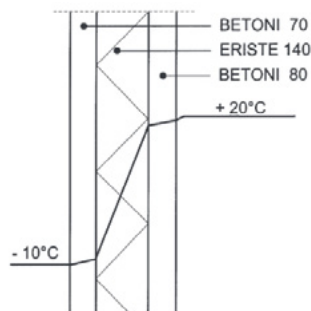
neliön kokoisen materiaalikerroksen läpi, kun lämpötilaero kerroksen yli on yhden asteen verran (kts. Kuva 4) (Ympäristöministeriö, 2003).



Kuva 4. Lämmönjohtavuus, periaatekuva (PAROC, 2017)

Lämmönjohtavuuden sekä sisä- ja ulkopuolisen pintavastuksen perusteella voidaan laskea ainekerroksen tai kokonaisrakenteen lämmönvastuksen arvo. **Lämmönvastus R** [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$] määritetään jakamalla materiaalikerroksen paksuus lämmönjohtavuuden arvolla ($R=d/\lambda$). Rakenteen kokonaislämmönvastusta RT käytetään rakenteen lämmönläpäisykertoimen eli **U-arvon** määrittämiseen. **U-arvo** [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$] on lämmönvastuksen käänteisluku ($1/RT$) ja sen perusteella ilmaistaan rakennusosan läpäisevän lämpövirran tiheys. (Ympäristöministeriö, 2003)

Rakenteen eri puolilla olevan lämpötilaeron vaikutuksesta lämpötila tasoittuu rakenteen eri materiaalikerrosten lämmönvastusten suhteissa. Tätä ilmiötä voidaan havainnollistaa kuvaamalla **lämpötilajakauma** rakenteessa. Oheisessa kuvassa (Kuva 5) on esimerkki lämpötilajakauman esittämisestä lämpötilakäyrän avulla rakenteen poikkileikkauksessa.

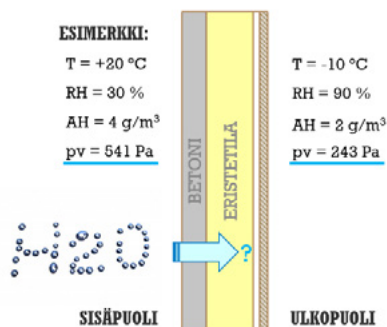


Kuva 5. Lämpötilajakauma rakenteessa lämpötilakäyrän avulla kuvattuna (Lindberg, 2016)

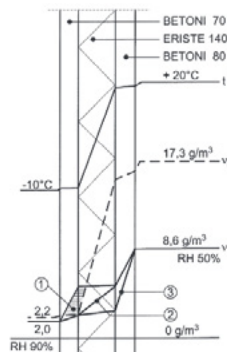
Rakenteiden kosteusteknisen toiminnan tarkastelussa huomio kiinnittyy erityisesti kosteuden siirtymismuotoihin sekä kosteuden aiheuttamiin vaikutuksiin rakenteissa. Ns. sisäisiä kosteuslähteitä voivat olla mm. sisäilman vesihöyry, roiskevesi ja vesivahingot sekä ulkoisia mm. ulkoilman vesihöyry, vesi- ja lumisade, maaperän kosteus, pinta- ja pohjavedet sekä rakennuskosteus (Ympäristöministeriö, 1998).

Ulkoseinärakenteiden suunnittelussa ja toteutuksessa on kiinnitettävä huomiota riittävään vesihöyrynvastukseen ja ilmatiivyyteen rakenteessa siten, ettei seinärakenteen kosteuspitoisuus muodostu haitalliseksi sisäilman vesihöyryn diffuusion tai konvektion vuoksi (Ympäristöministeriö, 1998). Betonielementissä höyrynsulun muodostaa elementin betoninen sisäkuori, jonka **vesihöyrynvastus Z_v** on tyypillisesti luokkaa 150 [103 s/m, (kun $d=100$ mm)] (Lindberg, 2016).

Kosteuden siirtyminen rakenteessa **diffuusion** avulla perustuu kosteuden siirtymiseen suuremmasta vesihöyryn osapaineesta pienempään. Normaalitilanteessa diffuusion suunta ulkoseinärakenteiden suhteen on lähes aina sisältä ulospäin. (Björkholtz, 1997). Oheisessa kuvassa (Kuva 6) on esitetty periaate olosuhteista, joiden myötä kosteus siirtyy diffuusiolla rakenteesta sisältä ulospäin.



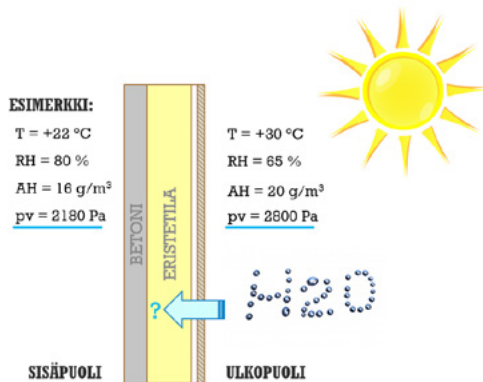
Kuva 6. Periaatekuva kosteuden siirtymisestä diffuusion avulla rakenteesta, liiallinen kosteuden siirtyminen voi aiheuttaa riskin diffuusion kondenssille



Kuva 7. Kosteusjakauma rakenteesta vesihöyrynpitoisuuskäyrän avulla kuvattuna (Lindberg, 2016)

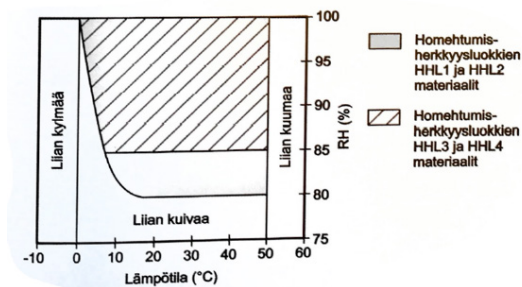
Rakenteen eri puolilla vaikuttavan vesihöyrynpitoisuuden eli **absoluuttisen kosteuden** [$AH, g/m^3$] ero tasoittuu rakenteesta eri kerrosten vesihöyrynvastusten suhteissa. Tätä ilmiötä voidaan havainnollistaa kuvaamalla **kosteusjakaumaa** rakenteesta. Oheisessa kuvassa (Kuva 7) on esimerkki kosteusjakauman esittämisestä vesihöyrynpitoisuuskäyrän avulla rakenteen poikkileikkauksessa. (Lindberg, 2016)

Kosteuden määrä suhteessa tarkastelukohdan lämpötilan perusteella määräytyvään vesihöyryn **kyllästyspitoisuuteen** v_k muodostaa suhteellisen **kosteuden** [RH %] arvon. Kyllästyspitoisuuden arvon esiintyminen rakenteessa tarkoittaa tilannetta, jossa kosteus **tiivistyy eli kondensoituu**. Tästä käytetään usein myös termiä **kastepisteen** muodostuminen (Lindberg, 2016). **Diffuusion kondenssi** tarkoittaa tilannetta, jossa seinärakenteen lävitse diffusoituvan kosteuden määrä on niin suurta, että kosteus kondensoituu rakenteessa (Björkholtz, 1997). Lämpimän jakson aikana voi esiintyä myös poikkeustilanteita, joissa kosteutta tiivistyy ulkoilmaa kylmempien rakenneosien pintoihin (ns. **kesäkondenssi**) (Merikallio, 2016). Oheisessa kuvassa (Kuva 8) on esitetty (kuvitteellinen) esimerkkitalanne, jossa kesäkondenssin riski voisi olla mahdollinen.



Kuva 8. Kesäkondenssi - skenaario

Tärkeä näkökulma rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan arvioinnissa on **homeriskin** määrittely. VTT-TTY homemalli on erittäin edistynyt malli homeriskin arviointiin. Oheisessa kuvassa (Kuva 9) on esitetty olosuhteita, joissa laskennallinen homeindeksi voi saada arvoja, riippuen materiaalin homeutumisherkkyysohjeista.



Kuva 9. Homeen kasvun kannalta suotuisia olosuhteita eri homeutumisherkkyysohjeissa (RIL 255-1, 2014)

Homeen kasvun mallintamisessa huomioon otettavia tekijöitä ovat materiaalin homeutumisherkkyyssluokan lisäksi lämpötila, kosteus ja aika. Edellä mainittuihin olosuhde- ja materiaalitietoihin perustuvan määrittelyn perusteella voidaan laskea ns. **homeindeksi**, joka kuvaa homeriskin tilannetta rakenteessa. Alla olevassa taulukossa (Taulukko 1) on esitetty homeindeksin luokitustasot.

Taulukko 1. Homeindeksin luokitustasot (RIL 255-1, 2014)

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

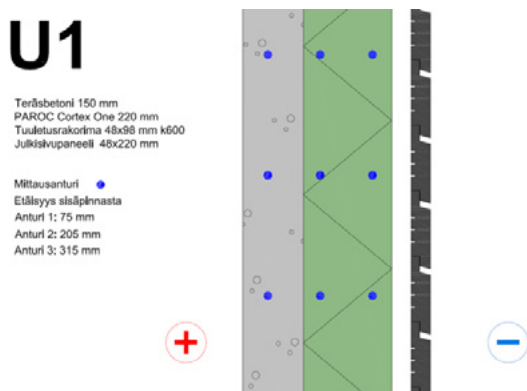
TUTKIMUSJÄRJESTELYT

EFCONE-projektin tutkimuskohteena toimivan koulutus- ja työhyvinvointikeskus Wellevin tutkimuspäätty (A-osa) on toteutettu viidellä eri elementtityypillä. Seuraavassa on esitetty kohteessa tutkittavat elementtityypit:

U₁: Tuulettuva, kivivillaeristetty julkisivuelementti

Tutkimuskohteen elementtityyppi U₁ on tuulettuva, kivivillaeristetty julkisivuelementti. Lämmöneristys on toteutettu **PAROC Cortex One** kivivillasta valmistetulla tuulensuojaeristeellä. Eristekerros on kiinnitetty kantavaan betonirakenteeseen sisä-

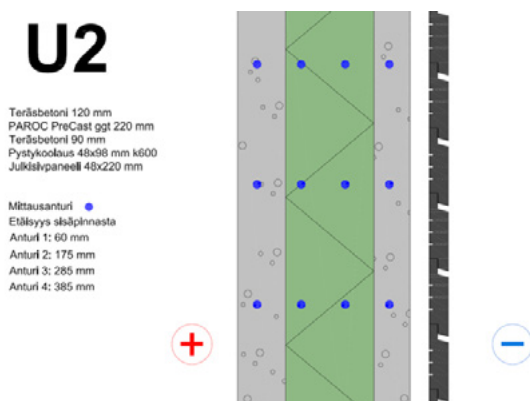
kuoreen kiinnikkeillä. Tuulensuojan muodostaa eristeeseen integroitu pinnoite, jonka jälkeen rakenteessa on tuuletusrako ja ulkoverhouslaudoitus. Toteutus vastaa tavanomaista käyttötilannetta hyvin. Leikkauskuva rakennetyypistä on esitetty ohessa (Kuva 10), kuvaan on havainnollistettu sinisin merkinnöin myös antureiden sijainnit rakenteessa.



Kuva 10. Tuulettuva, kivillaeristeyne julkisivu, PAROC Cortex One

U2: Kivillaeristetty sandwich-elementti

Tutkimuskohteen elementtityyppi U2 on kivillaeristetty sandwich-elementti. Lämmöneristys on toteutettu **PAROC PreCast ggt** kivivillasta valmistetulla, uritetulla betonirakenne-eristeellä. Eriste kiinnitetään osaksi sandwich-rakennetta tehdasvalun yhteydessä. Eristelevyn pinnassa on lasikuituhuovalla suojatut tuuletusurat, joiden tarkoituksena on tehostaa kosteuden poistumista rakenteesta. Tavanomaisesta käyttötilanteesta poiketen tutkimuskohteen seinärakenteessa on lisäksi toteutettu tuuletusrako ja ulkoverhouslaudoitus, minkä tarkoituksena on ollut julkisivun ilmeen yhtenäistäminen. Leikkauskuva rakennetyypistä on esitetty ohessa (Kuva 11), kuvaan on havainnollistettu sinisin merkinnöin myös antureiden sijainnit rakenteessa.

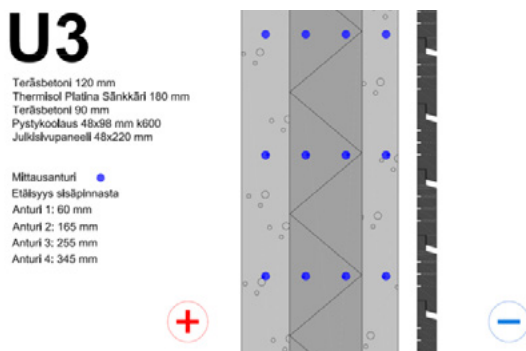


Kuva 11. Kivillaeristetty sandwich-elementti, PAROC PreCast ggt

U3: Polystyreenieristetty sandwich-elementti

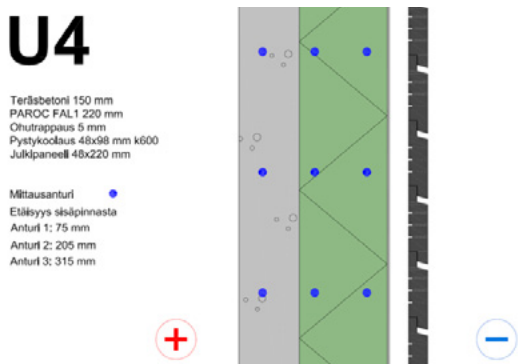
Tutkimuskohteen elementtityyppi U3 on polystyreenieristetty sandwich-elementti. Lämmöneristys on toteutettu **Thermisol Platina Sänkkäri** polystyreenipohjaisella, urittamattomalla betonirakenne-eristeellä. Eriste kiinnitetään osaksi sandwich-rakennetta tehdasvalun yhteydessä. Tavanomaisesta käyttötilanteesta poiketen tutkimuskohteen seinärakenteessa on lisäksi toteutettu tuuletusrako ja ulkoverhouslaudoitus, minkä tarkoituksena on ollut julkisivun ilmeen yhtenäistäminen. Leikkauskuva rakennetyypistä on esitetty ohessa (Kuva 12), kuvaan on havainnollistettu sinisin merkinnöin myös antureiden sijainnit rakenteessa.

U4: Eristerapattu julkisivuelementti



Kuva 12. Polystyreenieristetty sandwich-elementti, Thermisol Platina Sänkkäri

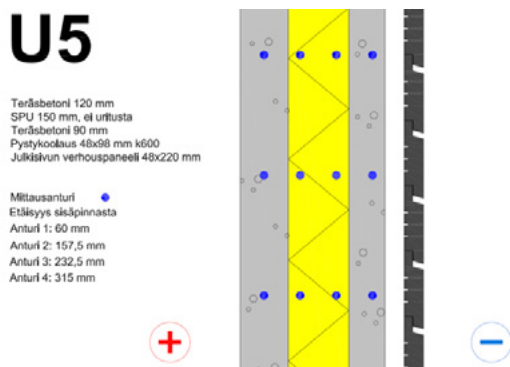
Tutkimuskohteen elementtityyppi U4 on eristerapattu julkisivuelementti. Lämmöneristys on toteutettu **PAROC FAL1** (nykyisin PAROC Linio 80) kivivillasta valmistetulla lamelleristeellä. Eristekerros on kiinnitetty kantavaan betonirakenteeseen sisäkuoreen kiinnityslaastin avulla ja eristerakoksen ulkopintaan on tämän jälkeen toteutettu rappauspinoite. Tavanomaisesta käyttötilanteesta poiketen tutkimuskohteen seinärakenteessa on lisäksi toteutettu tuuletusrako ja ulkoverhouslaudoitus, minkä tarkoituksena on ollut julkisivun ilmeen yhtenäistäminen. Leikkauskuva rakennetyypistä on esitetty ohessa (Kuva 13), kuvaan on havainnollistettu sinisin merkinnöin myös antureiden sijainnit rakenteessa.



Kuva 13. Eristerapattu julkisivuelementti, PAROC FAL1

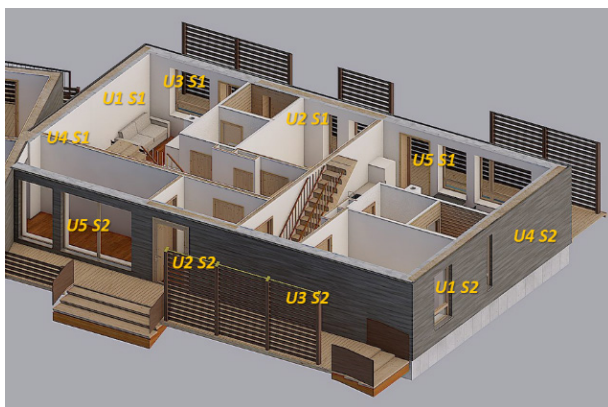
U5: Polyuretaanieristetty sandwich-elementti

Tutkimuskohteen elementtityyppi U5 on polyuretaanieristetty sandwich-elementti. Lämmöneristys on toteutettu **Kingspan Therma TW58 150 mm** (entinen SPU P 150 mm) polyuretaanipohjaisella, urittamattomalla betonirakenne-eristeellä. Eriste kiinnitetään osaksi sandwich-rakennetta tehdasvalun yhteydessä. Tavanomaisesta käytöstilanteesta poiketen tutkimuskohteen seinärakenteessa on lisäksi toteutettu tuuletusrako ja ulkoverhouslaudoitus, minkä tarkoituksena on ollut julkisivun ilmeen yhtenäistäminen. Leikkauskuva rakennetyypistä on esitetty ohessa (Kuva 14), kuvaan on havainnollistettu sinisin merkinnöin myös antureiden sijainnit rakenteessa.



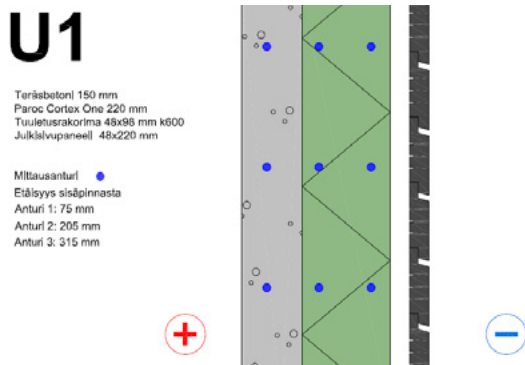
Kuva 14. Polyuretaanieristetty sandwich-elementti, Kingspan Therma TW58 150 mm

Kaikkia elementtityyppejä on sijoitettu kahteen eri sijaintiin tutkimuspäädssä. Sijainneista käytetään nimitystä **mittaussektorit** ja ne ovat merkitty S1 tai S2 merkinnöin. Oheisessa kuvassa (Kuva 15) on esitetty tutkittavien elementtien sijainnit kohteen isometrisessä kuvauksessa.



Kuva 15. Welleivin tutkimuspäätty, jossa merkittynä tutkittavien elementtien sijainnit

Elementtien rakenteet on varustettu lämpö- ja kosteusteknisellä mittausjärjestelmällä hyvin laajasti. Tutkittavista mittauspisteistä mitataan **lämpötilaa** [°C] ja **suhteellista kosteutta** [RH %]. Mittauspisteiden sijaintia rakenteen poikkileikkauksessa kuvataan käsitteellä **Layer** eli mittauskerros. Eri Layerit on numeroitu sisältä ulospäin siten, että sisimpänä sijaitseva kerros (betonielementin sisäkuori) on merkitty numerolla 1. Tästä ulospäin seuraava kerros (Layer 2) sijaitsee eristekerroksen sisäosassa, Layer 3 eristekerroksen ulko-osassa ja sandwich-tyyppisissä elementeissä lisäksi Layer 4 betonielementin ulkokuoressa. Havainnekuva antureiden sijainnista on esitetty ohessa (Kuva 16).



Kuva 16. Antureiden sijainnit rakenteen poikkileikkauksessa

Rakenteisiin sijoitettujen antureiden lisäksi kohteessa mitataan sisätilojen ja ympäröivän ulkotilan lämpö- ja kosteusolosuhteita. Lisäksi hyödynnetään Ilmatieteen laitoksen tuottamaa avointa säädataa. Mittausjärjestelmässä käytetään HW Groupin valmistamia digitaalisia HTemp-antureita, jotka mittaavat sekä lämpötilaa että suhteellista kosteutta. Anturin tekniset tiedot on esitelty oheisessa taulukossa (Taulukko 2).

Taulukko 2. Anturin tekniset tiedot (11)

Suure	Mittausalue	Resoluutio	Tarkkuus
[°C]	+20...+40 °C	0.1 °C	+0.8 °C
	-10...+70 °C		+1.3 °C
	-30...+80 °C		+2.0 °C
[RH%]	0...100 RH%	0.1 RH%	+5 RH%

Teknisten ominaisuuksien lisäksi on hyvä huomioida, että rakennusfysikaalisissa mittauksissa suhteellisen kosteuden mittaamiseen liittyvä virhe voi huonoimmillaan olla suuri (jopa muutamia kymmeniä prosentteja), mikäli tarkastelukohdan lämpötila on alle $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja rakenteen sisältämä kosteus on jäätä (12).

Welleivissä lämpötila- ja kosteusantureiden mittaustiedot kerätään 1-wire väylästä OW-Server -tiedonkeruulaitteilla. Mittausjärjestelmä koostuu kymmenestä tiedonkeruulaitteesta, joista jokaisella on oma 1-wire väylänsä. Tiedonkeruulaitteet ovat yhteydessä Lapin AMKin mittaustietokantaan WLAN-yhteydellä (Kuva 17).



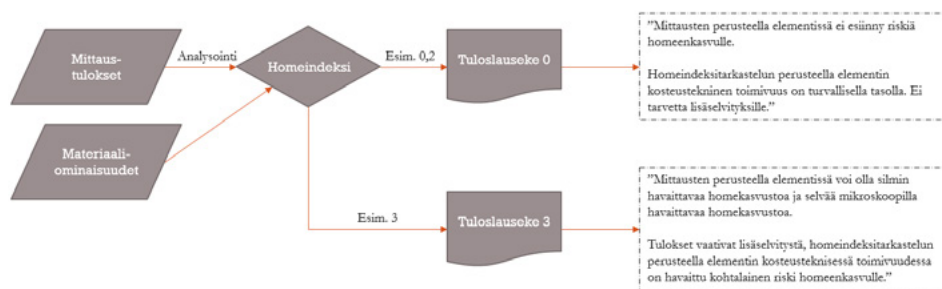
Kuva 17. Mittausjärjestelmän toimintaperiaate

Tulosten esittämisessä yhden mittaussektorin eri korkeusasemien tulokset on päädytty esittämään keskiarvoistettuina Layerien tuloksina. Tällä pyritään tulosten esittämisen yksinkertaistamiseen sekä mahdollisten rakenteen geometriaan liittyvien vaihteluiden vaikutusten vähentämiseen. Tulosten käsittelyvaiheessa tehdyn tarkastelun perusteella vaihtelut eri korkeusasemien välillä ovat pieniä eikä tällä arvioida olevan tulosten käsittelyn luotettavuuden kannalta vaikutuksia.

Mittaustiedon luotettavuuden arvioimiseksi datan tasoa ja profilia on verrattu sektoreiden välillä. Häiriöitä sisältävä data on pyritty suodattamaan mahdollisimman pitkälti pois tuloksista. Tutkimuksen kannalta valitettavalla tavalla elementtityyppi U₃:sta (Polystyreenieristetty sandwich-elementti) koskeva mittaustiedot osoittautui laadunvarmistusvaiheessa niin runsaasti virheitä sisältäväksi, että sen sulkeminen pois analysointivaiheesta katsottiin järkevimäksi ratkaisuksi.

Tutkimuksen tuloksia esitetään tutkittavalle aikavälille sijoittuvien tuloskäyrästä avulla. Käyrästä voidaan lukea pitkän aikavälin historiatieto olosuhteiden vaihtelusta rakenteen eri osissa. Lisäksi toiminnan indikaattoreina käytetään keskiarvoja, maksimi- ja minimiarvoja sekä tarvittaessa sovellettuja indikaattorilukuja. Tulosten esittämisessä käytetään myös rakenteen poikkileikkauskuvaan sijoitettua lämpöjakaumaa, joka tässä tutkimuksessa esitetään värikarttana sekä prosentuaalisina osuuksina koko rakenteen lämpöjakaumasta. Tulosten reaaliaikaiseen esittämiseen on myös kehitetty nettikäyttöliittymä, jossa tiedot ovat tarkasteltavissa millä tahansa aikavälillä.

Tulosten analysoinnissa käytetään mahdollisimman pitkälti vakioituja tuloslausekkeita. Tuloslausekkeille on laadittu taustadokumentti, jossa on määritelty mahdolliset skenaariot ja niiden raja-arvot mittaustulosten kannalta. Lausekkeet on määritelty diffuusion kondenssin, kesäkondenssin, homeriskin sekä eristävyuden ja lämpöjakauman näkökulmasta. Esimerkki logiikasta tuloslausekkeiden hyödyntämisestä on esitetty oheisessa kuvassa (Kuva 18).



Kuva 18. Logiikka tuloslausekkeiden takana, esimerkkinä homeindeksi

Kuvan esimerkin mukaisesti meneteltäessä tuloslauseketta o käytetään, mikäli homeindeksin arvo on pysynyt alle yhden. Vastaavasti käytetään tilanteeseen soveltuvaa lauseketta aina arvoon kuusi saakka, mikä on VTT-TTY-homemallin maksimi-arvo. Lämpö- ja kosteusteknisten mittausten tuloksia on esitetty artikkeleissa Mittaustuloksia nykyaikaisten betonielementtien lämpöteknisestä toiminnasta arktisissa olosuhteissa ja Mittaustuloksia nykyaikaisten betonielementtien kosteusteknisestä toiminnasta arktisissa olosuhteissa.

LÄHDELUETTELO

1. Rakennusteollisuus RT ry. Kuntapäätäjät: rakennusten edulliset ylläpitokustannukset hankintahintaa tärkeämpää. [Online] 19. 2 2016. <http://www.rakennusteollisuus.fi/Ajankohtaista/Tiedotteet1/2013/Kuntapaattajat-rakennusten-edulliset-yllapitokustannukset-hankintahintaa-tarkeempaa/>.
2. Rakennusteollisuus. Rakennusteollisuus.fi. Rakennusten energiatehokkuutta ohjaavat direktiivit. [Online] 29. 5 2017. <https://www.rakennusteollisuus.fi/Tietoalasta/Ilmasto-ymparisto-ja-energia/Ilmasto--ja-energiapolitiikka/Energiatehokkuus-suunnitteluvaiheessa/>.
3. Tampereen teknillinen yliopisto. Tut.fi. FRAME - Future Envelope Assemblies and HVAC Solutions. [Online] [Viitattu: 29. 5 2017.] <http://www.tut.fi/fi/tutkimus/tutkimusalat/rakennustekniikka/rakennetekniikka/rakennusfysiikka/frame/index.htm>.
4. Kivikoski, Harri ja Saarelainen, Seppo. ILMASTORASITUS - Pakkasmäärän ja sulamiskauden pituuden määrittäminen. Espoo : VTT, 2000.
5. Betoniteollisuus Ry. Elementtisuunnittelu.fi. Lämpö- ja kosteustekniikka. [Online] [Viitattu: 25. 2 2016.] <http://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/julkisivut/lampo-ja-kosteustekniikka>.
6. Ympäristöministeriö. Suomen rakentamismääräyskokoelma C4 Lämmöneristys. Helsinki : Ympäristöministeriö, 2003.
7. PAROC. Paroc.fi. Rakennuksen vaippa. [Online] [Viitattu: 29. 5 2017.] <http://www.paroc.fi/knowhow/energiatehokkuus/rakennusten-suunnittelu/rakennuksen-vaippa>.
8. Lindberg, Ralf. Rakennusosien rakennusfysikaalinen toiminta. www.rakennustieto.fi. [Online] [Viitattu: 25. 2 2016.] <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK040302.pdf>.
9. Ympäristöministeriö. Suomen rakentamismääräyskokoelma C2 Kosteus. Helsinki : Ympäristöministeriö, 1998.
10. Björkholtz, Dick. Lämpö ja kosteus. Rakennusfysiikka. Helsinki : Rakennustieto Oy, 1997.
11. Merikallio, Tarja. Rakennustyömaan kosteudenhallinta ja sen suunnittelu. www.rakennustieto.fi. [Online] [Viitattu: 25. 2 2016.] <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK020504.pdf>.
12. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. RIL 255-1-2014 Rakennusfysiikka 1. Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Helsinki : Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, 2014.

Mittaustuloksia nykyaikaisten betonielementtien lämpötek- nisestä toiminnasta arktisissa olosuhteissa

JOHDANTO

EFCONE-projektin lämpötekniinen seurantatutkimus toteutettiin aikavälillä 1.8.2015–15.2.2017. Mittausdataa on kerätty myös ennen tuota aikaväliä ja jatkettu tämän jälkeenkin. Analysoitava data on kuitenkin rajattu edellä mainittuun aikaikkunaan. Seurantatutkimus kattaa näin ollen kaksi syyskautta, kaksi talvikautta ja yhden kevät-kesäkauden. Aikaväliltä kerättyä dataa voidaan pitää näytteenä tutkittavien elementtien toiminnasta. Ulkoiset olosuhteet voivat vaihdella paljonkin eri vuosien välillä, joten edustavamman otoksen mahdollistamiseksi tulee tehdä esimerkiksi simulointeihin perustuvia tarkasteluita.

Kohteen tutkimusjärjestelyt, rakennetyypit jne. on esitetty tarkemmin artikkelissa Nykyaikaisten betonielementtien lämpö- ja kosteustekninen toiminta arktisissa olosuhteissa – tutkimusjärjestelyt. Tämän tutkimuksen oleelliset näkökulmat lämpötekni- sen toiminnan tarkasteluissa ovat olleet lämpötilojen mittaaminen rakenteen poikkileikkauksen suunnassa eri tasoissa ja lämpötilajakauman hahmot- taminen tätä kautta.

Tutkimuskohteessa on käytetty viittä erilaista betonielementtityyppiä alla olevan taulukon (Tässä artikkelissa näistä neljän elementtityypin tulokset on käsitelty omissa kappaleissaan. Yhden elementtityypin (U_3) tulokset on jouduttu mittausjär- jestelmässä esiintyneiden virheiden vuoksi jättämään pois.

Taulukko 3 mukaisesti. Tässä artikkelissa näistä neljän elementtityypin tulokset on käsitelty omissa kappaleissaan. Yhden elementtityypin (U_3) tulokset on joudut- tu mittausjärjestelmässä esiintyneiden virheiden vuoksi jättämään pois.

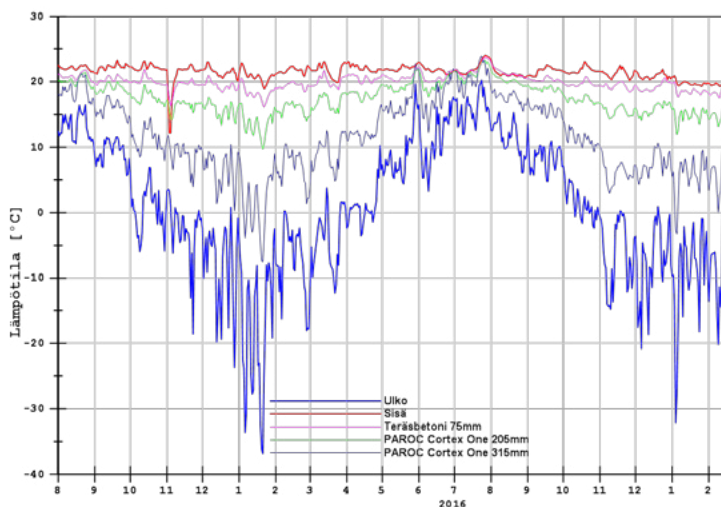
Taulukko 3. Tutkimuskohteen elementtityypit

Elementtityyppi	Eristetyyppi	Mittaussektorit
Tuulettuva, kivillaeristetty julkisivuelementti	PAROC Cortex One	U1S1 & U1S2
Kivillaeristetty sandwich-elementti	PAROC PreCast ggt	U2S1 & U2S2
Polystyreenieristetty sandwich-elementti (ei analysoitu)	Thermisol Platina Sänkkäri	U3S1 & U3S2
Eristerapattu julkisivuelementti	PAROC FAL1	U4S1 & U4S2
Polyuretaanieristetty sandwich-elementti	Kingspan Therma TW58 150 mm	U5S1 & U5S2

ELEMENTTIEN LÄMPÖTEKNINEN TOIMINTA, MITTAUSTULOKSET

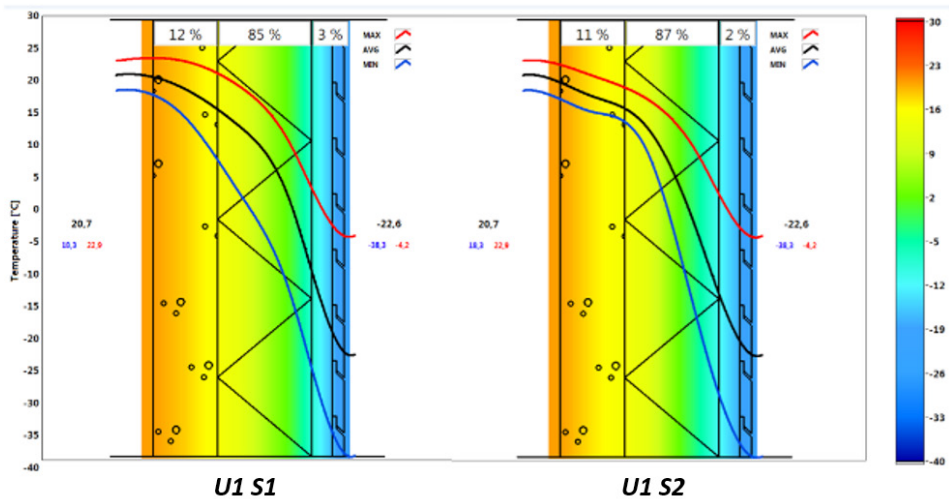
Tuulettuva, kivillaeristetty julkisivuelementti

Oheisessa kuvassa (Kuva 19) on esitetty elementin **lämpöteknisten mittausten** tuloksia tutkimusjaksolla. Grafiikassa eri anturien tulokset on esitetty omilla väreillään. Materiaalimerkinnän perään on merkitty mittauskohdan syvyys sisäpinnan tasosta ulospäin mitattuna. Tässä elementtityypissä varsinaisia rakenteissa sijaitsevia antureita on 3 kpl. Nämä ovat: Layer 1 [Teräsbetoni 75 mm], Layer 2 [PAROC Cortex One 205 mm] ja Layer 3 [PAROC Cortex One 315 mm]. Tulostuloksesta esitetään U1S1- ja U1S2-mittaussektoreiden yhdistettyjä tuloksia. Lisäksi tulostuloksesta esitetään ulko- ja sisälämpötilojen mittaustuloksia.



Kuva 19. Elementin mittauspisteiden lämpötilat aikavälillä 1.8.2015–15.2.2017 (U1, S1 & S2 yhdistetty)

Oheisessa kuvassa (Kuva 20) on esitetty **lämpöjakauma** elementin alueella mitausjaksolla esiintyneen kylmimmän pakkasjakson (4.1.–23.1.2016) aikana. Lämpöjakauma on esitetty lämpökäyrien lisäksi prosenttijakaumana, jossa tarkastellaan eri rakennekerrosten lämpötilan jakaumaa suhteessa koko rakenteen yli esiintyvään lämpötilaeroon. Rakennekerrokset tässä elementtityypeissä on jaettu kolmeen tarkasteltavaan segmenttiin: 1) Betonielementin sisäkuori, 2) Eristekerros, 3) Tuuletusväli ja ulkoverhous.



Kuva 20. Lämpöjakauma mittaussektoreissa U1S1 ja U1S2 pakkasjaksolla (4.1.–23.1.2016). Musta käyrä kuvaa keskiarvoa, sininen alinta ja punainen ylintä lämpötilaa tarkastelujaksolla

Taulukko 4. Laskennalliset lämmönvastuksen arvot rakenteen eri osissa

Materiaali	d	λ	R	%
Sisäpuolen pintavastus			0,130	3,7 %
Betoni (sisäkuori)	150	1,2	0,125	
Eriste (PAROC Cortex One)	220	0,033	6,667	95,8 %
Tuuletusväli	48	0	0	0,6 %
Ulkoverhous	25	0	0	
Ulkopuolen pintavastus			0,040	
RT [m ² K / W]			6,962	100 %
U-arvo [W/m ² K]			0,144	
+ pistemäinen lisäkonduktanssi			0,006	

= 0,150

Johtopäätöksiä mittaustuloksista

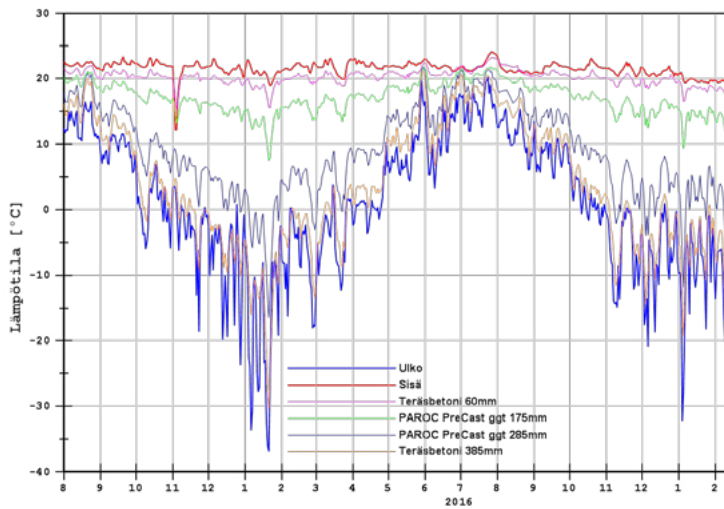
- Lämpötilamittausten tulosten arvioinnissa voidaan verrata pakkasjakson lämpötilajakaumaa laskennallisiin eristävyiden (lämmönvastus, R) arvoihin (Taulukko 4). Mittausten perusteella lämpötilajakauma pakkasjaksolla vastaa eri materiaalikerrosten eristävyiden suunnitteluarvoja hyvin (eristekerroksen sisäpuolella mitattu jakauma $U_{1S1} = 97 \%$, $U_{1S2} = 98 \%$, laskennallinen = 99%).
- Huomioitavaa on betonisen sisäkuoren laskennallista osuutta suurempi osuus mitatusta lämpötilajakaumasta ($U_{1S1} = 12 \%$, $U_{1S2} = 11 \%$, laskennallinen = $3,7 \%$). Tämän arvioidaan perustuvan betonin suureen termiseen massaansa, joka pitää sisäkuoren lämpötilan korkeammalla pakkasjakson aikana, kuin mitä lämmönvastusten perusteella arvioitu lämpötilajakauma olisi.
- Myös rakenteen ulko-osassa on hieman suurempi osuus lämpöjakaumasta, minkä arvioidaan perustuvan tuuletusvälin toimintaan. Tuuletusväliä ei lämmönvastusten laskennassa oteta lainkaan huomioon.
- Lämpötilamittauksiin perustuvan tarkastelun perusteella elementin lämpötekninen toiminta on odotetun kaltaista.

Elementti toimii lämpöteknisesti tehokkaalla ja suunnitellulla tavalla.



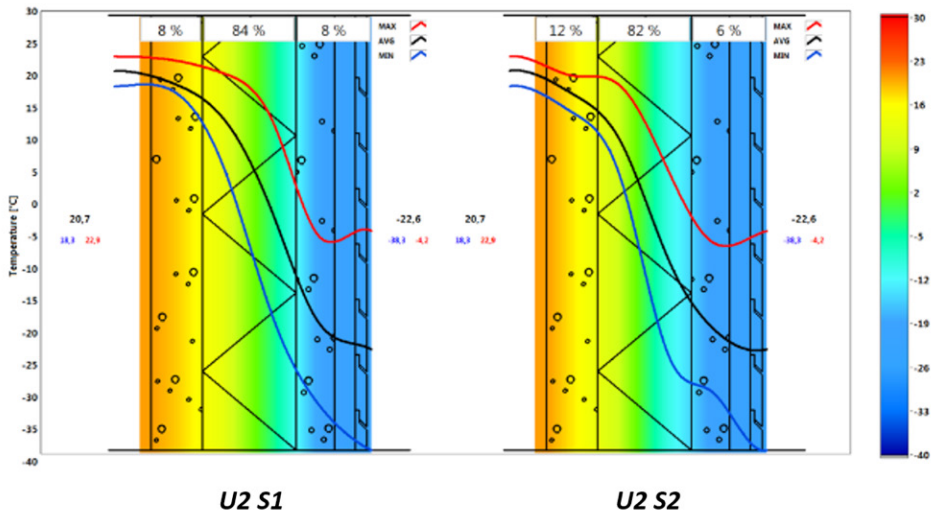
Kivillaeristetty sandwich-elementti

Oheisessa kuvassa (Kuva 21) on esitetty elementin **lämpöteknisten mittausten** tuloksia tutkimusjaksolla. Grafiikassa eri anturien tulokset on esitetty omilla väreillään. Materiaalimerkinnän perään on merkitty mittauskohdan syvyys sisäpinnan tasosta ulospäin mitattuna. Tässä elementtityypissä varsinaisia rakenteissa sijaitsevia antureita on 4 kpl. Nämä ovat: Layer 1 [Teräsbetoni 60 mm], Layer 2 [PAROC PreCast ggt 175 mm], Layer 3 [PAROC PreCast 285 mm] ja Layer 4 [Teräsbetoni 385 mm]. Tulokäyrästä esitetään U_{2S1} - ja U_{2S2} mittaussektoreiden yhdistettyjä tuloksia. Lisäksi tulokäyrästä on esitetty ulko- ja sisälämpötilojen mittaustuloksia.



Kuva 21. Elementin mittauspisteiden lämpötilat aikavälillä 1.8.2015–15.2.2017 (U2, S1 & S2 yhdistetty)

Oheisessa kuvassa (Kuva 22) on esitetty **lämpöjakauma** elementin alueella mittausjaksolla esiintyneen kylmimmän pakkasjakson (**4.1.–23.1.2016**) aikana. Lämpöjakauma on esitetty lämpökäyrien lisäksi prosenttijakaamana, jossa tarkastellaan eri rakennekerrosten lämpötilan jakaamaa suhteessa koko rakenteen yli esiintyvään lämpötilaeroon. Rakennekerrokset tässä elementtityypeissä on jaettu kolmeen tarkasteltavaan segmenttiin: 1) Betonielementin sisäkuori, 2) Eristekerros, 3) Betonielementin ulkokuori, tuuletusväli ja ulkoverhous.



Kuva 20. Lämpöjakauma mittaussektoreissa U2S1 ja U2S2 pakkasjaksolla (4.1.–23.1.2016). Musta käyrä kuvaa keskiarvoa, sininen alinta ja punainen ylintä lämpötilaa tarkastelujaksolla.

Taulukko 5. Laskennalliset lämmönvastuksen arvot rakenteen eri osissa

Tuulettuva, kivillaeristetty julkisivuelementti

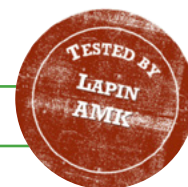
Materiaali	d	λ	R	%
Sisäpuolen pintavastus			0,130	3,4 %
Betoni (sisäkuori)	150	1,2	0,125	
Eriste (PAROC PreCast ggt)	220	0,033	6,667	94,9 %
Betoni (ulkokuori)	90	1,2	0,075	
Tuuletusväli	48	0	0	1,7 %
Ulkooverhous	25	0	0	
Ulkopuolen pintavastus			0,040	
RT [m ² K / W]			6,962	100 %
U-arvo [W/m ² K]			0,144	
+ pistemäinen lisäkonduktanssi			0,006	

= 0,153

Johtopäätöksiä mittaustuloksista

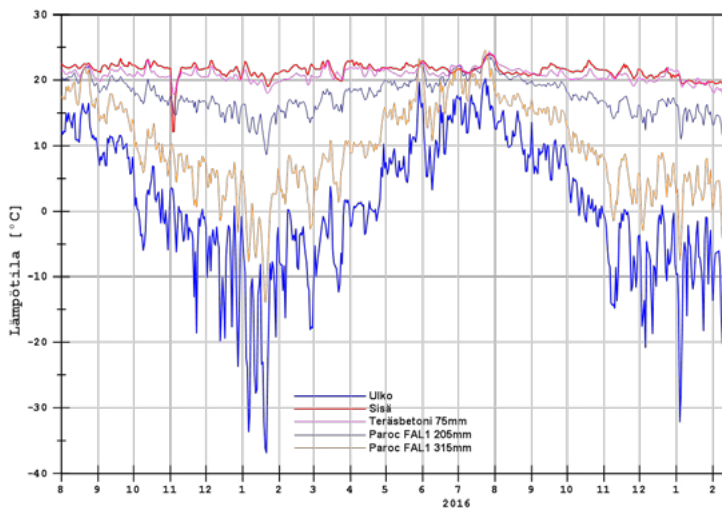
- Lämpötilamittausten tulosten arvioinnissa voidaan verrata pakkasjakson lämpötilajakaumaa laskennallisiin eristävyiden (lämmönvastus, R) arvoihin. Mittausten perusteella lämpötilajakauma pakkasjaksolla vastaa eri materiaalikerrosten eristävyiden suunnitteluarvoja kohtuullisen hyvin (eristekerroksen sisäpuolella mitattu jakauma $U_{2S1} = 92 \%$, $U_{2S2} = 94 \%$, laskennallinen = 98 %).
- Huomioitavaa on betonisen sisäkuoren laskennallista osuutta suurempi osuus mitatusta lämpötilajakaumasta ($U_{2S1} = 8 \%$, $U_{2S2} = 12 \%$, laskennallinen = 3,4 %). Tämän arvioidaan perustuvan betonin suureen termiseen massaan, joka pitää sisäkuoren lämpötilan korkeammalla pakkasjakson aikana, kuin mitä lämmönvastusten perusteella arvioitu lämpötilajakauma olisi.
- Myös rakenteen ulko-osassa on hieman suurempi osuus lämpöjakaumasta, minkä arvioidaan perustuvan tuuletusvälin toimintaan. Tuuletusväliä ei lämmönvastusten laskennassa oteta lainkaan huomioon. Myös betonisen ulkokuoren termisellä massalla voi olla vaikutusta lyhyen aikavälin tarkastelun kannalta.
- Lämpötilamittauksiin perustuvan tarkastelun perusteella elementin lämpötekninen toiminta on odotetun kaltaista.

Elementti toimii lämpöteknisesti tehokkaalla ja suunnitellulla tavalla.



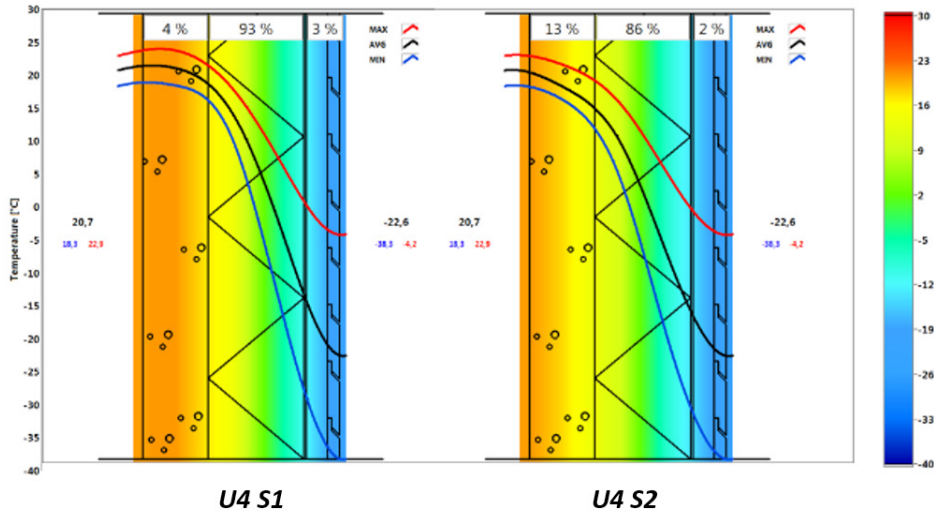
Eristerapattu julkisivuelementti

Oheisessa kuvassa (Kuva 23) on esitetty elementin **lämpöteknisten mittausten** tuloksia tutkimusjaksolla. Grafiikassa eri anturien tulokset on esitetty omilla väreillään. Materiaalimerkinnän perään on merkitty mittauskohdan syvyys sisäpinnan tasosta ulospäin mitattuna. Tässä elementtityypissä varsinaisia rakenteissa sijaitsevia antureita on 3 kpl. Nämä ovat: Layer 1 [Teräsbetoni 75 mm], Layer 2 [PAROC FAL1 205 mm] ja Layer 3 [PAROC FAL1 315 mm]. Tuloskäyrästä esitetään U₄S₁- ja U₄S₂ mitaussektoreiden yhdistettyjä tuloksia. Lisäksi tuloskäyrästä on esitetty ulko- ja sisälämpötilojen mittaustuloksia.



Kuva 23. Elementin mittauspisteiden lämpötilat aikavälillä 1.8.2015–15.2.2017 (U₄, S₁ & S₂ yhdistetty)

Oheisessa kuvassa (Kuva 24) on esitetty **lämpöjakauma** elementin alueella mittausjaksolla esiintyneen kylmimmän pakkasjakson (4.1.–23.1.2016) aikana. Lämpöjakauma on esitetty prosenttijakaumana, jossa tarkastellaan eri rakennekerrosten lämpötilan jakaumaa suhteessa koko rakenteen yli esiintyvään lämpötilaeroon. Rakennekerrokset tässä elementtityypeissä on jaettu kolmeen tarkasteltavaan segmenttiin: 1) Betonielementin sisäkuori, 2) Eristekerros, 3) Tuuletusväli ja ulkoverhous.



Kuva 24. Lämpöjakauma mittaussektoreissa U4S1 ja U4S2 pakkasjaksolla (4.1.–23.1.2016). Musta käyrä kuvaa keskiarvoa, sininen alinta ja punainen ylintä lämpötilaa tarkastelujaksolla.

Taulukko 6. Laskennalliset lämmönvastuksen arvot rakenteen eri osissa

Eristerapattu julkisivuelementti

Materiaali	d	λ	R	%
Sisäpuolen pintavastus			0,130	4,4 %
Betoni (sisäkuori)	150	1,2	0,125	
Eriste (PAROC FAL1)	220	0,04	5,500	94,9 %
Tuuletusväli	48	0	0	0,6 %
Ulkoverhous	25	0	0	
Ulkopuolen pintavastus			0,040	
RT [m ² K / W]			5,795	100 %
U-arvo [W/m ² K]			0,173	

Johtopäätöksiä mittaustuloksista

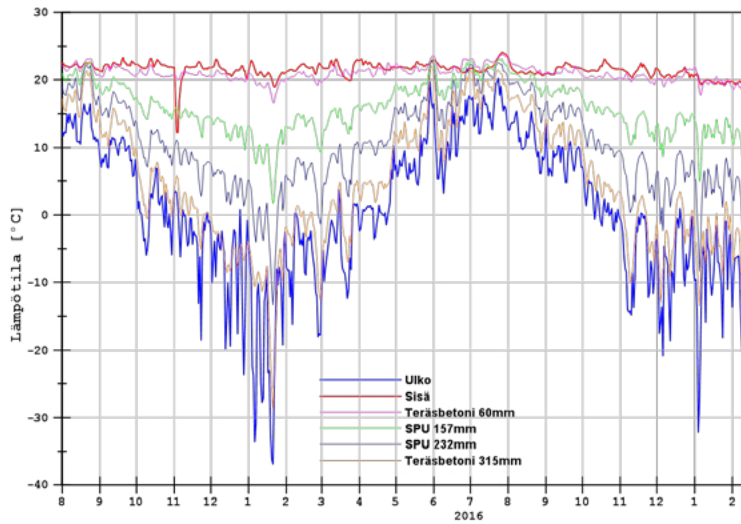
- Lämpötilamittausten tulosten arvioinnissa voidaan verrata pakkasjakson lämpötilajakaumaa laskennallisiin eristävyys (lämmönvastus, R) arvoihin. Mittausten perusteella lämpötilajakauma pakkasjaksolla vastaa eri materiaalikerrosten eristävyys suunnitteluarvoja hyvin (eristekerroksen sisäpuolella mitattu jakauma $U_{4S1} = 97\%$, $U_{4S2} = 98\%$, laskennallinen = 99 %).
- Huomioitavaa on betonisen sisäkuoren laskennallista osuutta suurempi osuus mitatusta lämpötilajakaumasta ($U_{4S1} = 4\%$, $U_{4S2} = 13\%$, laskennallinen = 4,4 %). Tämän arvioidaan perustuvan betonin suureen termiseen massaan, joka pitää sisäkuoren lämpötilan korkeammalla pakkasjakson aikana, kuin mitä lämmönvastusten perusteella arvioitu lämpötilajakauma olisi.
- Myös rakenteen ulko-osassa on hieman suurempi osuus lämpöjakaumasta, minkä arvioidaan perustuvan tuuletusvälin toimintaan. Tuuletusväliä ei lämmönvastusten laskennassa oteta lainkaan huomioon.
- Lämpötilamittauksiin perustuvan tarkastelun perusteella elementin lämpötekninen toiminta on odotetun kaltaista.

Elementti toimii lämpöteknisesti tehokkaalla ja suunnitellulla tavalla.



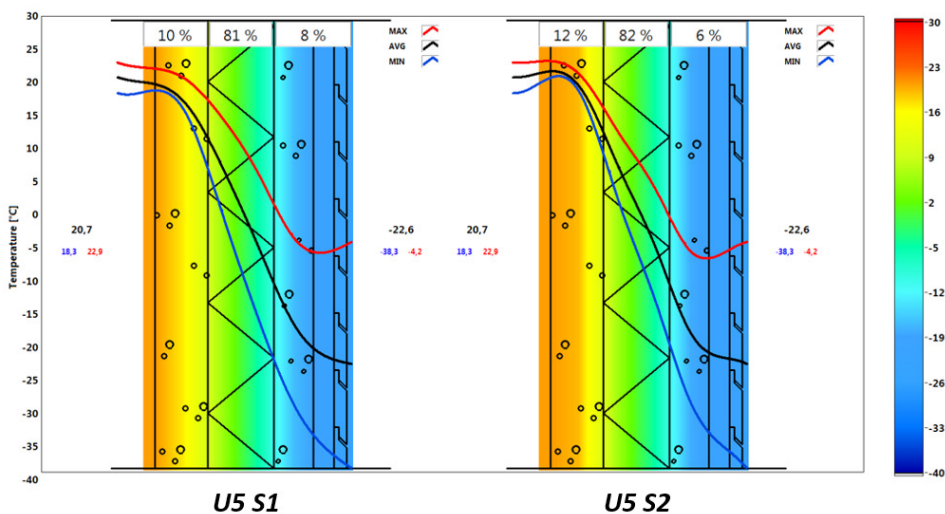
Polyuretaanieristetty sandwich-elementti

Oheisessa kuvassa (Kuva 25) on esitetty elementin **lämpöteknisten mittausten** tuloksia tutkimusjaksolla. Grafiikassa eri anturien tulokset on esitetty omilla väreillään. Materiaalimerkinnän perään on merkitty mittauskohdan syvyys sisäpinnan tasosta ulospäin mitattuna. Tässä elementtityypissä varsinaisia rakenteissa sijaitsevia antureita on 4 kpl. Nämä ovat: Layer 1 [Teräsbetoni 60 mm], Layer 2 [Kingspan Therma TW58 157 mm], Layer 3 [Kingspan Therma TW58 232 mm] ja Layer 4 [Teräsbetoni 315 mm]. Tuloskäyrästä on sekä U_{5S1} - että U_{5S2} -mittaussektorin tuloksia. Lisäksi tuloskäyrästä on esitetty ulko- ja sisälämpötilojen mittaustuloksia.



Kuva 25. Elementin mittauspisteiden lämpötilat aikavälillä 1.8.2015–15.2.2017 (U5, S1 & S2 yhdistetty)

Oheisessa kuvassa (Kuva 26) on esitetty **lämpöjakauma** elementin alueella mittausjaksolla esiintyneen kylmimmän pakkasjakson (4.1.–23.1.2016) aikana. Lämpöjakauma on esitetty lämpökäyrien lisäksi prosenttijakaumana, jossa tarkastellaan eri rakennekerrosten lämpötilan jakaumaa suhteessa koko rakenteen yli esiintyvään lämpötilaeroon. Rakennekerrokset tässä elementtityypeissä on jaettu kolmeen tarkasteltavaan segmenttiin: 1) Betonielementin sisäkuori, 2) Eristekerros, 3) Betonielementin ulkokuori, tuuletusväli ja ulkoverhous.



Kuva 26. Lämpöjakauma mittaussektoreissa U5S1 ja U5S2 pakkasjaksolla (4.1.–23.1.2016). Musta käyrä kuvaa keskiarvoa, sininen alinta ja punainen ylintä lämpötilaa tarkastelujaksolla.

Taulukko 7. Laskennalliset lämmönvastuksen arvot rakenteen eri osissa

Polyuretaanieristetty sandwich-elementti

Materiaali	d	λ	R	%
Sisäpuolen pintavastus			0,130	3,6 %
Betoni (sisäkuori)	150	1,2	0,100	
Eriste (Kingspan Therma TW58 150 mm)	150	0,023	6,522	95,0 %
Betoni (ulkokuori)	90	1,2	0,075	
Tuuletusväli	48	0	0	0,7 %
Ulkooverhous	25	0	0	
Ulkopuolen pintavastus			0,040	
RT [m ² K / W]			6,432	100 %
U-arvo [W/m ² K]			0,155	
+ pistemäinen lisäkonduktanssi			0,006	

= 0,161

Johtopäätöksiä mittaustuloksista

- Lämpötilamittausten tulosten arvioinnissa voidaan verrata pakkasjakson lämpötilajakaumaa laskennallisiin eristävyiden (lämmönvastus, R) arvoihin. Mittausten perusteella lämpötilajakauma pakkasjaksolla vastaa eri materiaalikerrosten eristävyiden suunnitteluarvoja kohtuullisen hyvin (eristekerroksen sisäpuolella mitattu jakauma $U_5S_1 = 91$ %, $U_5S_2 = 94$ %, laskennallinen = 99 %).
- Huomioitavaa on betonisen sisäkuoren laskennallista osuutta suurempi osuus mitatusta lämpötilajakaumasta ($U_5S_1 = 10$ %, $U_5S_2 = 12$ %, laskennallinen = 3,6 %). Tämän arvioidaan perustuvan betonin suureen termiseen massaan, joka pitää sisäkuoren lämpötilan korkeammalla pakkasjakson aikana, kuin mitä lämmönvastusten perusteella arvioitu lämpötilajakauma olisi.
- Myös rakenteen ulko-osassa on hieman suurempi osuus lämpöjakaumasta, minkä arvioidaan perustuvan tuuletusvälin toimintaan. Tuuletusväliä ei lämmönvastusten laskennassa oteta lainkaan huomioon. Myös betonisen ulkokuoren termisellä massalla voi olla vaikutusta lyhyen aikavälin tarkastelun kannalta.
- Lämpötilamittauksiin perustuvan tarkastelun perusteella elementin lämpötekninen toiminta on odotetun kaltaista.

Elementti toimii lämpöteknisesti tehokkaalla ja suunnitellulla tavalla.



TULOSTEN YHTEENVETO

Mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että kaikki kohteessa käytetyt ulkoseinä-rakenteet toimivat lämpöteknisesti odotetulla tavalla. Arvio perustuu käyttötilanteessa mitattuihin lämpötasoihin rakenteen poikkileikkauksen eri syvyyksiltä. Lämpötekni-sissä mittauksissa elementtien lämpöjakaumat ovat olleet suunnitellun kaltaisia.

Merkille pantavaa on ollut pakkasjaksoihin kohdistuvissa, lyhyen aikavälin tarkas-teluissa, betonielementin sisäkuoren laskennallista suurempi osuus lämpöjakaumasta. Tämän arvioidaan johtuvan betonin termisestä massasta eli massiivisen betoniraken-teen lämmönvarauskyvystä. Aiemmin on esitetty arvioita siitä, että korkea terminen massa säästää lämmitysenergiassa 5-15 % (Betoniteollisuus, 2010). Tiettyihin prosent-tilukuihin perustuvia arvioita ei voida EFCONE:n mittaustulosten pohjalta kumota tai vahvistaa, mutta viitteitä tämän tyyppisen ilmiön toteutumisesta saatiin myös tässä tutkimuskohteessa.

LÄHDELUETTELO

1. Betoniteollisuus ry. Kivitalojen energiatehokkuus. Tampere : Suomen Rakennusme-dia Oy, 2010.

Mittaustuloksia nykyaikaisten betonielementtien kosteusteknisestä toiminnasta arktisissa olosuhteissa

JOHDANTO

EFCONE-projektin kosteustekninen seurantatutkimus toteutettiin aikavälillä 1.8.2015–15.2.2017. Mittausdataa on kerätty myös ennen tuota aikaväliä ja jatkettu tämän jälkeenkin. Analysoitava data on kuitenkin rajattu edellä mainittuun aikaikkunaan. Seurantatutkimus kattaa näin ollen kaksi syyskautta, kaksi talvikautta ja yhden kevät-kesäkauden. Aikaväliltä kerättyä dataa voidaan pitää näytteenä tutkittavien elementtien toiminnasta. Ulkoiset olosuhteet voivat vaihdella paljonkin eri vuosien välillä, joten edustavamman otoksen mahdollistamiseksi tulee tehdä esimerkiksi simulointeihin perustuvia tarkasteluja.

Kohteen tutkimusjärjestelyt, rakennetyypit jne. on esitetty tarkemmin artikkelissa Nykyaikaisten betonielementtien lämpö- ja kosteustekninen toiminta arktisissa olosuhteissa – tutkimusjärjestelyt. Tämän tutkimuksen oleelliset näkökulmat kosteusteknisen toiminnan tarkasteluissa ovat olleet suhteellisen kosteuden arvojen mittaaminen rakenteen poikkileikkauksen suunnassa eri tasoissa ja kosteusjakautuksen hahmottaminen tätä kautta. Mittaustulosten arvioinnissa on tarkasteltu riskiä diffuusion kondenssille, kesäkondenssille tai homeen kasvulle.

Tutkimuskohteessa on käytetty viittä erilaista betonielementtityyppiä alla olevan taulukon (Taulukko 8) mukaisesti. Tässä artikkelissa näistä neljän elementtityypin tulokset on käsitelty omissa kappaleissaan. Yhden elementtityypin (U₃) tulokset on jouduttu mittausjärjestelmässä esiintyneiden virheiden vuoksi jättämään pois.

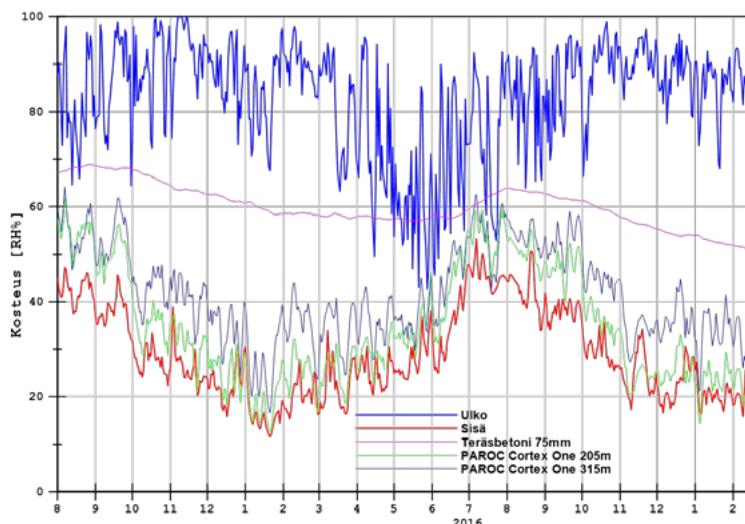
Taulukko 8. Tutkimuskohteen elementtityypit

Elementtityyppi	Eristetyyppi	Mittaussektorit
Tuulettuva, kivillaeristetty julkisivuelementti	PAROC Cortex One	U1S1 & U1S2
Kivillaeristetty sandwich-elementti	PAROC PreCast ggt	U2S1 & U2S2
Polystyreenieristetty sandwich-elementti (ei analysoitu)	Thermisol Platina Sänkkäri	U3S1 & U3S2
Eristerapattu julkisivuelementti	PAROC FAL1	U4S1 & U4S2
Polyuretaanieristetty sandwich-elementti	Kingspan Therma TW58 150 mm	U5S1 & U5S2

ELEMENTTIEN KOSTEUSTEKNINEN TOIMINTA, MITTAUSTULOKSET

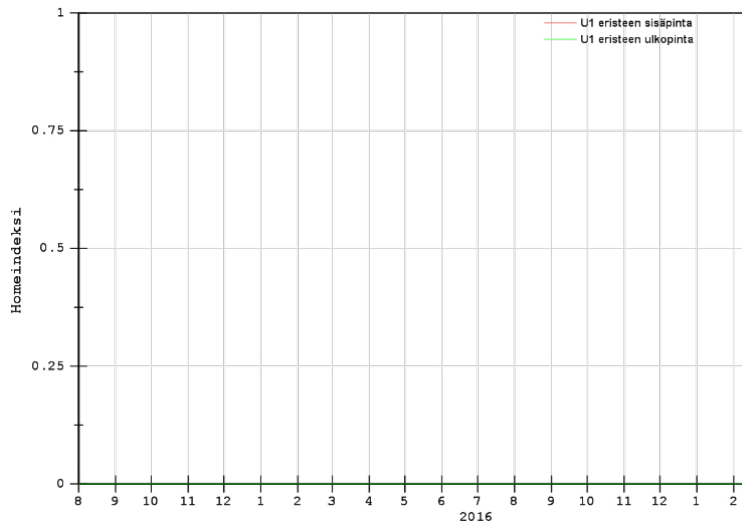
Tuulettuva, kivillaeristetty julkisivuelementti

Oheisessa kuvassa (Kuva 27) on esitetty elementin **kosteusteknisten mittausten** tuloksia tutkimusjaksolla. Materiaalimerkinnät ja graafinen esitystapa ovat samankaltaiset kuin edellä on kuvattu lämpöteknisen toiminnan osalta: Layer 1 [Teräsbetoni 75 mm], Layer 2 [PAROC Cortex One 205 mm] ja Layer 3 [PAROC Cortex One 315 mm]. Tulokskäyrästä esitetään U1S1- ja U1S2 mittaussektoreiden yhdistettyjä tuloksia. Lisäksi tulokskäyrästä on esitetty ulko- ja mittauspisteiden suhteellisen kosteuden mittaustulokset.



Kuva 27. Elementin mittauspisteiden suhteellisen kosteuden mittaustuloksia aikavälillä 1.8.2015–15.2.2017 (U1, S1 & S2 yhdistetty)

Seuraavassa kuvassa (Kuva 28) on esitetty **homeindeksin** laskennan tuloksia tutkimusjaksolla. Homeindeksin määrittäminen perustuu edellä esitettyihin lämpö- ja kosteusteknisten mittausten tuloksiin. Homeindeksitarkastelu on kohdistettu eristetilan sisä- ja ulko-osien mittauspisteisiin (Layer 2 & Layer 3). Tulosten tarkastelussa arvioidaan homeindeksiä suhteessa sille määriteltyihin raja-arvoihin. Kuvaa on skaalattu välillä 0...1, koska arvoa yksi voidaan pitää VTT-TTY-homemallin mukaisesti turvallisen tason rajana.



Kuva 28. Homeindeksin laskennalliset arvot aikavälillä 1.8.2015–15.2.2017 (U1, S1 & S2 yhdistetty)

Johtopäätöksiä mittaustuloksista

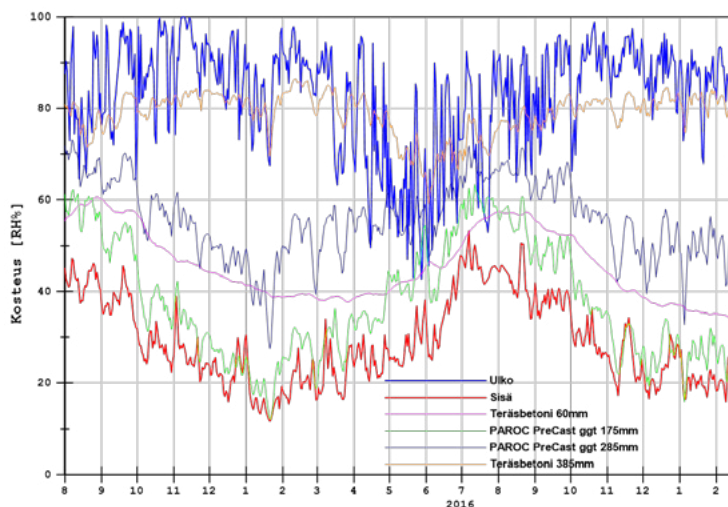
- Mittausten perusteella eristetilan suhteellisen kosteuden lukemat noudattelevat ulko- (ja sisä-)olosuhteiden vaihtelua säännöllisesti.
- Kivivillan vesihöyrynläpäisevyys sekä vesihöyryä läpäisevä tuulensuojapinnoite edesauttavat suhteellisen kosteuden pysymistä matalalla tasolla läpi mittausjakson.
- Elementin kosteusteknisessä toiminnassa ei esiinny riskiä diffuusion kondenssille tai kesäkondenssille mittausjakson aikana.
- Mittausten perusteella elementissä ei esiinny riskiä homeenkasvulle. Ei tarvetta lisäselvityksille.

Elementti toimii kosteusteknisesti turvallisella ja suunnitellulla tavalla.



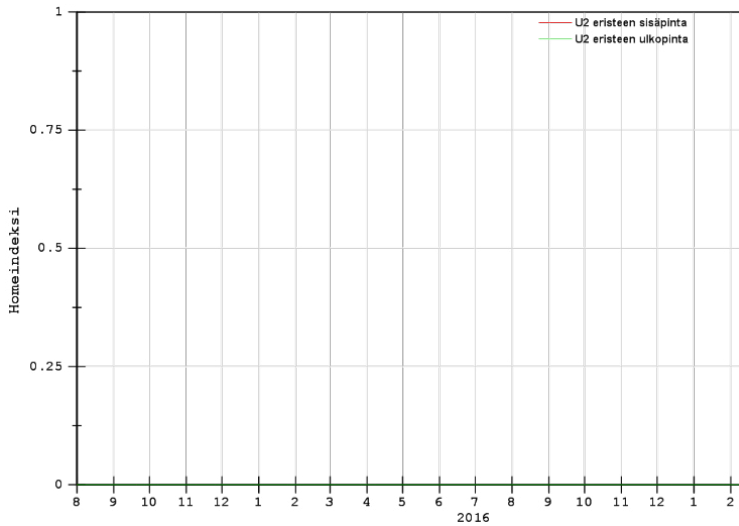
Kivivillaeristetty sandwich-elementti

Oheisessa kuvassa (Kuva 29) on esitetty elementin **kosteusteknisten mittausten** tuloksia tutkimusjaksolla. Materiaalimerkinnät ja graafinen esitystapa ovat samankaltaiset kuin edellä on kuvattu lämpöteknisen toiminnan osalta: Layer 1 [Teräsbetoni 60 mm], Layer 2 [PAROC PreCast ggt 175 mm], Layer 3 [PAROC PreCast 285 mm] ja Layer 4 [Teräsbetoni 385 mm]. Tulokäyrästä esitetään U2S1- ja U2S2 mittaussektoreiden yhdistettyjä tuloksia. Lisäksi tulokäyrästä on esitetty ulko- ja mittauspisteiden suhteellisen kosteuden mittaustuloksia.



Kuva 29. Elementin mittauspisteiden suhteellisen kosteuden mittaustuloksia aikavälillä 1.8.2015–15.2.2017 (U2, S1 & S2 yhdistetty)

Seuraavassa kuvassa (Kuva 30) on esitetty **homeindeksin** laskennan tuloksia tutkimusjaksolla. Homeindeksin määrittäminen perustuu edellä esitettyihin lämpö- ja kosteusteknisten mittausten tuloksiin. Homeindeksitarkastelu on kohdistettu eristetilän sisä- ja ulko-osien mittauspisteisiin (Layer 2 & Layer 3). Tulosten tarkastelussa arvioidaan homeindeksiä suhteessa sille määriteltyihin raja-arvoihin. Kuvaaja on skaalattu välillä 0...1, koska arvoa yksi voidaan pitää VTT-TTY-homemallin mukaisesti turvallisen tason rajana.



Kuva 30. Homeindeksin laskennalliset arvot aikavälillä 1.8.2015–15.2.2017 (U2, S1 & S2 yhdistetty)

Johtopäätöksiä mittaustuloksista

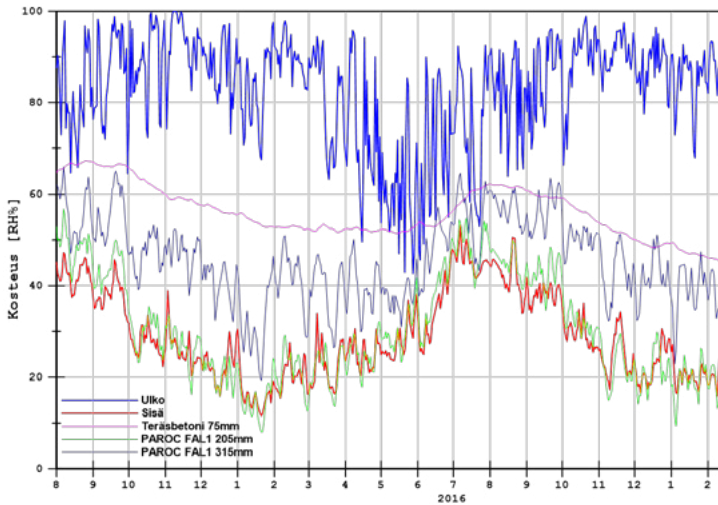
- Mittausten perusteella eristetilän suhteellisen kosteuden lukemat noudattelevat ulko- (ja sisä-)olosuhteiden vaihtelua melko säännöllisesti.
- Kivivillan vesihöyrynläpäisevyys sekä eristeen tuuletusurien toiminta edesauttavat suhteellisen kosteuden pysymistä kohtuullisella tasolla läpi mittausjakson.
- Elementin kosteusteknisessä toiminnassa ei esiinny riskiä diffuusion kondenssille tai kesäkondenssille mittausjakson aikana.
- Mittausten perusteella elementissä ei esiinny riskiä homeenkasvulle. Ei tarvetta lisäselvityksille.

Elementti toimii kosteusteknisesti turvallisella ja suunnitellulla tavalla.



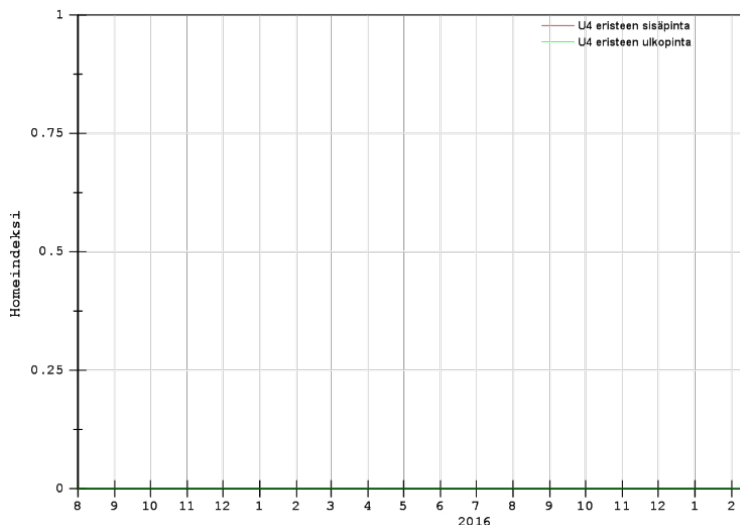
Eristerapattu julkisivuelementti

Oheisessa kuvassa (Kuva 31) on esitetty elementin **kosteusteknistien mittausten** tuloksia tutkimusjaksolla. Materiaalimerkinnät ja graafinen esitystapa ovat samankaltaiset kuin edellä on kuvattu lämpöteknisen toiminnan osalta: Layer 1 [Teräsbetoni 75 mm], Layer 2 [PAROC FAL1 205 mm] ja Layer 3 [PAROC FAL1 315 mm]. Tulostuloksilla esitetään U4S1- ja U4S2 mittauseroalueiden yhdistettyjä tuloksia. Lisäksi tulostuloksilla on esitetty ulko- ja mittauspisteiden suhteellisen kosteuden mittaustuloksia.



Kuva 31. Elementin mittauspisteiden suhteellisen kosteuden mittaustuloksia aikavälillä 1.8.2015–15.2.2017 (U4, S1 & S2 yhdistetty)

Seuraavassa kuvassa (Kuva 32) on esitetty **homeindeksin** laskennan tuloksia tutkimusjaksolla. Homeindeksin määrittäminen perustuu edellä esitettyihin lämpö- ja kosteusteknisten mittausten tuloksiin. Homeindeksitarkastelu on kohdistettu eristetilän sisä- ja ulko-osien mittauspisteisiin (Layer 2 & Layer 3). Tulosten tarkastelussa arvioidaan homeindeksiä suhteessa sille määriteltyihin raja-arvoihin. Kuvaaja on skaalattu välillä 0...1, koska arvoa yksi voidaan pitää VTT-TTY-homemallin mukaisesti turvallisen tason rajana.



Kuva 32. Homeindeksin laskennalliset arvot aikavälillä 1.8.2015–15.2.2017 (U4, S1 & S2 yhdistetty)

Johtopäätöksiä mittaustuloksista

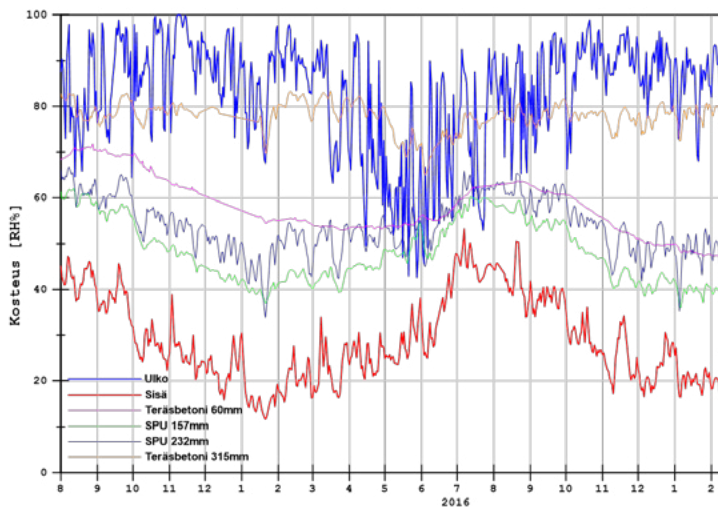
- Mittausten perusteella eristetilän suhteellisen kosteuden lukemat noudattelevat ulko- (ja sisä-)olosuhteiden vaihtelua säännöllisesti.
- Kivivillan vesihöyrynläpäisevyys sekä vesihöyryä läpäisevä rappauspinnote edesauttavat suhteellisen kosteuden pysymistä matalalla tasolla läpi mittausjakson.
- Elementin kosteusteknisessä toiminnassa ei esiinny riskiä diffuusion kondenssille tai kesäkondenssille mittausjakson aikana.
- Mittausten perusteella elementissä ei esiinny riskiä homeenkasvulle. Ei tarvetta lisäselvityksille.

Elementti toimii kosteusteknisesti turvallisella ja suunnitellulla tavalla.



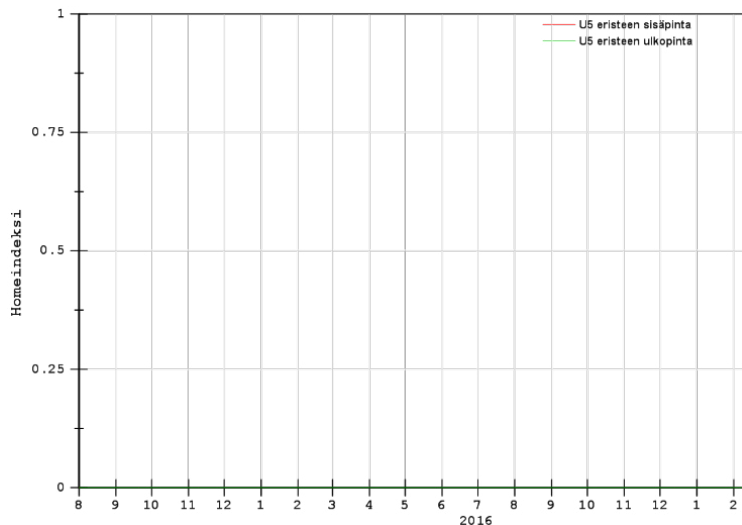
Polyuretaanieristetty sandwich-elementti

Oheisessa kuvassa (Kuva 33) on esitetty elementin **kosteusteknisten mittausten** tuloksia tutkimusjaksolla. Materiaalimerkinnyt ja graafinen esitystapa ovat samankaltaiset kuin edellä on kuvattu lämpöteknisen toiminnan osalta: Layer 1 [Teräsbetoni 60 mm], Layer 2 [Kingspan Therma TW58 157 mm], Layer 3 [Kingspan Therma TW58 232 mm] ja Layer 4 [Teräsbetoni 315 mm]. Tulokäyrästä esitetään U5S1- ja U5S2 mittaussektoreiden yhdistettyjä tuloksia. Lisäksi tulokäyrästä on esitetty ulko- ja mittauspisteiden suhteellisen kosteuden mittaustuloksia.



Kuva 33. Elementin mittauspisteiden suhteellisen kosteuden mittaustuloksia aikavälillä 1.8.2015–15.2.2017 (U5, S1 & S2 yhdistetty)

Seuraavassa kuvassa (Kuva 34) on esitetty **homeindeksin** laskennan tuloksia tutkimusjaksolla. Homeindeksin määrittäminen perustuu edellä esitettyihin lämpö- ja kosteusteknisten mittausten tuloksiin. Homeindeksitarkastelu on kohdistettu eristetilän sisä- ja ulko-osien mittauspisteisiin (Layer 2 & Layer 3). Tulosten tarkastelussa arvioidaan homeindeksiä suhteessa sille määriteltyihin raja-arvoihin. Kuvaaja on skaalattu välillä 0...1, koska arvoa yksi voidaan pitää VTT-TTY-homemallin mukaisesti turvallisen tason rajana.

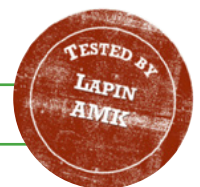


Kuva 34. Homeindeksin laskennalliset arvot aikavälillä 1.8.2015–15.2.2017 (U5, S1 & S2 yhdistetty)

Johtopäätöksiä mittaustuloksista

- Mittausten perusteella eristetilän suhteellisen kosteuden lukemat noudattelevat ulko- (ja sisä-)olosuhteiden vaihtelua melko säännöllisesti.
- Eristetilän suhteellisen kosteuden lukemat ovat pysyneet kohtuullisella tasolla läpi mittausjakson.
- Elementin kosteusteknisessä toiminnassa ei esiinny riskiä diffuusion kondenssille tai kesäkondenssille mittausjakson aikana.
- Mittausten perusteella elementissä ei esiinny riskiä homeenkasvulle. Ei tarvetta lisäselvityksille.

Elementti toimii kosteusteknisesti turvallisella ja suunnitellulla tavalla.



YHTEENVETO

EFCONE-projektin tavoitteena oli tuottaa luotettavaa, puolueetonta ja julkista tutkimusta nykyaikaisten ulkoseinärakenteiden lämpö- ja kosteusteknisestä toimivuudesta. Kittilän Levillä sijaitsevaan koulutus- ja työhyvinvointikeskus Welleviin sijoitettu tutkimus kohdistui viiden erityyppisen betonielementin toiminnan tarkasteluun. Tutkimuksen toteuttaminen oli huomioitu jo kohteen rakennusvaiheessa, jolloin mittausjärjestelmään kuuluvat lämpö- ja kosteusanturit asennettiin rakenteisiin. Mielenkiintoisen tutkimuskohteesta tekivät mm. sen jatkuva käyttäminen koulutus-, majoitus- yms. toiminnassa sekä erityisesti kohteen arktinen toimintaympäristö. Tutkimuksen olosuhteista on todettava, että kohteen visuaalisen ilmeen vuoksi toteutettu yhtenäinen puujulkisivu tuuletusvälillä ei ole tyypillinen (vaikka onkin mahdollinen) käyttötilanne useimmille betonielementeille. Tämän vuoksi mahdolliset rakennetta kastelevat viistosateet ja niihin liittyvät kuivumiseen tai jäätymissulamissykleihin liittyvät kestävyys- ja kosteusturvallisuustarkastelut eivät ole olleet mahdollisia tämän projektin aikana.

Mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että kaikki kohteessa käytetyt ulkoseinärakenteet toimivat kosteusteknisesti turvallisella tavalla. Arvio perustuu käyttötilanteessa mitattuihin kosteustasoihin rakenteen poikkileikkauksen eri syvyyksiltä. Mittaustulosten perusteella on voitu havainnoida diffuusion kondenssin tai kesäkon- denssin mahdollista ilmenemistä sekä homeriskin tasoa rakenteessa. Yleisellä tasolla mittauksen perusteella voidaan sanoa, että tuulettuvilla seinärakenteilla keskimääräiset suhteellisen kosteuden tasot ovat olleet alhaisempia kuin sandwich-tyyppisillä rakenteilla. On syytä kuitenkin korostaa, että tämä ei ole tutkimusjakson aikana aiheuttanut minkäänlaisia riskejä yhdenkään rakenteen osalta.

EFCONE-projektin tulokset ovat positiivisia nykyaikaisten, hyvin eristettyjen betonielementtien lämpö- ja kosteusteknisestä toimivuuden kannalta. Hyvin toteutetut elementtirakenteet tuottavat normaalissa käyttötilanteessa energiatehokkaan ja kosteusturvallisen vaipparatkaisun rakennukselle. Tutkimustoiminnan näkökulmasta tässä projektissa toteutetun kenttätutkimuksen lisäksi tarvittaisiin lisätietoa esimerkiksi viistosateen merkityksestä kosteusteknisestä toimivuuden näkökulmasta. Tällaisissa olosuhteissa esimerkiksi passiivitasolle eristettyjen elementtien kuivumiskyky on mielenkiintoinen tutkimusaihe.

EFCONE-projektin tulosten hyödynnettävyys näyttäisi olevan jatkossakin hyvällä tasolla. Suomalaista lähestymistapaa lähes nollaenergiarakentamiseen (nZEB) kartoittaneen FInZEB-hankkeen tulosten perusteella, ehdotetut nZEB-E-lukutasot eivät edellytä muutoksia rakenteiden U-arvojen vaatimuksiin nykyisestä tasosta (1). Projektin aikana on myös julkaistu Ympäristöministeriön luonnos asetuksesta uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. Luonnos vahvistaa aikaisemman käsityksen, eli ohjaus tapahtuu jatkossa E-lukutasojen määrittelyn kautta, esim. seinärakenteiden lämmönläpäisykertoimien vertailuarvoihin ei tule suoraan muutoksia (2).

LÄHDELUETTELO

1. Reinikainen, Erja;Loisa, Lassi ja Tyni, Anni. Lähes nollaenergiarakennuksen käsitteet, tavoitteet ja suuntaviivat kansallisella tasolla. s.l. : FInZEB-hanke, 2015.
2. Ympäristöministeriö. Asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta, Luonnos 16.2.2017. Helsinki : Ympäristöministeriö, 2017.

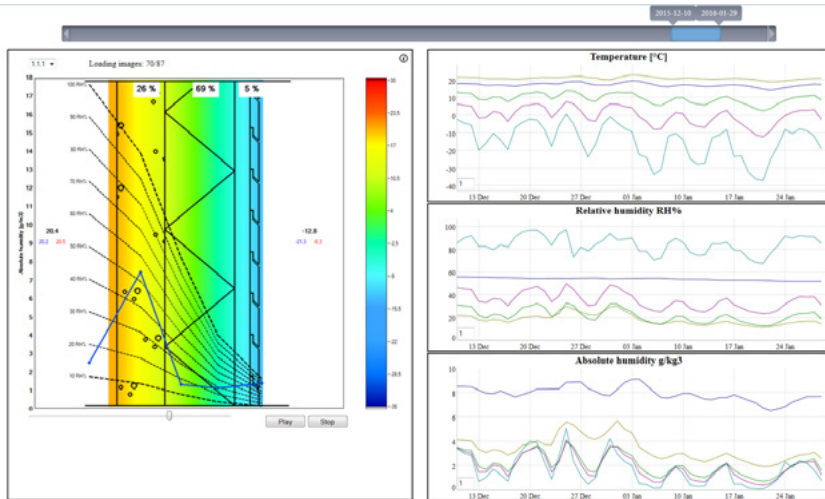
Käyttöliittymä mittaustulosten visualisointiin

Projektin keskeinen tavoitteena on todentaa nykymääräysten mukaisten betonielementtien toimivuus todellisessa käyttöympäristössä. EFCONE-projektissa haastetta lähestyttiin kattavilla mittausjärjestelyillä. Jokaista viittä betonielementtiä kohden on 12-16 lämpö- ja kosteusanturia elementtityypistä riippuen. Jokaiselta anturilta mittausdataa tulee kerran minuutissa. Näin ollen mittaustiedon jalostaminen ymmärrettävään muotoon ja tiedon esittäminen visuaalisesti koettiin tärkeäksi projektin onnistumisen kannalta.

VISUAALINEN JA INTUITIIVINEN KÄYTTÖKOKEMUS

Elementtien lämpö- ja kosteusteknisen toimivuuden analysoinnin taustalla on Lapin ammattikorkeakoulun kolmen tutkimusryhmän yhteistyö. Älykkäisiin ICT-ratkaisuihin erikoistunut Arctic Power -tutkimusryhmä vastasi tiedonsiirtojärjestelmän toteutuksesta ja datan käsittelystä ja hallinnoinnista. Ohjelmistotekniikan osaamista ja visuaalisen käyttöliittymän toteutuksesta vastasi ohjelmistotekniikan tutkimusryhmä pLab. Käyttöliittymän määrittelystä vastasi rakennustekniikan Arctic Civil Engineering -tutkimusryhmä. Tulosten tarkasteluun tarkoitetun käyttöliittymän suunnittelun lähtökohtana oli, että elementtien lämpö- ja kosteusteknisen toimivuuden tarkastelu on helppoa ja vaivatonta. Käyttökokemuksessa painotetaan visuaalisuuteen ja intuitiivisuuteen, jotta se miellyttävä käyttää ja hyödynnettävissä ilman erillistä perehdytystä.

Käyttöliittymän ensimmäinen versio toteutettiin webselaimessa toimivana valikkopohjaisena ratkaisuna. Lämpö- ja kosteustiedot tiedot esitettiin taulukkomuotoisesti sekä betonielementin poikkileikkauksessa värikoodeilla ja käyrästötiedoilla. (Kuva 35.) Ensimmäistä versiota käyttöliittymästä hyödynnettiin projektihenkilöstön käyttöön tulosten analysoinnissa.



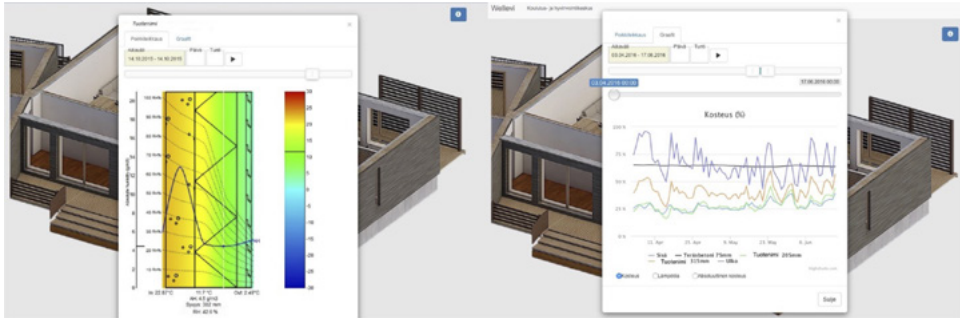
Kuva 35. Ensimmäinen versio käyttöliittymästä tulosten esittämiseen

Käyttöliittymän toiseen versioon haluttiin tuoda kokonaisvaltaisempi ymmärrys mitatusta datasta. Visuaalisuutta haluttiin tuoda värien ja muotojen avulla, numeerisen esittämisen sijaan. Tavoitteena oli, että yhdellä vilkaisulla käyttäjä saa näkymästä tiedon mm. elementin sijainnista rakennuksessa, elementin fyysisestä koosta, elementissä olevat täydentävät rakenneosat, kuten ikkunat ja ovet sekä muut läpiviennit. Ikkunat, ovet tai muut läpiviennit elementeissä voivat vaikuttaa mittaustuloksiin, mikäli ne sijaitsevat lähellä antureita. Elementin geometria vaikuttaa lämmön- ja kosteuden siirtymiseen, kuten liitoskohdat tai nurkat voivat muodostaa kylmäsiltoja. Nämä asiat voidaan huomioida, kun nähdään elementin muoto ja sijainti rakennuksessa.



Kuva 36. Käyttöliittymän kehitysversio.

Elementtikohtaisessa näkymässä voi tarkastella yksittäisen elementin lämpö- ja kosteusteknistä käyttäytymistä poikkileikkauskuvana tai graafisena esityksenä. Liukuvalitsimilla valitaan tarkasteltava aikajakso. Lämpötilan ja kosteuden muutos ajansuhteen voidaan simuloida liikkuvana kuvana poikkileikkauskuvassa. Graafisessa esityksessä voidaan valita eri kerrosten lämpötila, suhteellinen- tai absoluuttinen kosteus.



Kuva 37. Elementtikohtainen näkymä käyttöliittymässä.

Käyttöliittymä on projektin osallistujayritysten sekä Lapin ammattikorkeakoulun tutkimuskäyttöön tarkoitettu alusta. Yritykset saavat lähes reaaliajassa päivittyvää tietoa omien tuotteidensa lämpö- ja kosteusteknisestä käyttäytymisestä. Tietoa voidaan hyödyntää esimerkiksi uusien tuotteiden suunnittelussa.

Elementtien lämpö- ja kosteusteknisen toimivuuden simulointi

JOHDANTO

Tässä artikkelissa esitellään EFCONE-projektissa tehtyä rakennusfysikaalista simulointia Wellevin kohteessa käytössä olevilla rakenteilla. Simulointien tarkoituksena oli tutkia Wellevin rakennetyyppien rakennusfysikaalista toimintaa simuloinnin avulla. Työn tarkoituksena oli varmentaa Wellevin kohteessa mitattuja tuloksia simuloituihin.

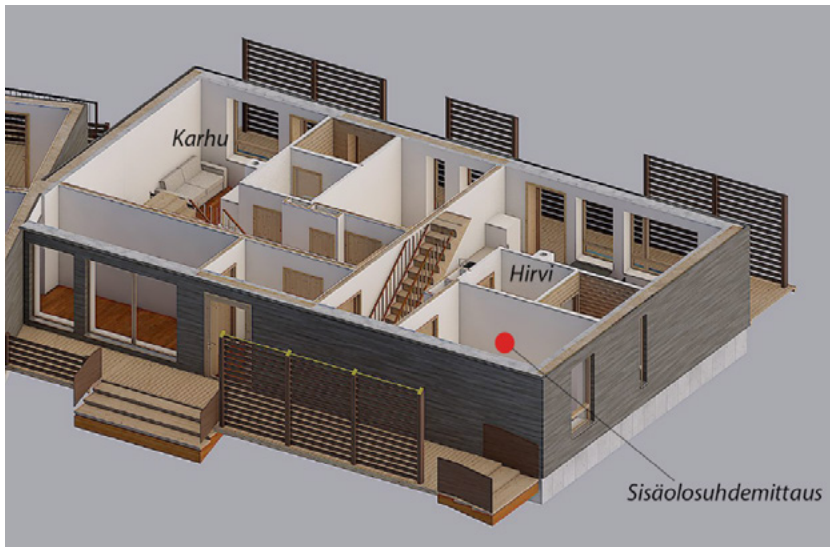
Rakennusfysikaalinen simulointi suoritettiin COMSOL Multiphysics-ohjelman heat and moisture transfer-moduulilla. Rakennusfysikaalisella simuloinnilla voidaan arvioida eri tekijöiden vaikutusta rakenneratkaisun lämpö- ja kosteustekniseen toimivuuteen. Simulaatiomallissa voidaan muokata rakenteen ominaisuuksia, materiaaliominaisuuksia sekä ulkopuolisia rasituksia.

Simulointimallien tuloksia tarkasteltaessa on aina huomioitava eroavaisuudet mitatun ja simuloidun tilanteen välillä. Simulointimallit ovat aina suuntaa-antavia ja niiden tuloksia tulee tulkita kriittisesti. Mallit ovat aina niin sanottuja ideaalitulanteita, todellisissa kohteissa ei aina toteutus ole suunnitellun kaltainen.

SIMULOINNIN LÄHTÖTIEDOT

Yleistä

Simulointimalleissa on käytetty Levillä, Wellevissä ja mitattuja sisäolosuhteita. Ulko-olosuhdetiedot saatiin Ilmatieteenlaitoksen avoimesta datasta. Wellevin huoneistoihin asennettiin sisäolosuhdemittaukset 4.5.2015, jonka vuoksi simulointijaksoksi valittiin 5.5.2015- 31.7.2016. Sisäolosuhteina simuloinnissa käytettiin huoneisto Hirvessä mitattuja olosuhteita. Alla olevassa kuvassa esitetään poikkileikkauskuva Wellevin A-osasta, jossa tutkittavat elementit sijaitsevat.



Kuva 38. Wellevi huoneistot ja sisäolosuhdemittauspiste

Rakennetyypit ja mittauspisteet

EFCONE-projektin tutkimuskohteena toimiva Wellevin koulutus- ja työhyvinvointikeskus on toteutettu viidellä eri elementtityypillä. Tutkittavat elementtityypit koh-teessa ovat:

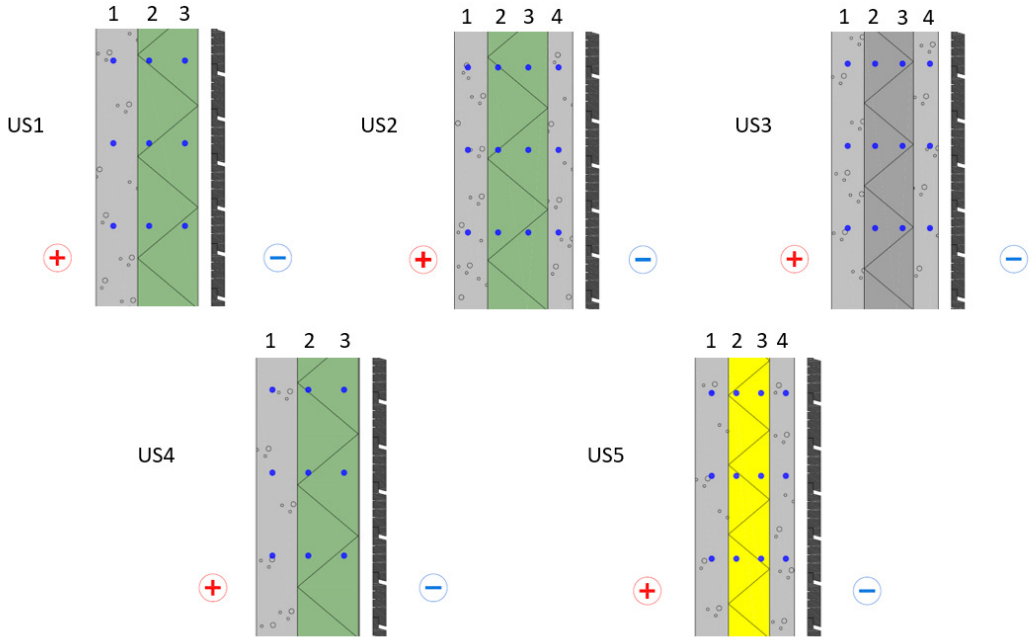
- US1 PAROC Cortex One
- US2 PAROC PreCast ggt
- US3 Thermisol Platina Sänkkäri
- US4 PAROC FAL1 (nykyinen tuotenimi Linio 8o)
- US5 Kingspan Therma TW58

Mittauspisteiden etäisyydet rakenteen sisäpinnasta esitetään taulukossa 9.

Taulukko 9. Mittauspisteiden etäisyydet rakenteen sisäpinnasta

Mittauspiste	US1 PAROC Cortex One	US2 PAROC PreCast ggt	US3 Thermisol Platina Sänkkäri	US4 PAROC FAL1	US5 Kingspan Therma TW58
1	75 mm	60 mm	60 mm	75 mm	60 mm
2	205 mm	175 mm	165 mm	205 mm	157 mm
3	315 mm	285 mm	255 mm	315 mm	232 mm
4	-	385 mm	345 mm	-	315 mm

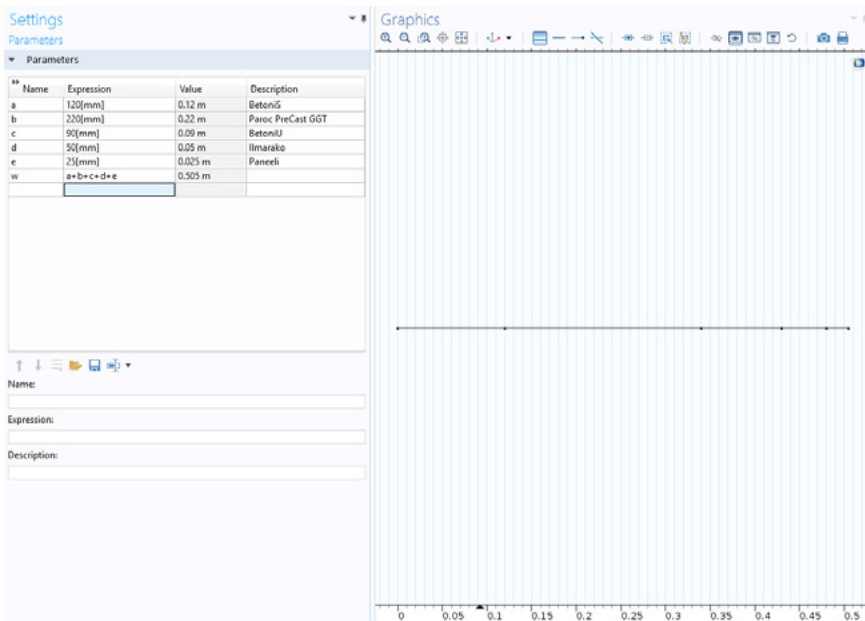
Rakennetyypit sekä rakenteiden sisällä sijaitsevat mittauspisteet ovat esitetty seuraavassa kuvassa.



Kuva 39. Welleivin rakennetyypit ja mittauspisteet

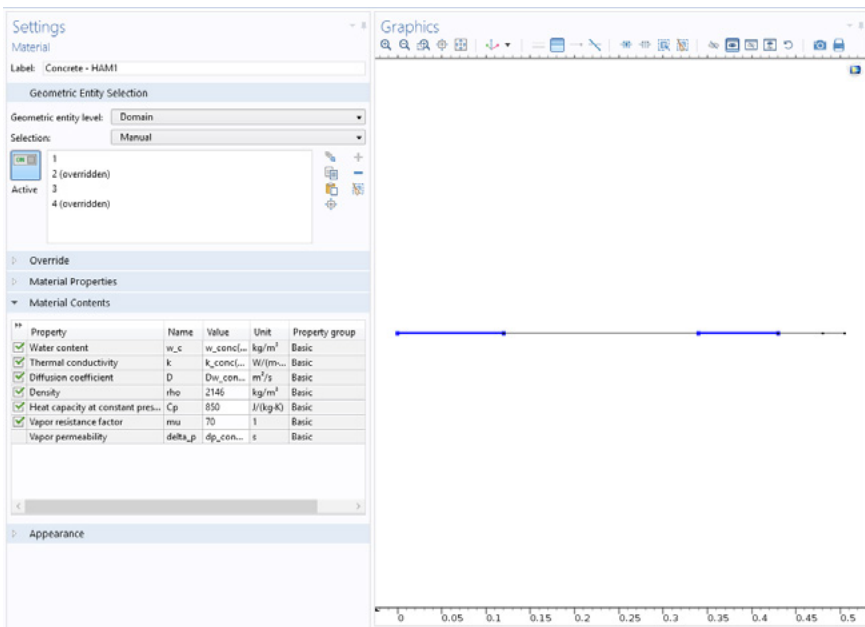
Mallin rakentaminen

COMSOL Multiphysics-ohjelma on fysikaalinen simulointiohjelma, jolla voidaan yhdistää useita fysiikoita samaan malliin. Tässä työssä käytetään lämmön- ja kosteudensiirron yhdistelmää. Ohjelmalla on mahdollista simuloida fysiikoita eri ulottuvuuksissa 1d, 2d ja 3d. Tähän työhön valittiin käytettäväksi ulottuvuudeksi 1d, jotta laskenta olisi nopeampaa ja yksinkertaisempaa. Valittu ulottuvuus oli riittävä työn tavoitetta varten. Mikäli olisi haluttu tarkastella esimerkiksi nurkkakohtien tai ansaiden vaikutusta rakenteen toimintaan, olisi 2d tai 3d ollut oikea valinta. Kuva 40 esitetään kuvakaappaus ohjelman mallin rakenteesta.

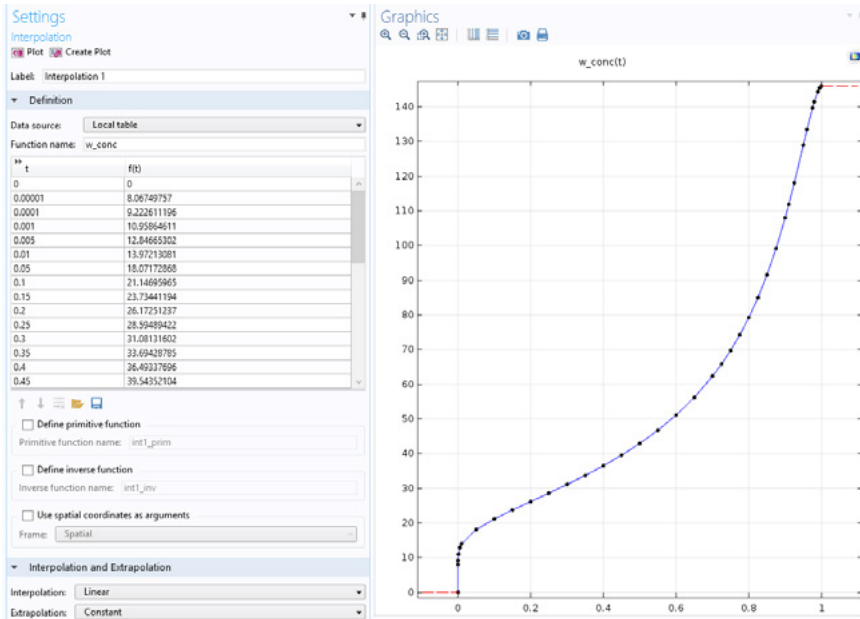


Kuva 40. COMSOL mallin rakenne US2

Malliin sijoitettiin rakennemateriaalien tiedot, joiden perusteella ohjelma laskee simuloinnin tulokset. Rakennemateriaalien tietoja saatiin valmistajien sivuilta sekä COMSO-Lin järjestämän koulutuksen yhteydessä käytetyistä. Kuva 41 ja 42 esitetään betonin ominaisuus kuvakaappaus sekä betonin kosteuspitoisuutta suhteellisen kosteuden funktiona.

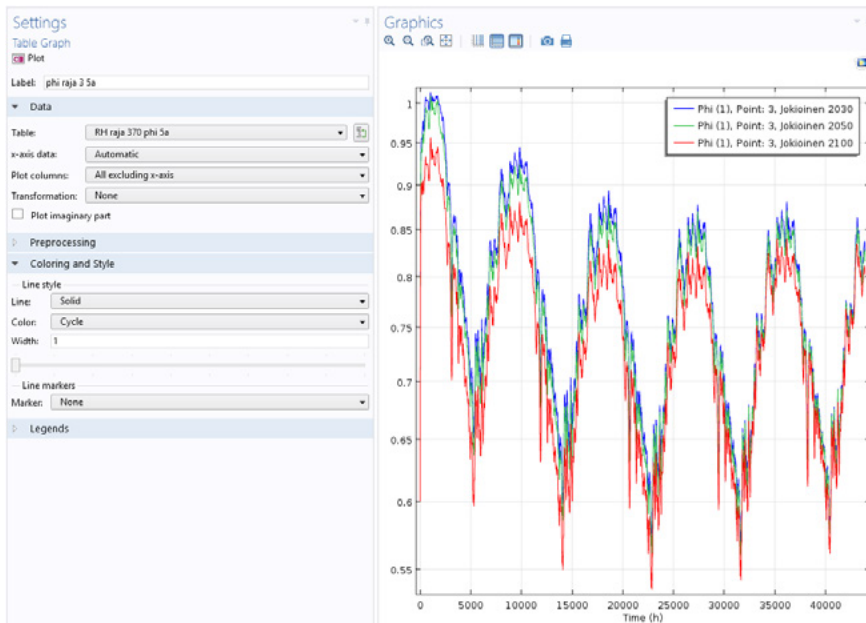


Kuva 41. Betonin ominaisuudet



Kuva 42. Betonin vesipitoisuus suhteellisen kosteuden funktiona

Simulointimalleihin lisättiin ilmatieteenlaitoksen säädädata, jonka jälkeen laskennan suoritettiin. Kuvassa 43 esitetään kuvakaappaus, jossa näkyy 5 vuoden COMSOL laskennan tuloksia US2 rakenteelle rajassa 3 suhteelliselle kosteudelle.



Kuva 43. Simulointitulokset US2 suhteellinen kosteus rajassa 3 5 vuoden ajalle.

Simulointitulokset vietiin DIADem-ohjelmaan, jossa toteutettiin tulosten esitys. Myöhemmin esitettävät simulointitulokset ovat toisen vuoden tuloksia. Ensimmäinen simulointivuosi rajattiin pois, koska Wellevin tutkimusympäristössä olevat betonielementit ovat olleet tutkimusympäristössä jo useamman vuoden. Näin ollen simuloitujen ja mitattujen tulokset ovat vertailukelpoisempia keskenään.

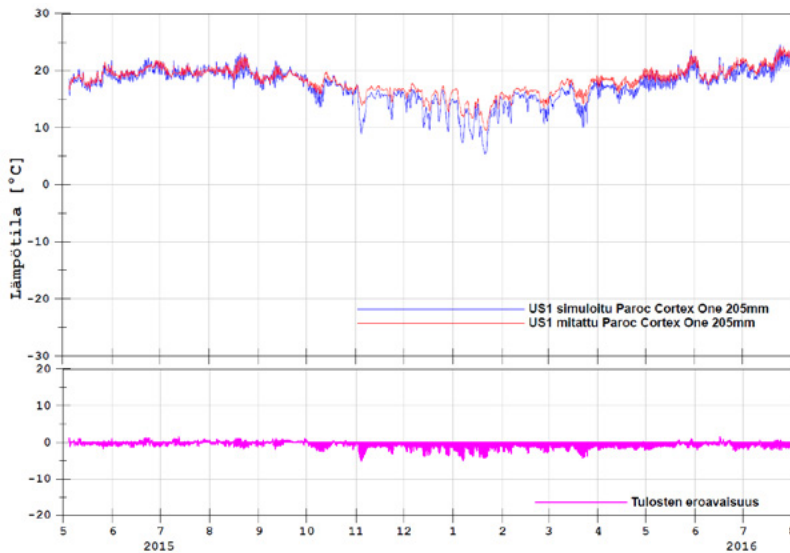
SIMULOIDUN JA MITATUN MITTAUSTULOSTEN VERTAILU

Yleistä

Tässä osiossa vertaillaan mitattuja ja simuloituja tuloksia keskenään. Simulointimalleista tulostettiin ulos tulokset samoilta mittauspisteiltä, kuin missä todellisuudessa mittausanturit sijaitsevat. Mitatut tulokset sekä simuloitujen tulokset vietiin DIADem-ohjelmaan, jolla suoritettiin mittaustulosten vertailu. Aikaisemmissa artikkeleissa mainittiin, että US₃-seinärakenteen mittausjärjestelmässä esiintyneiden virheiden vuoksi kyseiset mittaustulokset ovat epäluotettavia.

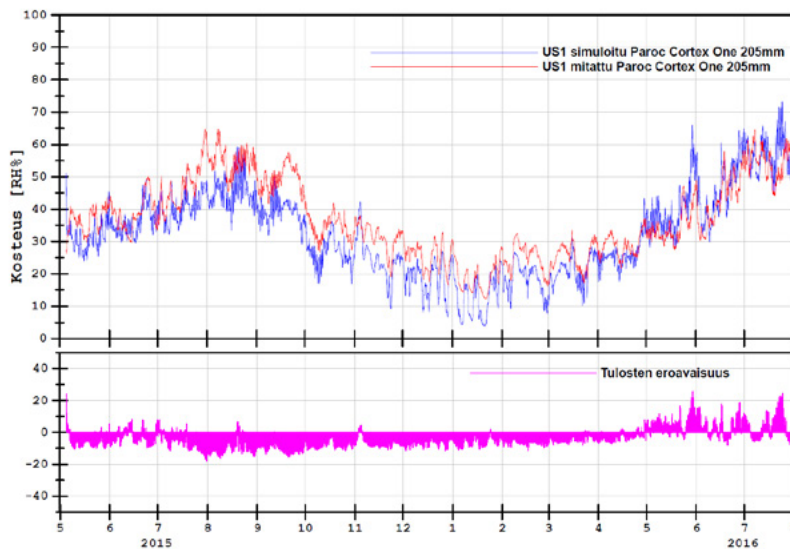
Alla olevissa kappaleissa esitellään rakennetyyppikohtaisesti kuvaajat lämpötilalle sekä suhteelliselle kosteudelle. Kuvaajissa esitellään myös eroavaisuus mitatun sekä simuloitujen tuloksen välillä.

US1 PAROC
CORTEX ONE
Mittauspiste 2



- Muutokset ovat johdonmukaisia
- Simuloidut tulokset reagoivat mitattuja tuloksia hitaammin muutoksiin.
- Simuloitu lämpötila on lähes koko mittausjakson ajan mitattua matalampi

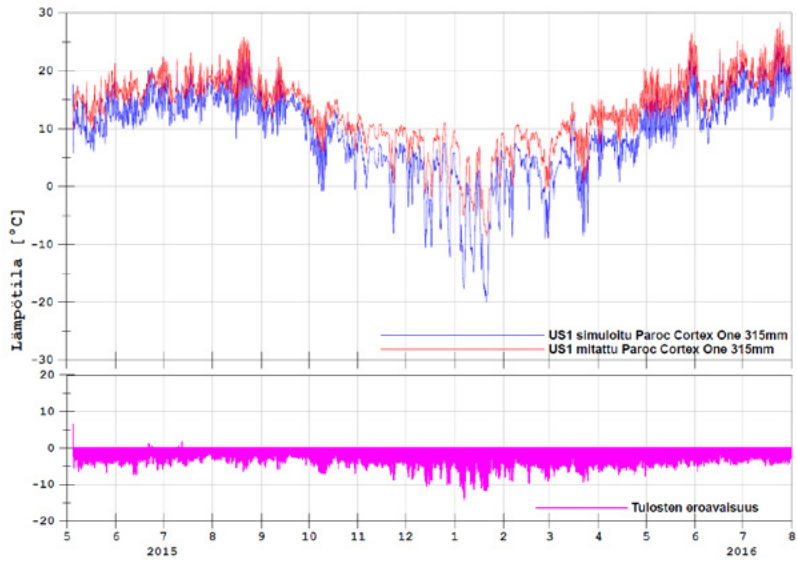
Kuva 44. PAROC Cortex One lämpötila mittauspiste 2



- Muutokset ovat johdonmukaisia
- Simuloitu suhteellinen kosteus on lähes koko mittausjakson ajan mitattua matalampi

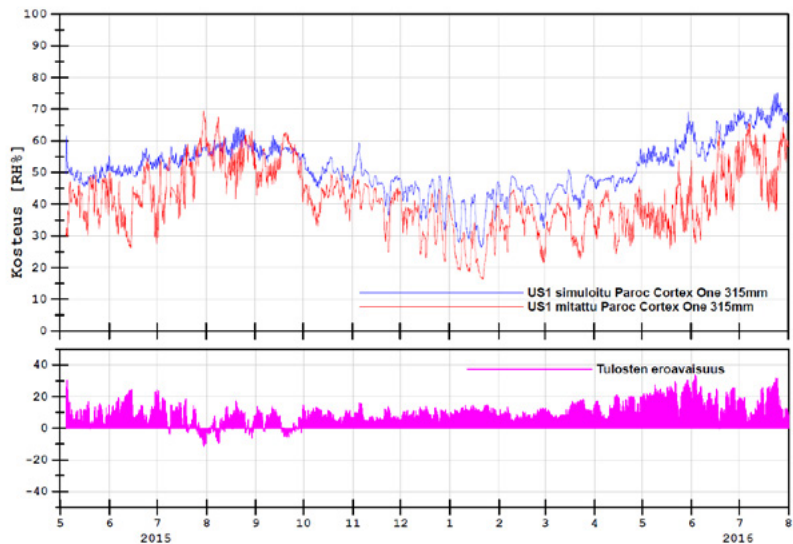
Kuva 45. PAROC Cortex One kosteus mittauspiste 2

US1 PAROC
CORTEX ONE
Mittauspiste 3



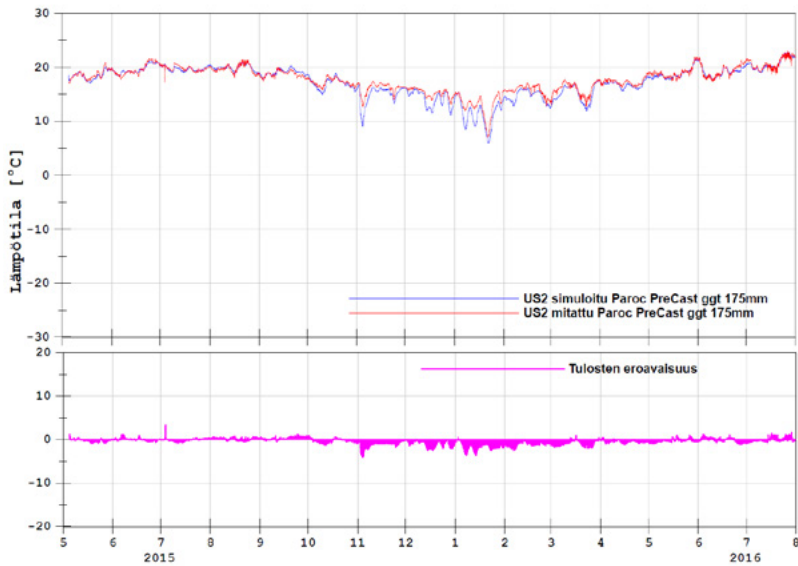
- Muutokset ovat johdonmukaisia
- Simuloitu lämpötila on koko mittausjakson ajan mitattua matalampi

Kuva 46. PAROC Cortex One lämpötila mittauspiste 3



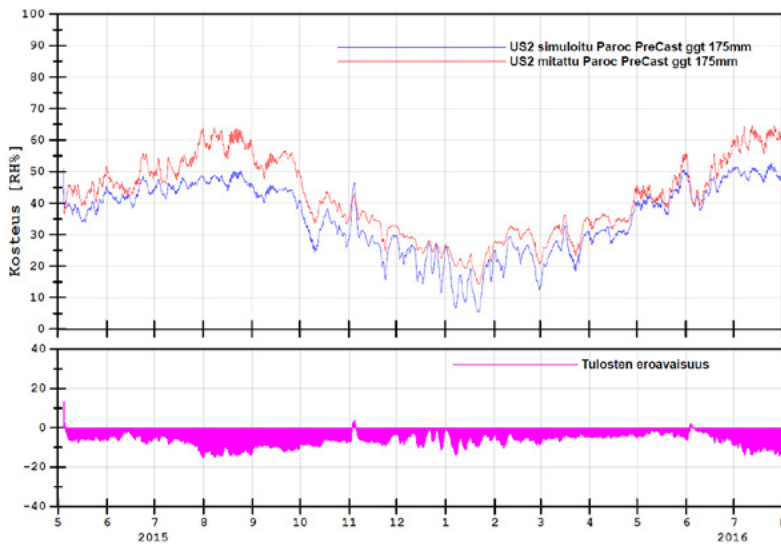
- Muutokset ovat johdonmukaisia
- Muutokset ovat mitatussa datassa nopeampia

Kuva 47. PAROC Cortex One kosteus mittauspiste 3



- Muutokset ovat johdonmukaisia
- Tulosten välinen eroavaisuus on hyvin pieni

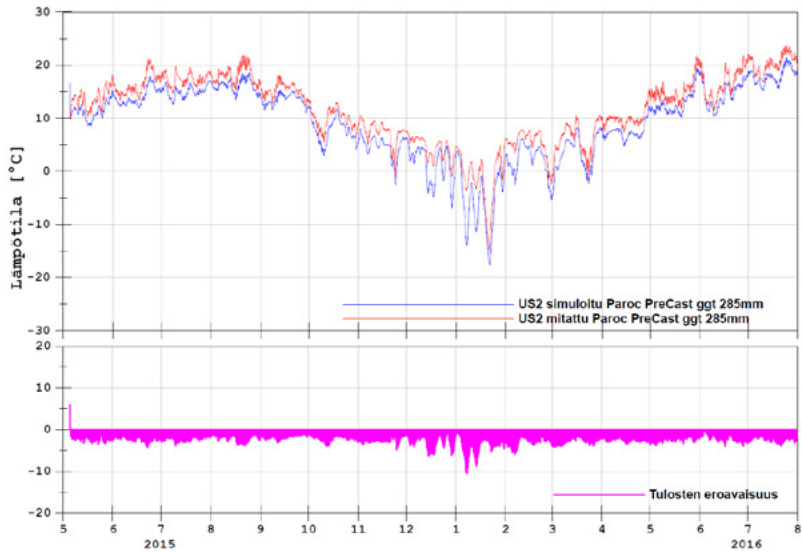
Kuva 48. PAROC PreCast ggt lämpötila mittauspiste 2



- Muutokset ovat johdonmukaisia
- Simuloitu suhteellinen kosteus on lähes koko mittausjakson ajan mitattua matalampi

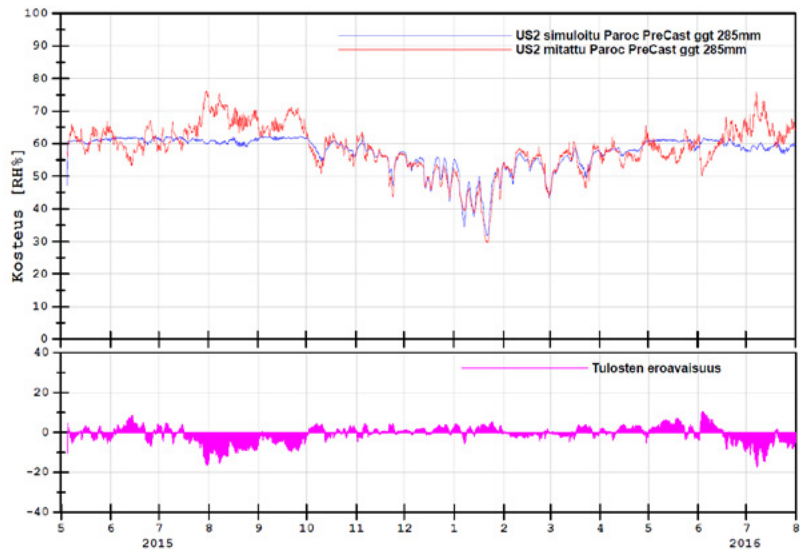
Kuva 49. PAROC PreCast ggt kosteus mittauspiste 2

US2 PAROC
PreCast ggt
Mittauspiste 3



- Muutokset ovat johdonmukaisia
- Simuloitu lämpötila on lähes koko mittausjakson ajan mitattua matalampi

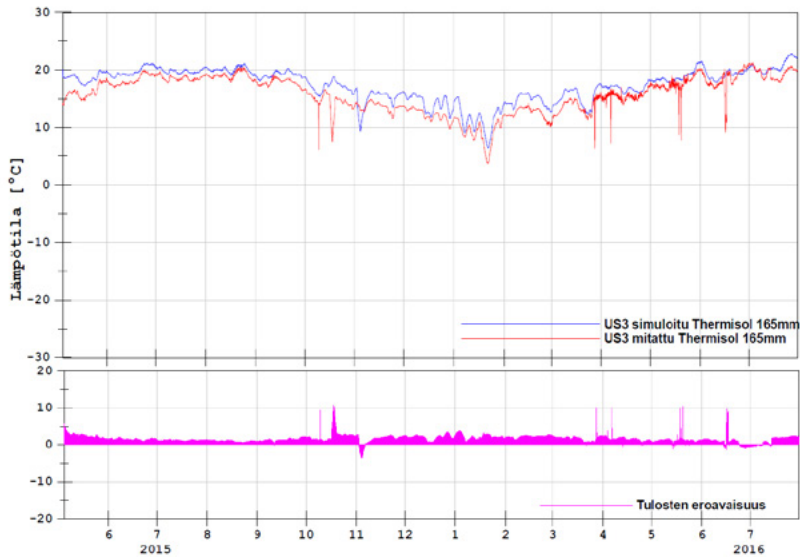
Kuva 50. PAROC PreCast ggt lämpötila mittauspiste 2



- Muutokset ovat johdonmukaisia
- Simuloituissa tuloksissa muutokset ovat hyvin pieniä

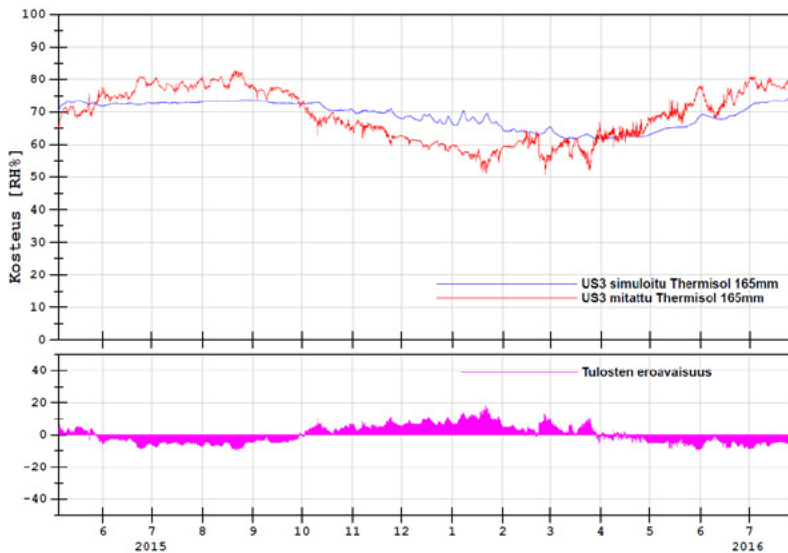
Kuva 51. PAROC PreCast ggt kosteus mittauspiste 2

US3
Thermisol
Platina
Sänkkäri
Mittauspiste 2



- Simuloitu lämpötila on lähes koko mittausjakson ajan mitattua korkeampi
- Muutokset ovat johdonmukaisia

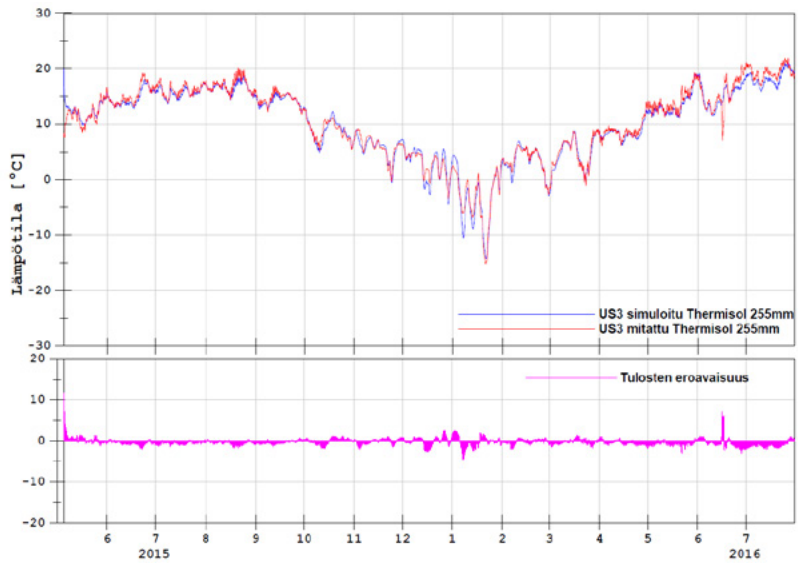
Kuva 52. Thermisol Platina Sänkkäri lämpötila mittauspiste 2



- Tulokset eivät ole johdonmukaisia.
- Simuloituissa tuloksissa ei näy olosuhteiden muutokset kuin mitatuissa
- Syynä eroavaisuuteen voidaan pitää mallin "ideaalitulannetta" verrattaessa todelliseen mittaustilanteeseen

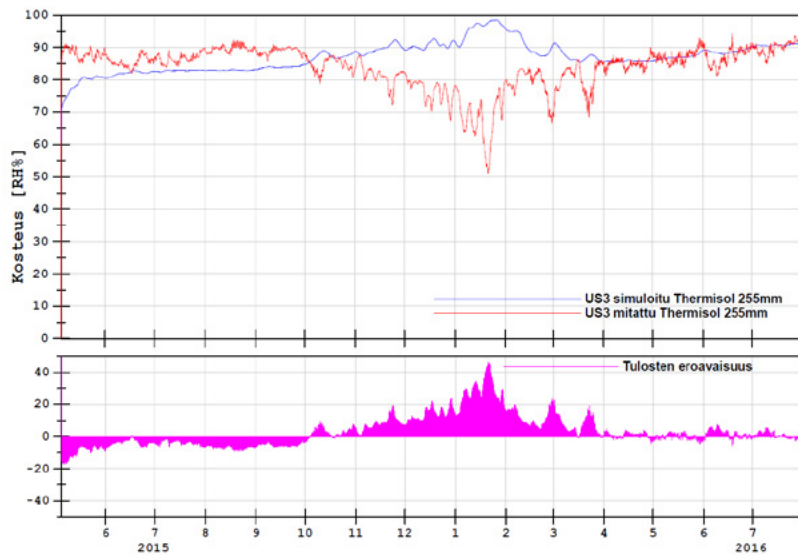
Kuva 53. Thermisol Platina Sänkkäri kosteus mittauspiste 2

US3
Thermisol
Platina
Sänkkäri
Mittauspiste 3



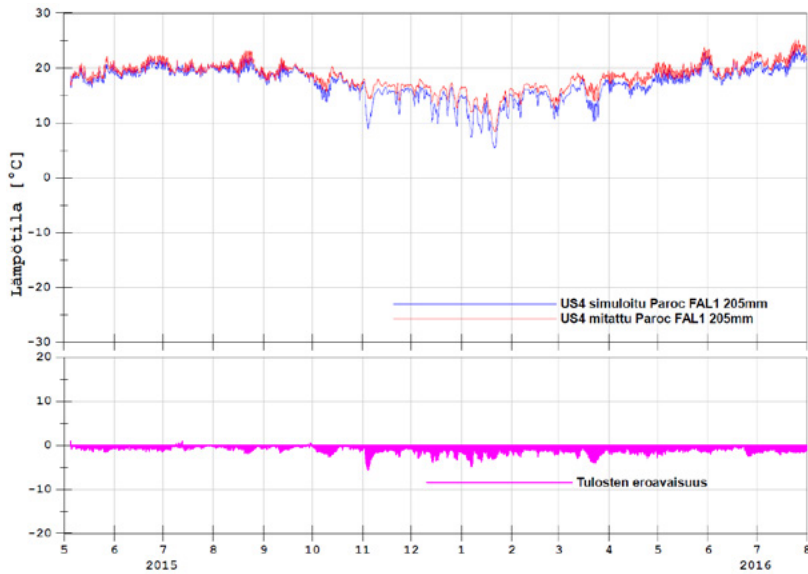
- Muutokset ovat johdonmukaisia
- Tulokset ovat hyvin samankaltaisia

Kuva 54. Thermisol Platina Sänkkäri lämpötila mittauspiste 3



- Tulokset eivät ole johdonmukaisia
- Simuloituissa tuloksissa ei näy olosuhteiden muutokset kuin mitatuissa
- Syynä eroavaisuuteen voidaan pitää mallin "ideaalitulannetta" verrattaessa todelliseen mittaustilanteeseen

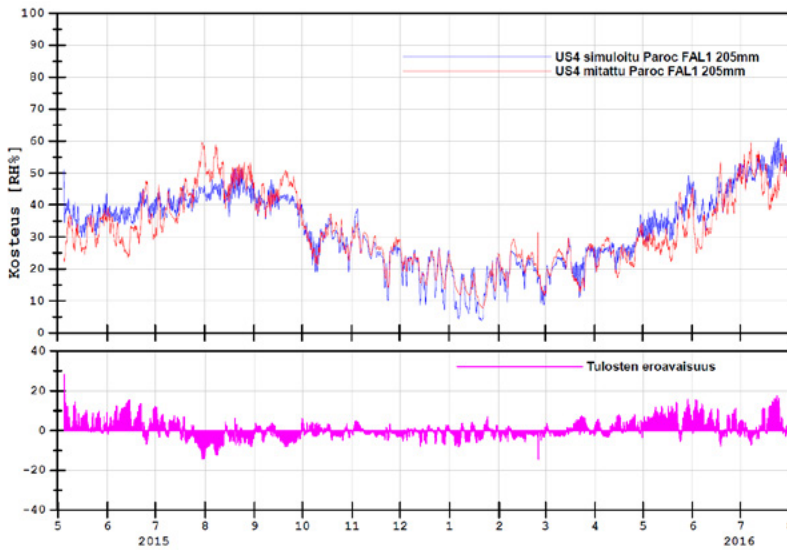
Kuva 55. Thermisol Platina Sänkkäri kosteus mittauspiste 3



US4 PAROC
FAL1
Mittauspiste 2

- Muutokset ovat johdonmukaisia
- Simuloitu lämpötila on lähes koko mittausjakson ajan mitattua matalampi

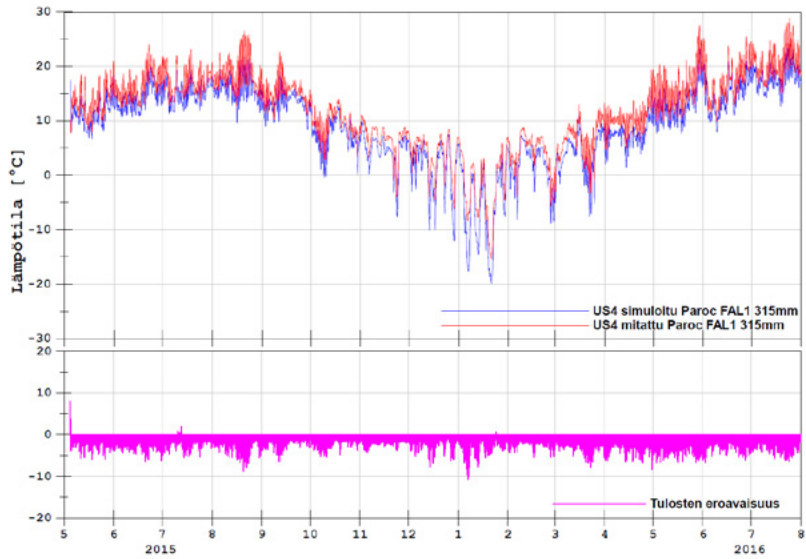
Kuva 56. PAROC FAL1 lämpötila mittauspiste 2



- Muutokset ovat johdonmukaisia
- Muutokset ovat mitatussa datassa nopeampia

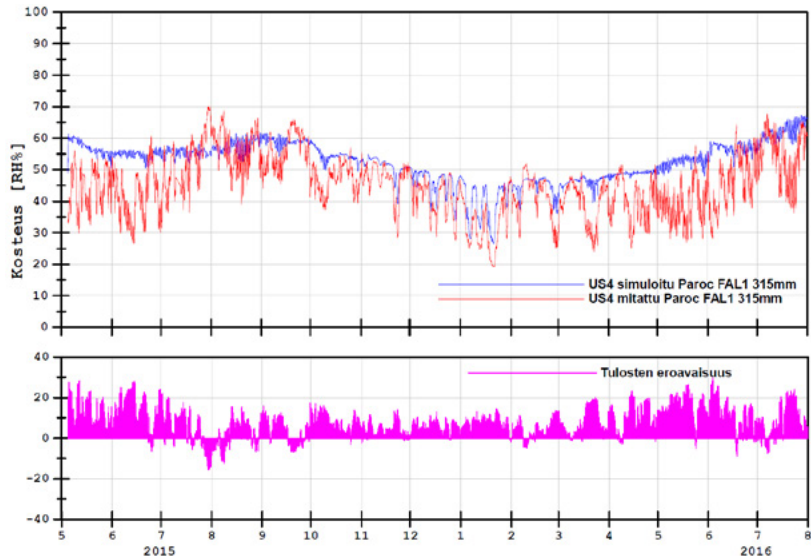
Kuva 57. PAROC FAL1 kosteus mittauspiste 2

US4 PAROC
FAL1
Mittauspiste 3



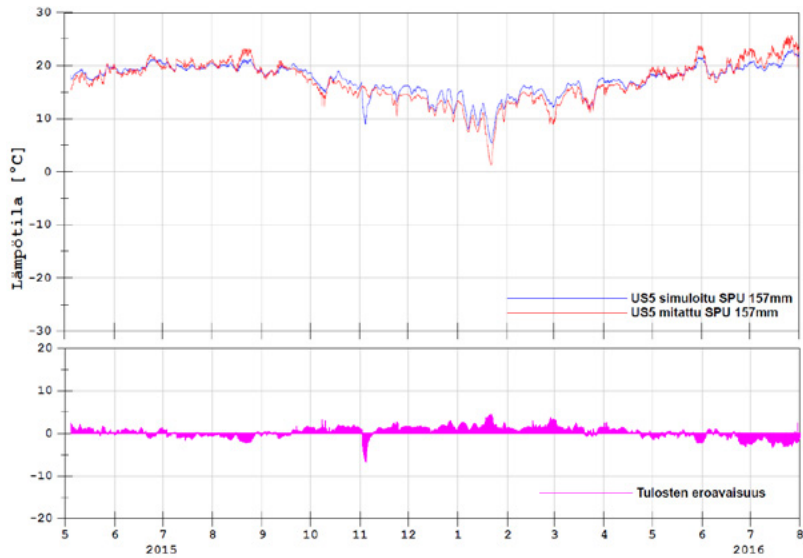
- Muutokset ovat johdonmukaisia
- Simuloitu lämpötila on lähes koko mittausjakson ajan mitattua matalampi

Kuva 58. PAROC FAL1 lämpötila mittauspiste 3



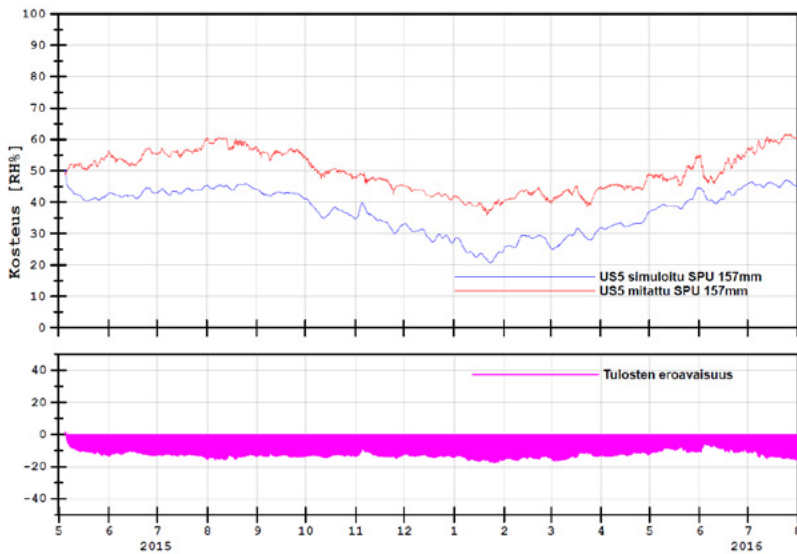
- Muutokset ovat johdonmukaisia
- Muutokset ovat mitatussa datassa nopeampia
- Muutokset ovat mitatussa datassa suurempia

Kuva 59. PAROC FAL1 kosteus mittauspiste 3



- Muutokset ovat johdonmukaisia

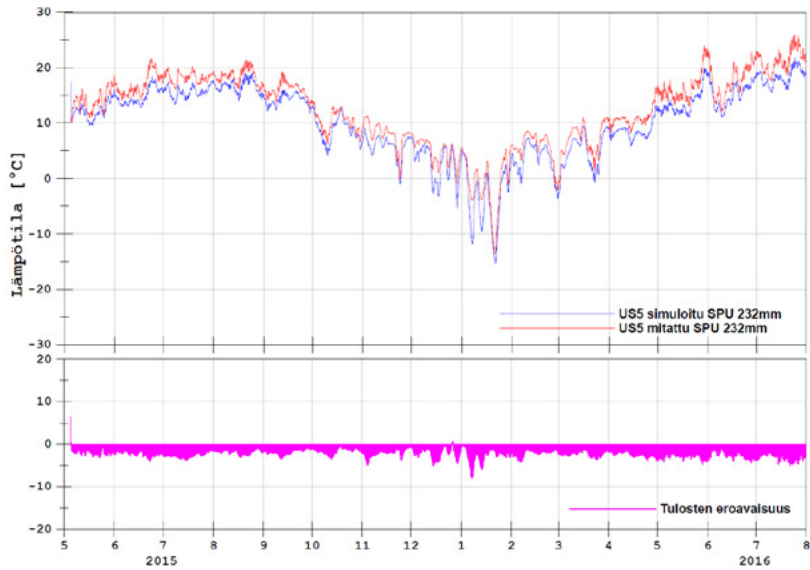
Kuva 60. SPU lämpötila mittauspiste 2 (nykyinen tuotenimi Kingspan Therma TW58 150 mm)



- Muutokset ovat johdonmukaisia
- Simuloitu kosteuden taso on läpi jakson ~20 %-yksikköä pienempi

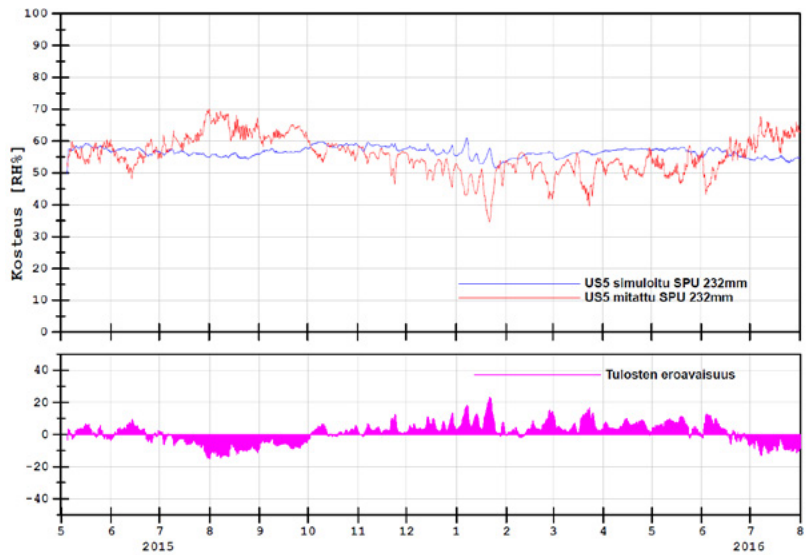
Kuva 61. SPU kosteus mittauspiste 2 (nykyinen tuotenimi Kingspan Therma TW58 150 mm)

US5 Kingspan
Therma TW58
Mittauspiste 3



- Muutokset ovat johdonmukaisia
- Simuloitu lämpötila on lähes koko mittausjakson ajan mitattua matalampi

Kuva 62. SPU lämpötila mittauspiste 3 (nykyinen tuotenimi Kingspan Therma TW58 150 mm)



- Suhteellisen kosteuden tasot ovat lähes samalla tasolla koko tarkastelujakson
- Muutokset ovat mitatussa datassa nopeampia
- Muutokset ovat mitatussa datassa suurempia

Kuva 63. SPU kosteus mittauspiste 3 (nykyinen tuotenimi Kingspan Therma TW58 150 mm)

YHTEENVETO

Tehtyjen vertailujen perusteella voidaan todeta, että mineraalivillaisten seinärakenteiden (US₁, US₂ ja US₄) simulointimallit toimivat hyvin. Simuloidut ja mitatut datat ovat hyvin samankaltaisia kyseisissä malleissa.

Seinärakenteissa, joissa on käytetty muoviperäisiä eristeitä (US₃ ja US₅) oli eroavaisuuksia suhteellisen kosteuden tuloksissa mittauspisteessä 3. Lämpötilan suhteen tulokset olivat johdonmukaisia molemmissa mittauspisteissä. Suhteellisen kosteuden tulokset reagoivat simuloiduissa tuloksissa päinvastoin talviajan ulko-olosuhteiden muutoksiin mittauspisteessä 3. Tuloksia tarkasteltaessa on huomioitava, että kyseisillä ajanjaksoilla simuloidut lämpötilat ovat myös mitattuja matalampia, joten absoluuttisen kosteuden määrissä ei ole merkittävää eroavaisuutta. Tulosten eroavaisuuteen vaikuttaa myös simuloidun ja mitatun tilanteen eroavaisuus. Eroavaisuuksia ovat muun muassa:

- Simuloitu malli on ns. ideaalitilanne, mallissa ei ole epäjatkuvuuskohtia, kuten ovia, ikkunoita yms.
- Mitattuihin tuloksiin vaikuttaa myös anturan sijoitus rakenteeseen, anturit ovat johdollisia, jonka vuoksi rakenteeseen on voinut jäädä pieniä ilmarakoja
- Simulointien tuloksia tarkasteltaessa on huomioitava, että simulointimalleissa ei huomioitu auringonpaisteen, viistosateen sekä ilmavirtausten vaikutusta (ristiinuritus eristeessä)
- On myös huomioitava, että esitettävät tulokset ovat rakenteen eristekerroksen sisällä olevista mittauspisteistä

Elementtien lämpö- ja kosteustekninen simulointi passiivitaso ratkaisulla

JOHDANTO

Tässä artikkelissa esitellään EFCONE-projektissa tehtyä passiivitaso rakennusfysikaalista simulointia. Welleissä käytössä olevia rakenneratkaisuja muutettiin, jotta ne täyttävät passiivirakenteen määritelmän. Simulointien tarkoituksena oli tutkia Wellein rakennetyyppien rakennusfysikaalista toimintaa passiivitaso ratkaisuihin. Työn tarkoituksena oli tutkia Wellein rakenteiden toimintaa passiivitaso ratkaisuihin.

Rakennusfysikaalinen simulointi suoritettiin COMSOL Multiphysics-ohjelman heat and moisture transfer-moduulilla. Rakennusfysikaalisella simuloinnilla voidaan arvioida eri tekijöiden vaikutusta rakenneratkaisun lämpö- ja kosteustekniseen toimivuuteen. Simulaatiomallissa voidaan muokata rakenteen ominaisuuksia, materiaali ominaisuuksia sekä ulkopuolisia rasituksia.

Simulointimallien tuloksia tarkasteltaessa on aina huomioitava eroavaisuudet mitatun ja simuloitun tilanteen välillä. Simulointimallit ovat aina suuntaa-antavia ja niiden tuloksia tulee tulkita kriittisesti. Mallit ovat aina niin sanottuja ideaalitalanteita, todellisissa kohteissa ei aina toteutus ole suunnitellun kaltainen.

SIMULOINNIN LÄHTÖTIEDOT

Yleistä

Tämän osion tarkoituksena oli tutkia Wellevin seinärakenneratkaisuiden rakennusfysikaalista toimintaa passiivitason ratkaisuina. Tavoitteena oli varmistaa seinärakenteiden oikeaoppinen rakennusfysikaalinen toiminta passiivitason ratkaisuina. Aikaisemmin luotujen simulointimallien eristepaksuuksia kasvatettiin, siihen asti, että rakenteen U-arvo saavutti arvon alle 0,09. Simuloinnissa käytetyt rakenteet **eivät ole eristevalmistajien tekemiä rakenneratkaisuja**. Eristepaksuuksien lisäyksen aiheuttama muutos eristepaksuuksissa on seuraava:

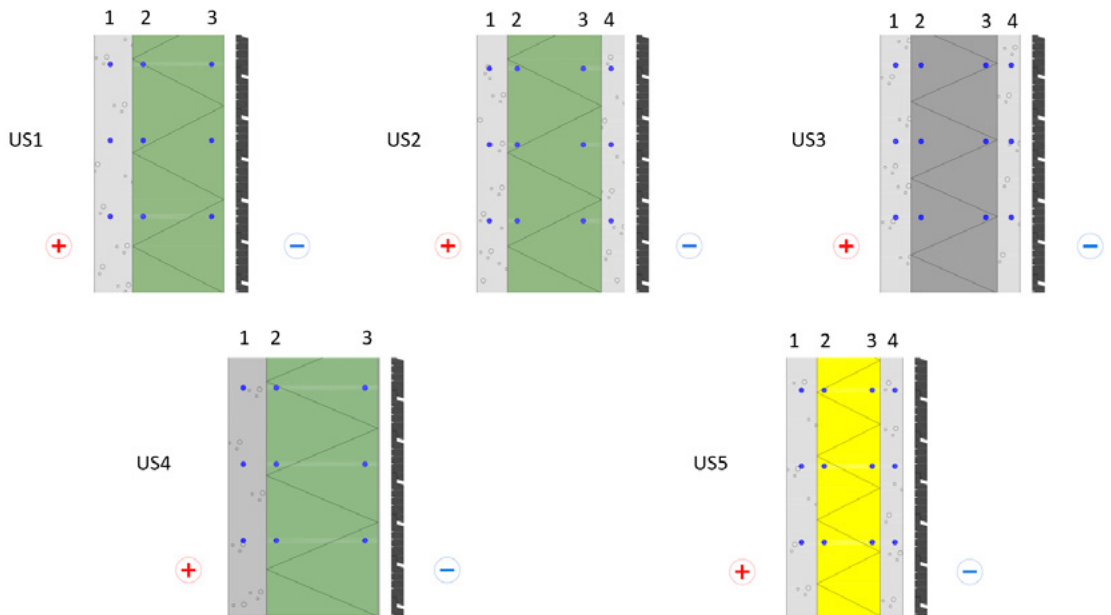
- US₁ PAROC Cortex One
 - Aikaisempi eristepaksuus 220 mm kasvatettiin 360 mm
 - U-arvon muutos 0,144 -> 0,089
- US₂ PAROC PreCast ggt
 - Aikaisempi eristepaksuus 220 mm kasvatettiin 370 mm
 - U-arvon muutos 0,147 -> 0,089
- US₃ Thermisol Platina Sänkkäri
 - Aikaisempi eristepaksuus 180 mm kasvatettiin 340 mm
 - U-arvon muutos 0,163 -> 0,088
- US₄ PAROC FAL₁ (nykyinen Linio 80)
 - Aikaisempi eristepaksuus 220 mm kasvatettiin 440 mm
 - U-arvon muutos 0,173 -> 0,089
- US₅ Kingspan Therma TW₅₈
 - Aikaisempi eristepaksuus 150 mm kasvatettiin 250 mm
 - U-arvon muutos 0,146 -> 0,089

Passiivitasosimuloinnin tuloksia verrattiin edellisessä kappaleessa esitettyihin simuloinnin tuloksiin. Eristevahvuuden kasvatuksen vuoksi mittauspisteiden sijainti tuli siirtää edellisistä malleista. Mittauspisteet sijoitettiin samassa suhteessa rakenteeseen kuin aikaisemmin rakennetuissa malleissa, jotta simulointien tulokset ovat vertailukelpoisia. Passiivitason rakenteiden mittauspisteet esitetään taulukossa 10 ja kuvassa 64 esitetään rakennetyypit sekä rakenteiden sisällä sijaitsevat mittauspisteet.

Seuraavissa kappaleissa esitellään rakennetyyppikohtaisesti kuvaajat lämpötilalle sekä suhteelliselle kosteudelle. Kuvaajissa esitellään tulokset mittauspisteille 2 ja 3, jotka sijaitsevat eristetilassa. Kuvaajissa esitellään myös eroavaisuus passiivitason sekä todellisten rakenteiden simuloitujen tulosten välillä.

Taulukko 10. Passiivitaso mittauspisteiden etäisyydet rakenteen sisäpinnasta

Passiivitaso Mittauspiste	US1 PAROC Cortex One	US2 PAROC PreCast ggt	US3 Thermisol Platina Sänkkäri	US4 PAROC FAL1	US5 Kingspan Therma TW58
1	75 mm	60 mm	60 mm	75 mm	60 mm
2	205 mm	175 mm	165 mm	205 mm	157 mm
3	455 mm (315 mm)	435 mm [285 mm]	415 mm [255 mm]	535 mm [315 mm]	322 mm [232 mm]
4	-	585mm [385 mm]	415 mm [345 mm]	-	422 [mm] [315 mm]



Kuva 64. Passiivitason rakennetyypit ja mittauspisteet simulointia varten

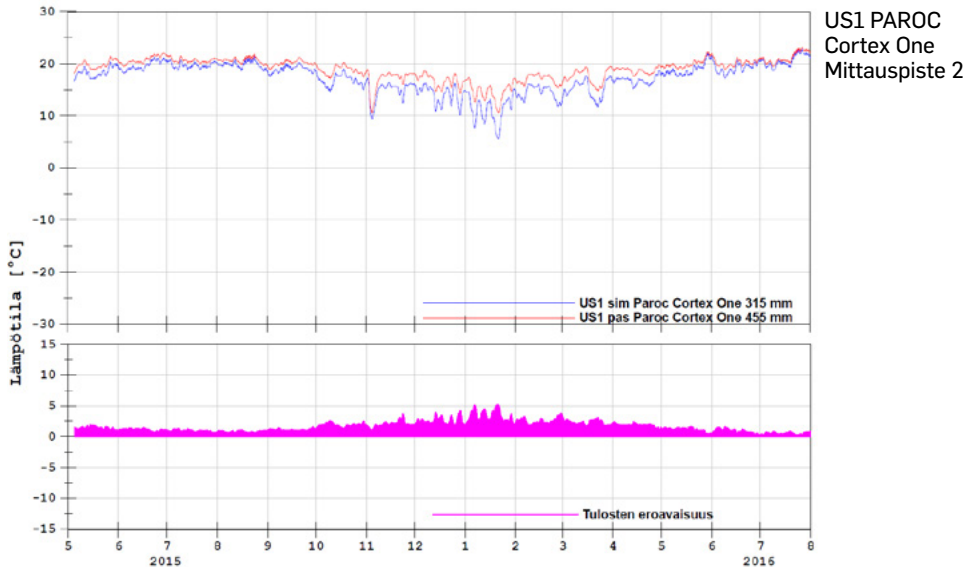
Käytetyt olosuhteet

Simulointimalleissa on käytetty Levillä Wellevissä mitattuja sisäolosuhteita. Ulko-olosuhdetiedot saatiin Ilmatieteenlaitoksen avoimesta datasta. Wellevin huoneistoihin asennettiin sisäolosuhdemittaukset 4.5.2015, jonka vuoksi simulointijaksoksi valittiin **5.5.2015- 31.7.2016**. Sisäolosuhteina simuloinnissa käytettiin huoneisto Hirvessä mitattuja olosuhteita. Alla olevassa kuvassa 65 esitetään poikkileikkauskuva Wellevin A-osasta, jossa tutkittavat elementit sijaitsevat.



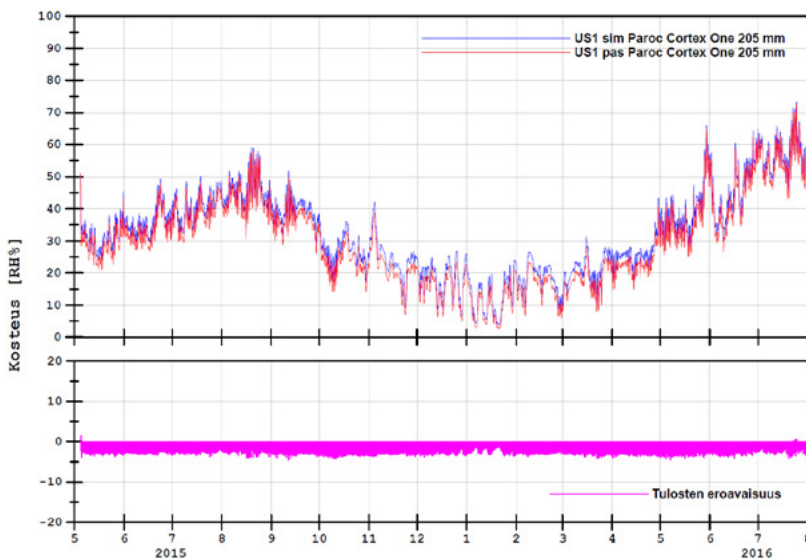
Kuva 65. Wellevi huoneistot ja sisäolosuhdemittauspiste

PASSIIVITASON JA SIMULOITUJEN MITTAUSTULOSTEN VERTAILU



- Passiivitasen lämpötila on koko mittausjakson ajan mitattua korkeampi

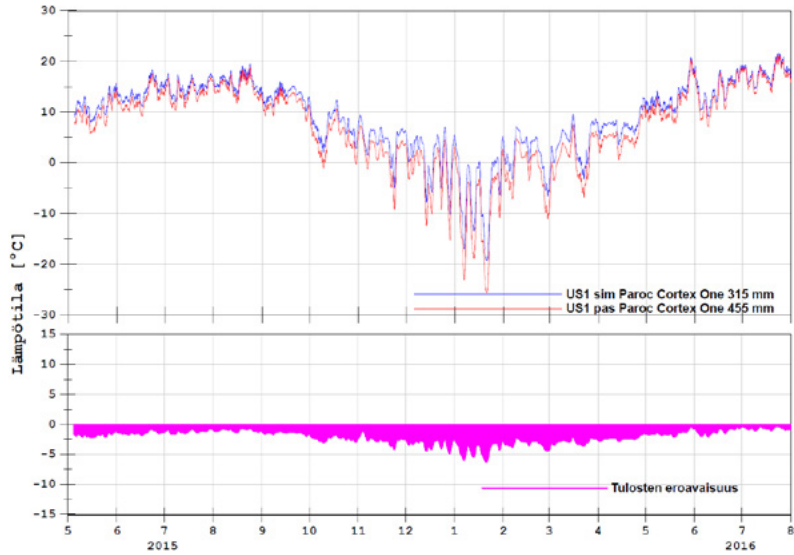
Kuva 66. PAROC Cortex One passiivitasovertailu lämpötila mittauspiste 2



- Passiivitasen suhteellinen kosteus on koko mittausjakson ajan matalampi

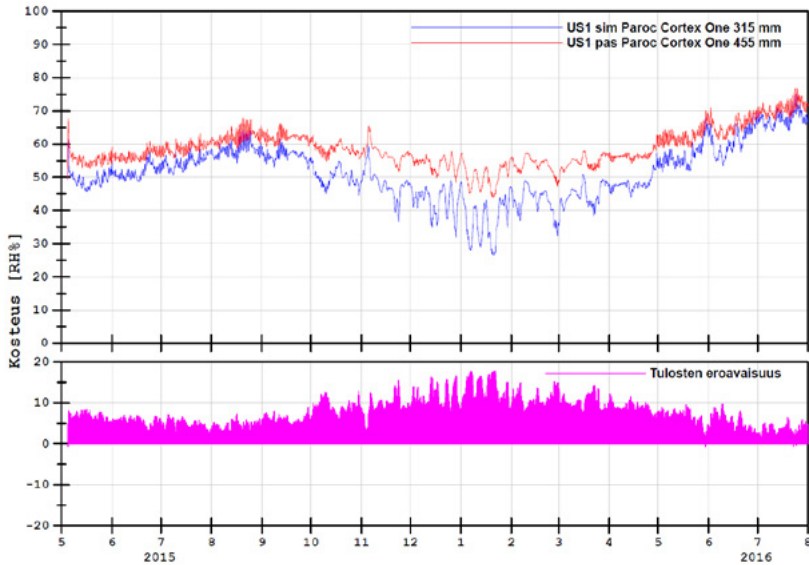
Kuva 67. PAROC Cortex One passiivitasovertailu kosteus mittauspiste 2

Passiivitason
ja simuloitujen
mittaustulosten
vertailu
US1 PAROC
Cortex One
Mittauspiste 3



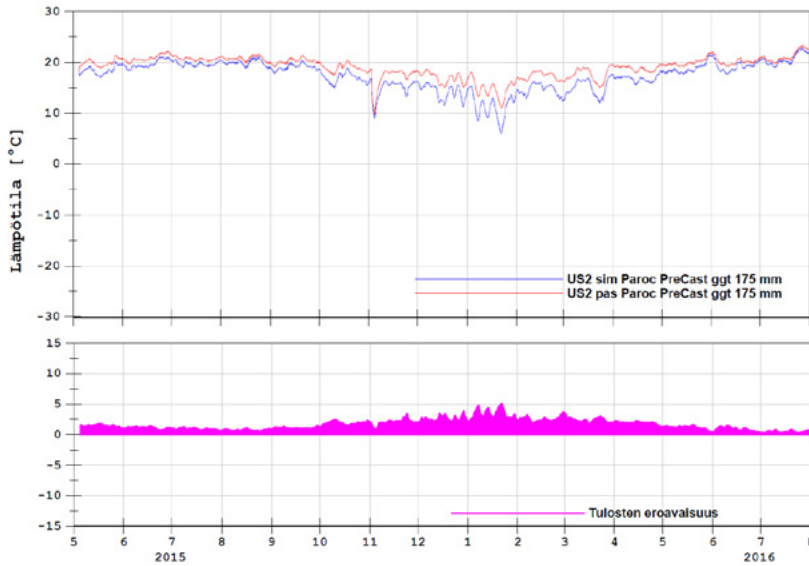
- Passiivitason lämpötila on koko mittausjakson ajan mitattua matalampi

Kuva 68. PAROC Cortex One passiivitasovertilu lämpötila mittauspiste 3



- Passiivitason suhteellinen kosteus on koko mittausjakson ajan korkeampi

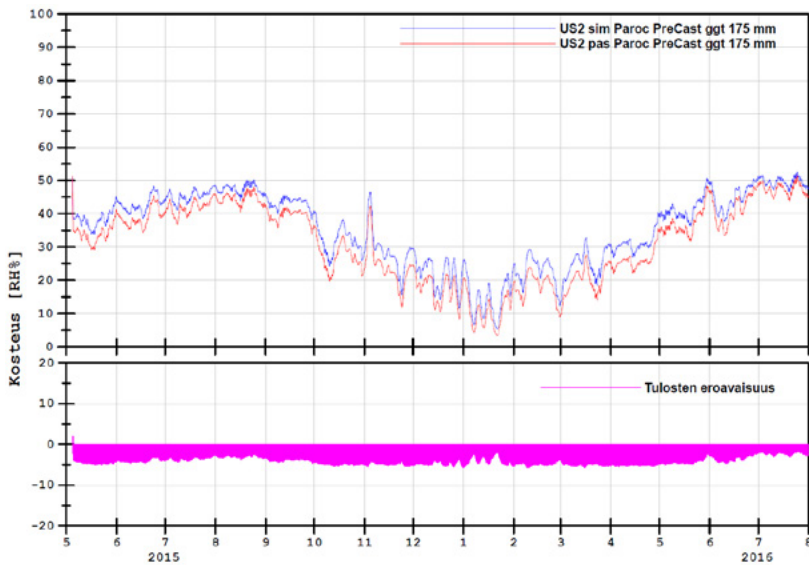
Kuva 69. PAROC Cortex One passiivitasovertilu kosteus mittauspiste 3



US2 PAROC
PreCast ggt
Mittauspiste 2

- Passiivitason lämpötila on koko mittausjakson ajan mitattua korkeampi

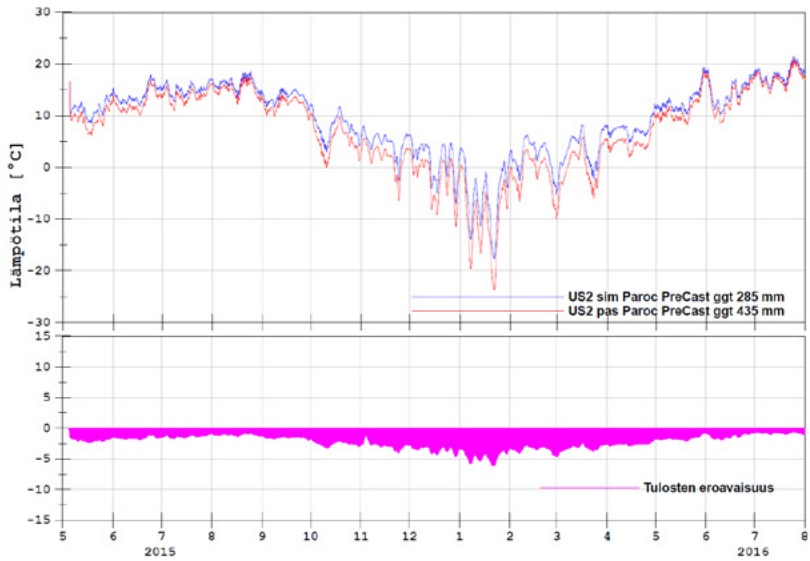
Kuva 70. PAROC PreCast ggt passiivitasovertilau lämpötila mittauspiste 2



- Passiivitason suhteellinen kosteus on koko mittausjakson ajan matalampi

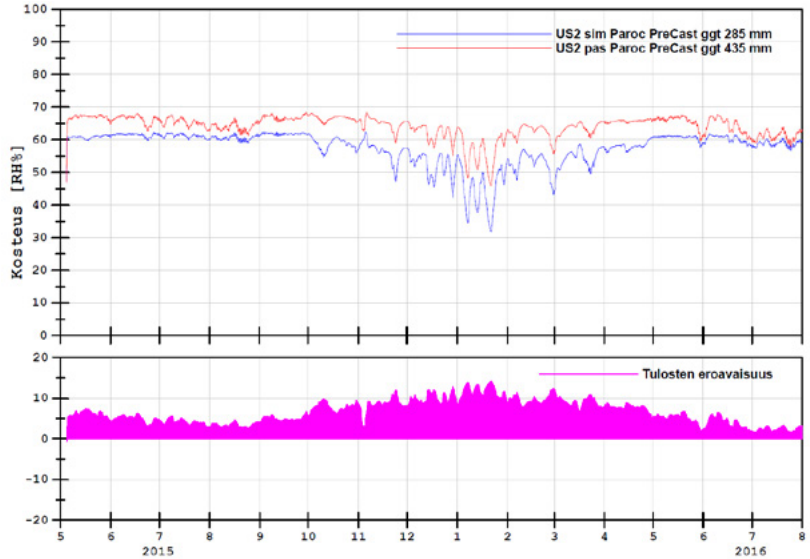
Kuva 71. PAROC PreCast ggt passiivitasovertilau kosteus mittauspiste 2

US2 PAROC
PreCast ggt
Mittauspiste 3



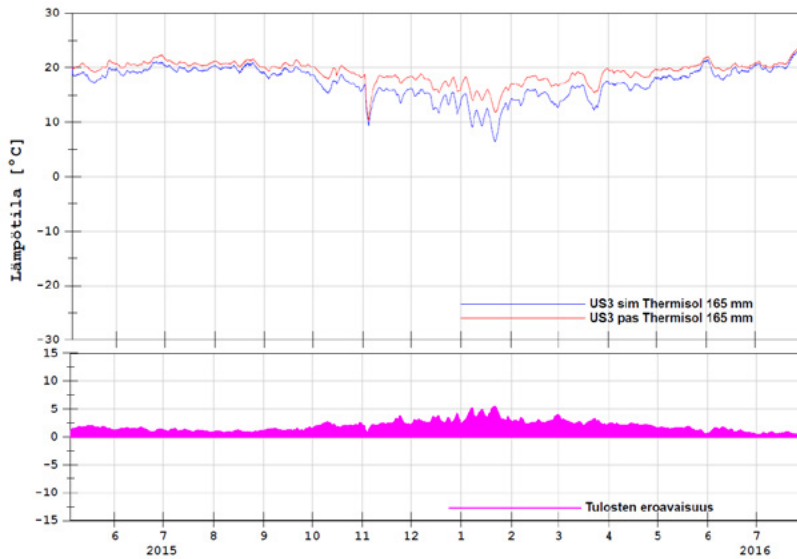
- Passiivitason lämpötila on koko mittausjakson ajan mitattua matalampi

Kuva 72. PAROC PreCast ggt passiivitasovertilu lämpötila mittauspiste 3



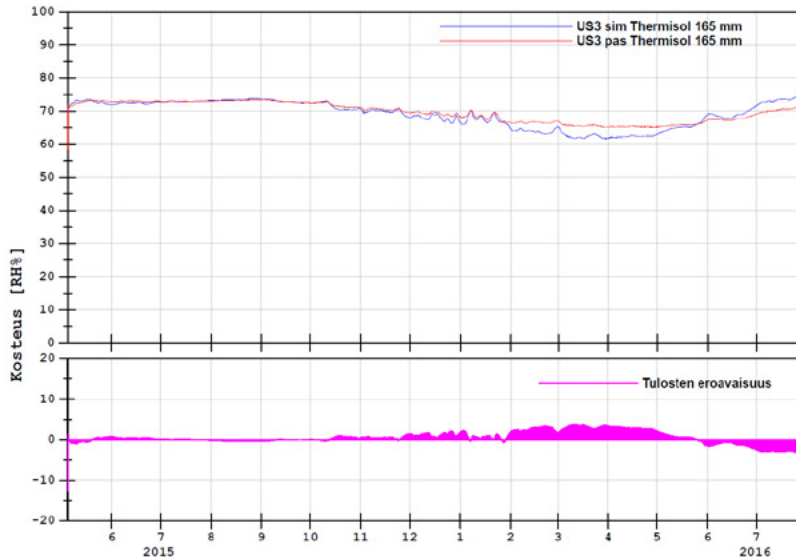
- Passiivitason suhteellinen kosteus on koko mittausjakson ajan korkeampi

Kuva 73. PAROC PreCast ggt passiivitasovertilu kosteus mittauspiste 3



- Passiivitason lämpötila on koko mittausjakson ajan mitattua korkeampi

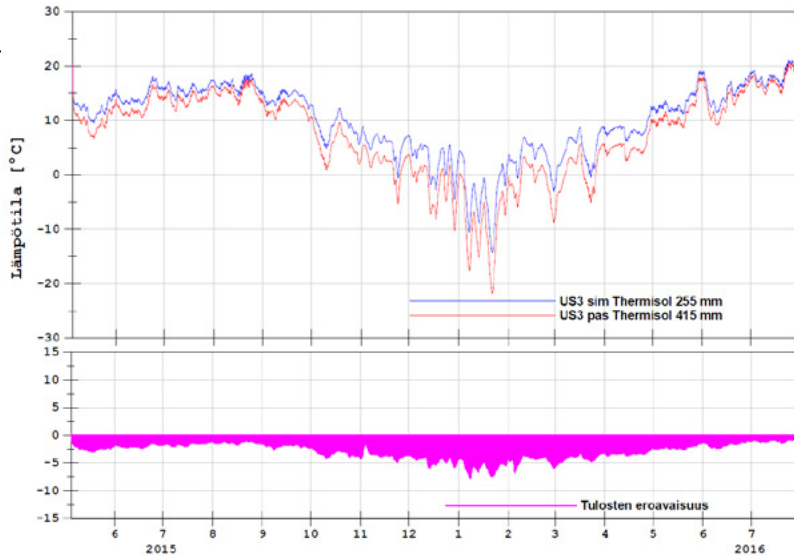
Kuva 74. Thermisol Platina Sänkkäri passiivitasovertailu lämpötila mittauspiste 2



- Suhteellisen kosteuden tasot ovat hyvin samankaltaiset
- Passiivitason suhteellisen kosteuden reagoivat hitaammin olosuhteiden muutoksiin

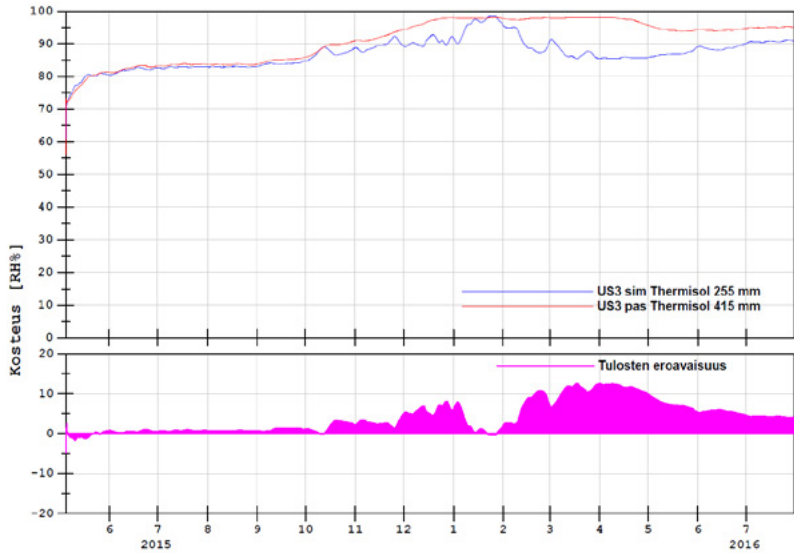
Kuva 75. Thermisol Platina Sänkkäri passiivitasovertailu kosteus mittauspiste 2

US3 Thermisol
Platina Sänkkär
Mittauspiste 3



- Passiivitason lämpötila on koko mittausjakson ajan mitattua matalampi

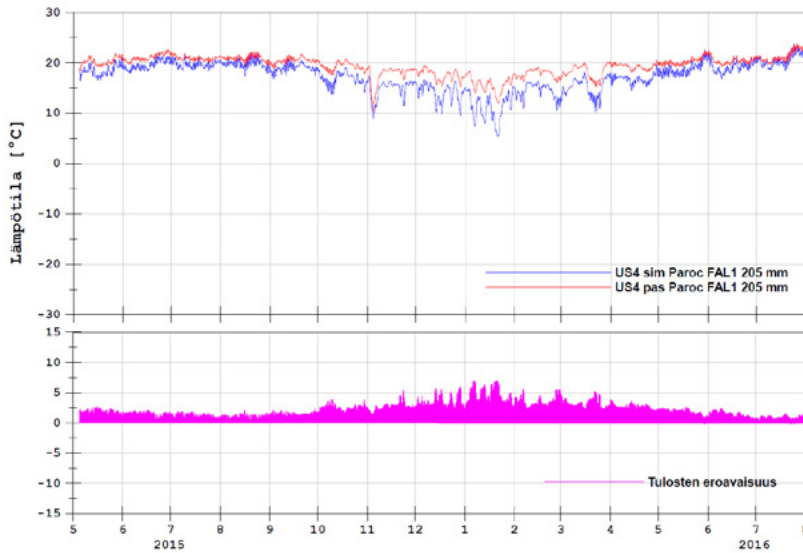
Kuva 76. Thermisol Platina Sänkkäri passiivitasovertilu kosteus mittauspiste 3



- Passiivitason suhteellinen kosteus on lähes koko mittausjakson ajan korkeampi

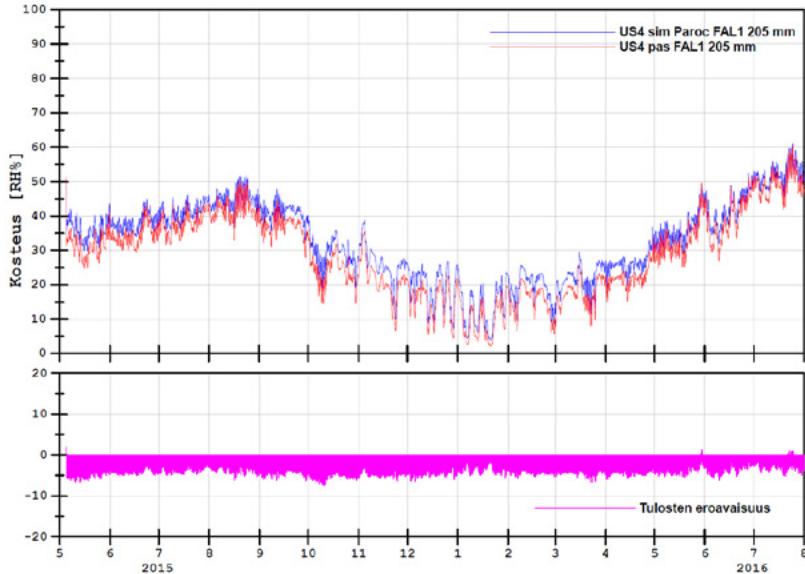
Kuva 77. Thermisol Platina Sänkkäri passiivitasovertilu kosteus mittauspiste 3

US4 PAROC
FAL1
Mittauspiste 2



- Passiivitason lämpötila on koko mittausjakson ajan mitattua korkeampi

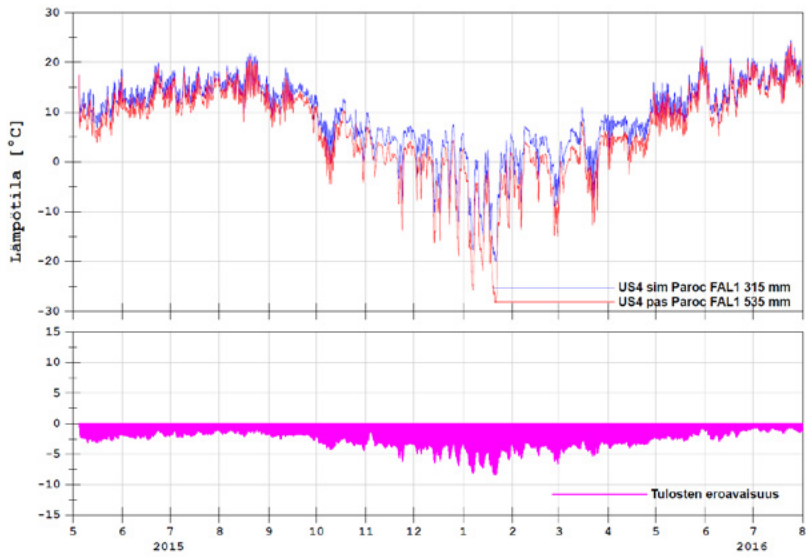
Kuva 78. PAROC FAL1 passiivitasovertilu lämpötila mittauspiste 2



- Passiivitason suhteellinen kosteus on koko mittausjakson ajan matalampi

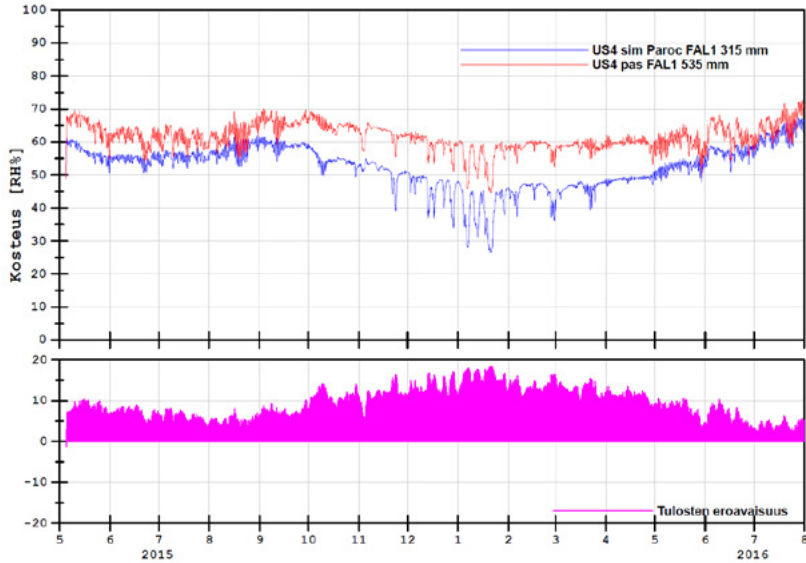
Kuva 79. PAROC FAL1 passiivitasovertilu kosteus mittauspiste 2

US4 PAROC
FAL1
Mittauspiste 3



- Passiivitason lämpötila on koko mittausjakson ajan mitattua matalampi

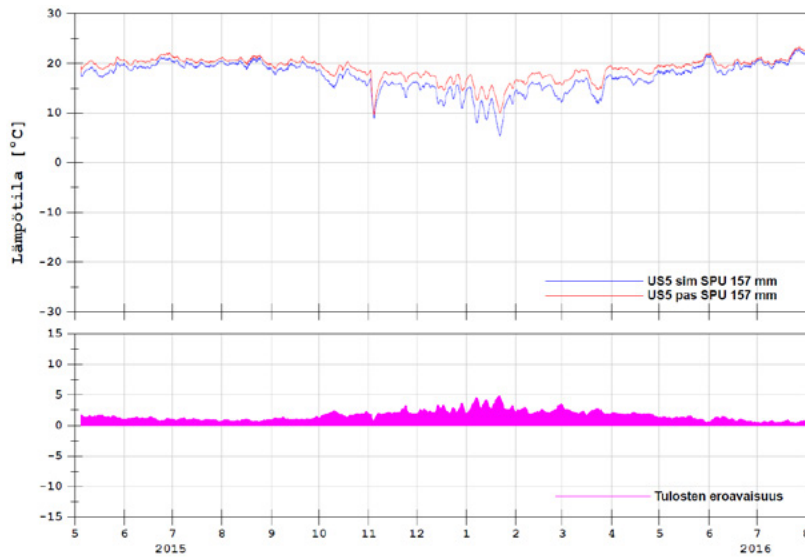
Kuva 80. PAROC FAL1 passiivitasovertailu lämpötila mittauspiste 3



- Passiivitason suhteellinen kosteus on koko mittausjakson ajan korkeampi

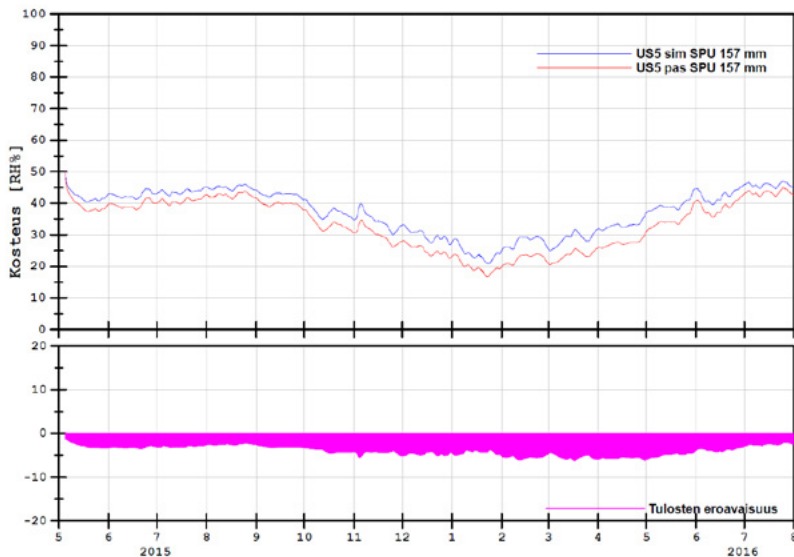
Kuva 81. PAROC FAL1 passiivitasovertailu kosteus mittauspiste 3

US5 Kingspan
Therma TW58
Mittauspiste 2



- Passiivitason lämpötila on koko mittausjakson ajan mitattua korkeampi

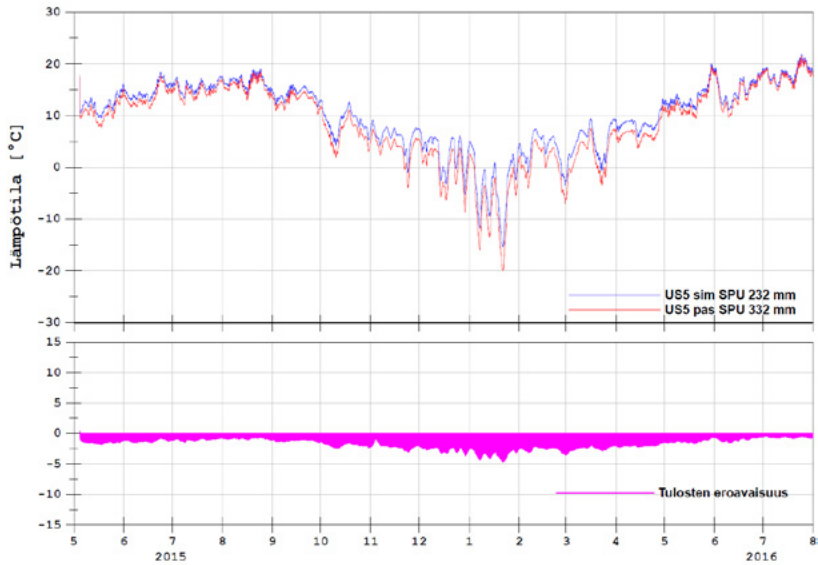
Kuva 82. SPU passiivitasovertilu lämpötila mittauspiste 2 (nykyinen tuotenimi Kingspan Therma TW58 150 mm)



- Passiivitason suhteellinen kosteus on koko mittausjakson ajan matalampi

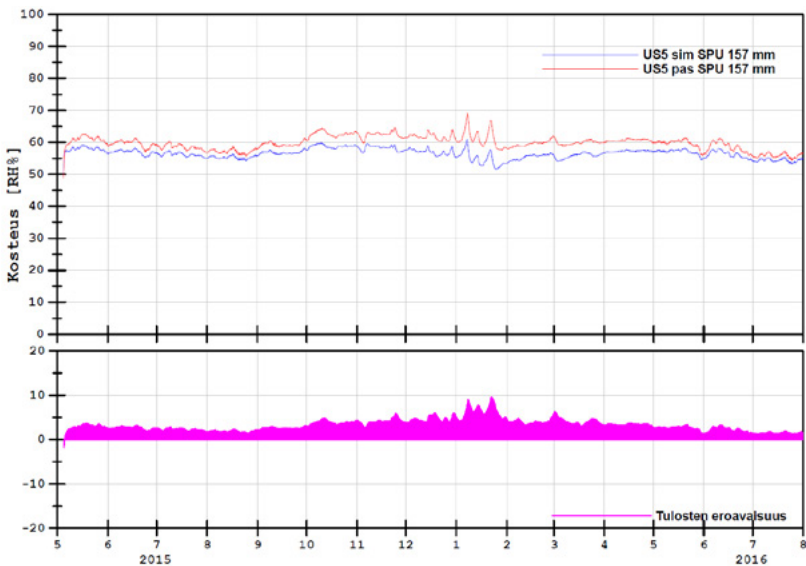
Kuva 83. SPU passiivitasovertilu kosteus mittauspiste 2 (nykyinen tuotenimi Kingspan Therma TW58 150 mm)

US5 Kingspan
Therma TW58
Mittauspiste 3



- Passiivitason lämpötila on koko mittausjakson ajan mitattua matalampi

Kuva 84. SPU passiivitasovertilu lämpötila mittauspiste 3(nykyinen tuotenimi Kingspan Therma TW58 150 mm)



- Passiivitason suhteellinen kosteus on koko mittausjakson ajan korkeampi

Kuva 85. SPU passiivitasovertilu kosteus mittauspiste 3 (nykyinen tuotenimi Kingspan Therma TW58 150 mm)

YHTEENVETO

Toteutettujen passiivitason simulointien perusteella voidaan todeta, että passiivitason rakenteet toimivat turvallisella tasolla. Ainoastaan US3 rakennetyypissä tuloksissa ilmeni suurempia kosteuksia. US3 tuloksia tarkasteltaessa on huomioitava, että eristetyypissä olevaa tuuletusuran toimintaa ei simuloitu, kyseinen ratkaisu on oleellinen rakennetyypin oikeaoppiselle toiminnalle. Lisäksi on mainittava, että passiivitasorakenteet eivät ole eristevalmistajien rakennetyyppejä, vaan mielimääräisesti keksittyjä rakenteita. Tuloksia tarkasteltaessa on huomioitava, että:

- Simulointimalleissa ei huomioitu auringonpaisteen, viistosateen sekä rakenteellisten tekijöiden vaikutuksia.
- On myös huomioitava, että esitettävät tulokset ovat rakenteen eristekerroksen sisällä olevista mittauspisteistä. Toiminnan oikeaoppisen tarkastelun kannalta tulisi myös vertailla rakenteiden materiaalikerrosten rajapintojen olosuhteita.
- Simulointimallissa simuloidaan ns. Ideaalitulannetta
- Todellisiin tuloksiin vaikuttaa myös mitatun ympäristön rakenteelliset tekijät: ikkunat, ovet ja nurkat/kattoliitoskohdat.

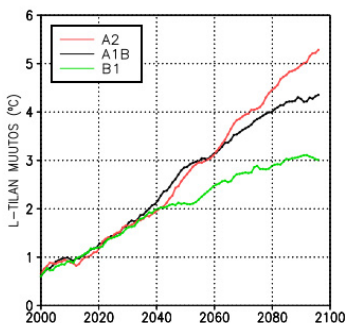
Elementtien lämpö- ja kosteus- tekninen simulointi tulevaisuuden ilmastoennustemalleilla

JOHDANTO

Tämän työn tarkoituksena oli tutkia Welleissä käytössä olevien seinärakenteiden **rakennusfysikaalista toimintaa tulevaisuuden ilmastossa**. Tavoitteena oli varmistaa Welleissä käytössä olevien rakennetyyppien toiminta myös tulevaisuuden ilmastoissa. Ilmatieteen laitos on muodostanut vuosien 2030, 2050 ja 2100 ilmastoja vastaavat rakennusfysiikan ilmastolliset testivuodet muokkaamalla nykyilmaston testivuosiin säätietoja. Muokkauksessa on otettu huomioon arvioitu odotettavissa oleva ilmastomuutos Etelä-Suomessa. Kuvan 86 arviot perustuvat maailmanlaajuisen ilmastomallin tuloksiin ja ne ovat esitetty erikseen kolmelle kasvihuonekaasuskenaariolle:

- B1 – pienet päästöt (vihreä käyrä)
- A1B melko suuret päästöt (musta käyrä)
- A2 – suuret päästöt (punainen käyrä).

Oletuksena on, että kasvihuonekaasujen päästöt jatkavat kasvuaan koko tämän vuosisadan ajan (melko pessimistinen ns. SRES A2-kehitysvaihtoehto, joka valittiin tarkasteluihin, jotta tutkimustulokset olisivat varmalla puolella). (Ilmatieteenlaitos, 2014.)



Kuva 86. Etelä-Suomen alueen vuotuisen keskilämpötilan kohoaminen vuosina 2000-2100. (Ilmatieteenlaitos, 2014.)

Ilmastoennustemallit on tehty kahdelle paikkakunnille Vantaa ja Jokioinen. Tämän työn ulkoilman dataksi valittiin Jokioisen ilmastoennustemallit, sillä Jokioisen sijainti Kittilään verrattaessa on samankaltaisempi kuin Vantaan. Tarkasteltaessa rakenteita, joiden sisäosat on suojattu sateen vaikutukselta, voidaan testivuodeksi valita nykyilmastossa Jokioinen 2004. Samoja testivuosia voidaan käyttää koko Suomen alueella. Kuvassa 87 esitetään testivuosisidatan paikkakuntien sijainti Suomessa.



Kuva 87. Testivuosien valinnassa käytettyjen paikkakuntien sijainti Suomessa. (Tampereen teknillinen yliopisto, 2013.)

Ilmastotieteen laitoksen laatimissa ilmastoennustemalleissa on ennustettu arvot seuraaville suureille:

- lämpötila
- suhteellinen kosteus
- tuuli
- auringonsäteily
- sademäärä
-

Tässä simuloinnissa näistä suureista hyödynnetään lämpötilaa ja suhteellista kosteutta.

SIMULOINNIN LÄHTÖTIEDOT

Yleistä

Simulointi suoritettiin COMSOL Multiphysics-ohjelman heat and transfer - moduulilla. Simulointimalleihin rakennettiin Wellevin koetalon seinärakenteet. Tarkemmat tiedot rakenteista ja simuloinnin olosuhteista esitetään seuraavissa kappaleissa. Simulointimalleissa suoritettiin 5 vuoden rakennusfysikaalinen tarkastelu. 5 vuoden sisä- ja ulko-olosuhteet luotiin monistamalla mitatut vuoden 2016 sisäolosuhteet sekä monistamalla Ilmatieteenlaitoksen luomat tulevaisuuden säädataennusteet.

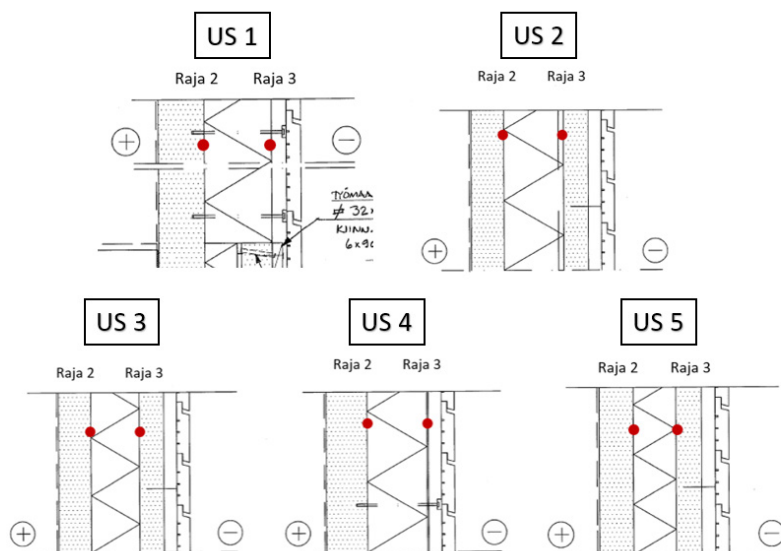
Simulointimallien tuloksia tarkasteltaessa on huomioitava seuraavat eroavaisuudet mitatun ja mallinnettuun tilanteen välillä:

- Simulointimallissa simuloidaan ns. Ideaalitulannetta
- Simulointimallissa ei otettu huomioon auringonpaisteen vaikutusta, sademääriä, tuuletusraon virtausta ja ristiinuritusta eristeessä (tuuletusputkien toimintaa)
- Mitatun ympäristön rakenteelliset tekijät: ikkunat, ovet ja nurkat/ kattoliitokset

Simulointien tuloksia tarkasteltaessa on huomioitava myös, että laskennassa on aina yksinkertaistuksia geometriassa, materiaalitiedoissa ja olosuhteissa. Tuloksia tulkittaessa on tarkasteltava kokonaisuutta ja arvioitava tuloksia suhteessa olemassa olevaan tietoon. Laskennan rajoitteet ja käytännön tekijät, jotka vaikuttavat oleellisesti rakenteen toimintaan on tunnistettava.

Rakenteet ja mittauspisteet

Alla olevassa kuvassa 88 esitellään simuloinnissa käytetyt rakenteet. Rakennekuvissa esitetään myös simuloinnin tarkastelupisteet. Tarkastelupisteiksi valittiin sisäpuolen betonikuoren ja eristeen raja (raja 2) sekä eristeen ja ilmaraon/ulkopuolen betonikuoren raja (raja 3). Tarkastelupisteiksi valittiin rakennekerrosten rajat, sillä nämä ovat rakennusfysikaalinen tarkastelun kannalta mielenkiintoisimpia.



Kuva 88. Tutkittavat rakennetyypit ja tarkastelupisteet

Käytetyt eristetyypit rakenteissa ovat seuraavat:

- US1 PAROC Cortex One
- US2 PAROC PreCast ggt
- US3 Thermisol Platina Sänkkäri
- US4 PAROC FAL1 (nykyinen tuotenimi PAROC Linio 80)
- US5 Kingspan Therma TW58

Rakenteiden alkuolosuhteet

Simuloitaviin rakenneosiin valittiin olosuhteet, jotka ovat saman suuruisia kuin Wellevin rakenteissa 2016 alkuvuodesta mitatut. Simuloinnissa käytetyt materiaalien alkuolosuhteet ovat seuraavat:

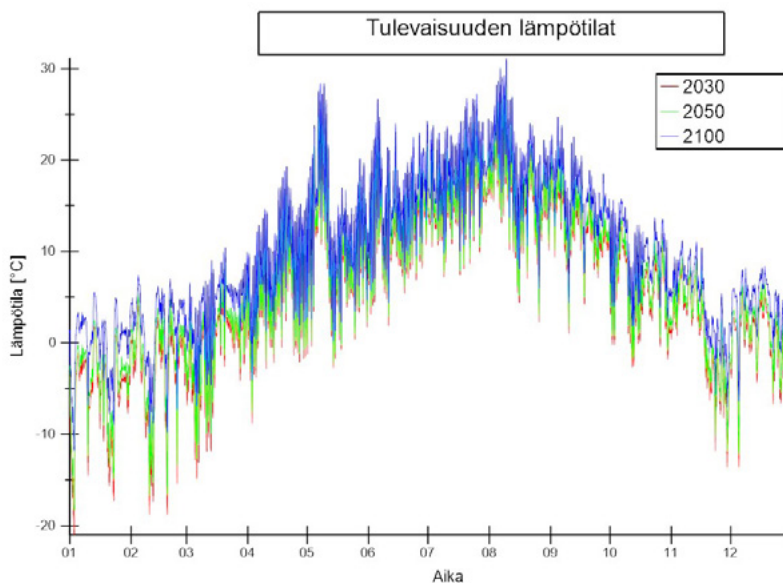
- Betoni sisäkuori: lämpötila 20 °C suhteellinen kosteus 60 %
- Eriste: lämpötila 10 °C suhteellinen kosteus 60%
- Betoni ulkokuori: lämpötila 0 °C suhteellinen kosteus 60 %
- Imarako: lämpötila 0 °C suhteellinen kosteus 60 %
- Julkisivuverhous: lämpötila 0 °C suhteellinen kosteus 60 %

Sisäolosuhteet

Sisäolosuhteina simuloinnissa käytettiin Wellevin huoneistossa mitattuja sisäolosuhteita (lämpötila ja suhteellinen kosteus). Sisäolosuhdedatana käytettiin vuoden 2016 aikana mitattuja olosuhteita.

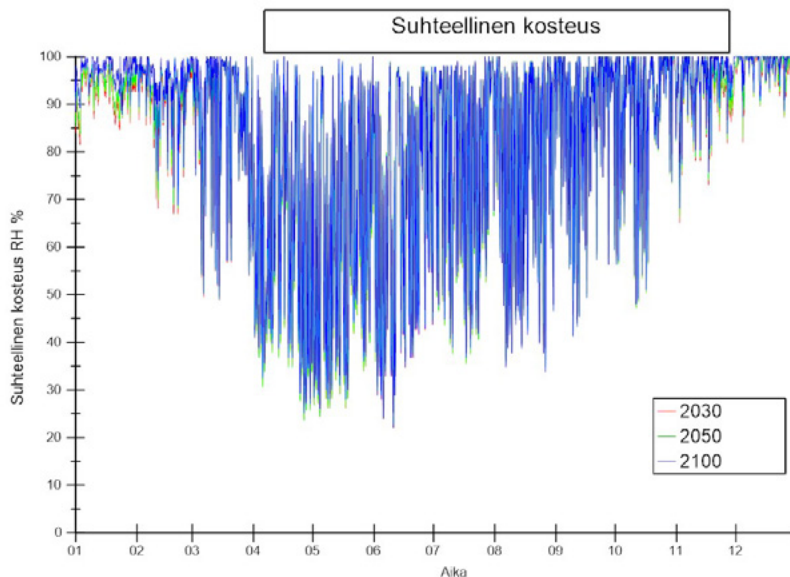
Ulko-olosuhteet

Ulko-olosuhteina simuloinnissa käytettiin ilmatieteenlaitoksen laatimaa ilmastoennustemallia Jokioisen kaupungille. Simuloinnit suoritettiin kolmella eri ilmastoennusteella, vuosi 2030, 2050 ja 2100 ennustemallilla. Kuvassa 89 esitetään vuosien 2030, 2050 ja 2100 lämpötilan ilmastoennustemallit ja Kuvassa 90 esitetään vuosien 2030, 2050 ja 2100 suhteellisen kosteuden vastaavat.



Kuva 89. Ilmatieteenlaitoksen ilmastoennustemalli Jokioinen vuosille 2030, 2050 ja 2100 lämpötila.

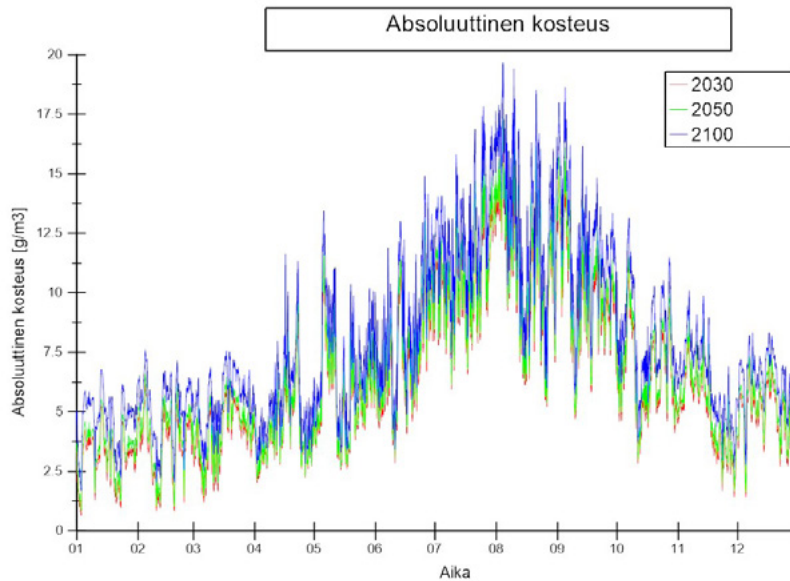
Kuvan 89 pystyakselilla esitetään lämpötilaa ja vaaka-akselilla aikaa tunteina. Ilmastoennustemallikuvaajista nähdään, että ennusteiden mukaan lämpötilat tulevat nousemaan tulevaisuudessa. Kuvaajasta huomataan, että varsinkin talvet ennustetaan lämpenevän (mustat viivat).



Kuva 90. Ilmatieteenlaitoksen ilmastoennustemalli Jokioinen 2030, 2050 ja 100 suhteellinen kosteus.

Kuvan 90 pystyakselilla esitetään suhteellista kosteutta ja vaaka-akselilla aikaa tunteina. Ilmastoennustemallikuvaajasta huomataan, että talvet muuttuvat ajan myötä kosteammiksi (mustat viivat). Myös kesäaikaan suhteellinen kosteus nousee, mutta sitä on vaikeaa havaita yllä olevasta kuvasta.

Ilmastoennustemallien perusteella voidaan todeta, että tulevaisuudessa ilmasto lämpenee sekä ulkoilman kosteudet nousevat. Suurin muutos näkyy talvikauden lämpötilojen ja kosteuksien nousussa. Vaikkakin yllä olevasta kuvasta huomataan, että suhteellisen kosteuden tasot eivät ennusteiden mukaan nouse huomattavasti, on tarkasteltava kokonaisuutta. Alla olevassa absoluuttisen kosteuden kuvaajasta nähdään ilmaston kosteustasojen nousu ilmastomalleissa.



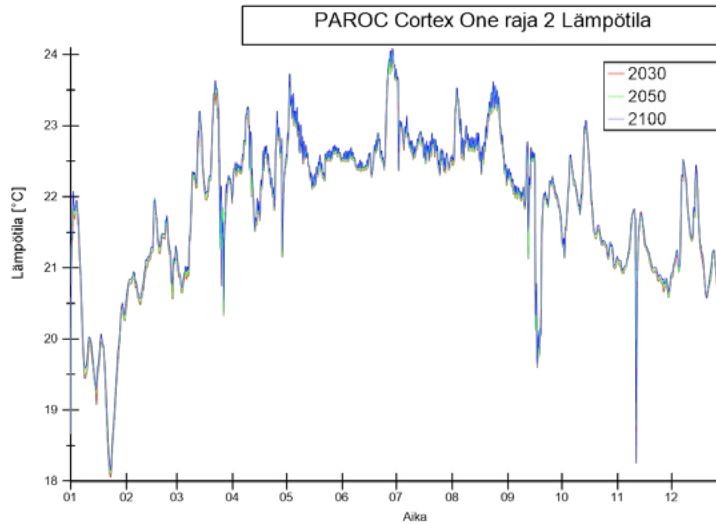
Kuva 91. Ilmatieteenlaitoksen ilmastoennustemalli Jokioinen 2030, 2050 ja 2100 absoluuttinen kosteus

LÄMPÖ- JA KOSTEUSTEKNISET TULOKSET

Yleistä

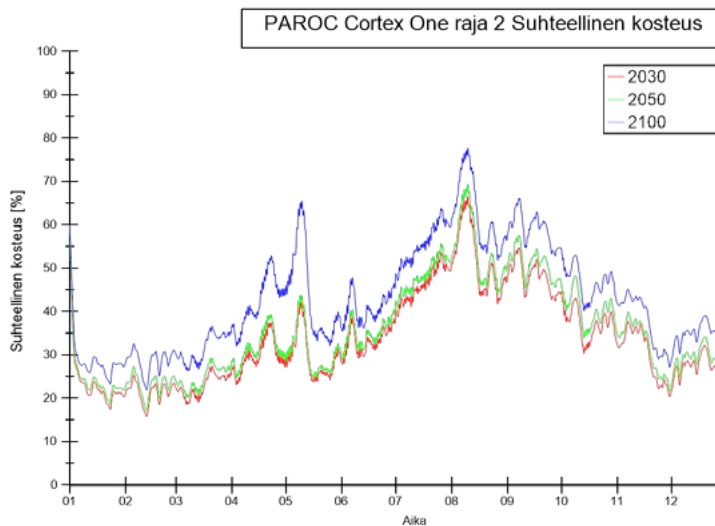
Kaikille tutkittavalle rakennetyypeille suoritettiin simulointi vuosien 2030, 2050 ja 2100 säädatalla viiden vuoden ajalle. Simuloitu data tuotiin Diadem-ohjelmaan, jossa suoritettiin datan visualisointi. Simuloinneilla saatujen tulosten perusteella kaikki 5 Welleissä olevaa rakennetyyppiä **toimivat oikeaoppisesti** myös tulevaisuudessa. Kaikista tutkituista pisteistä luotiin kuvaajat lämpötilalle, suhteelliselle kosteudelle ja niiden perusteella lasketulle absoluuttiselle kosteudelle.

US1 PAROC
Cortex One
Raja 2



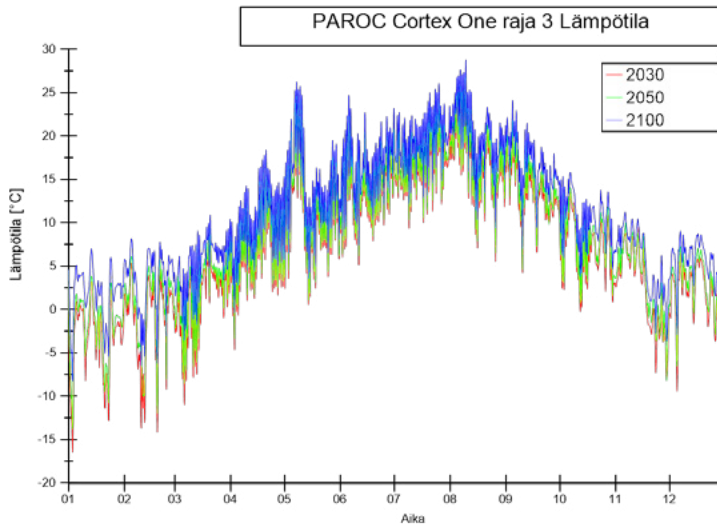
- Tulevaisuuden ulkoilman kohonneet lämpötilat eivät vaikuta huomattavasti rajan 2 lämpötilan tuloksiin.
- Tämä johtuu rajan 2 sijainnista rakenteessa (betonisisäkuori - eristekerros).

Kuva 92. PAROC Cortex One raja 2 lämpötila



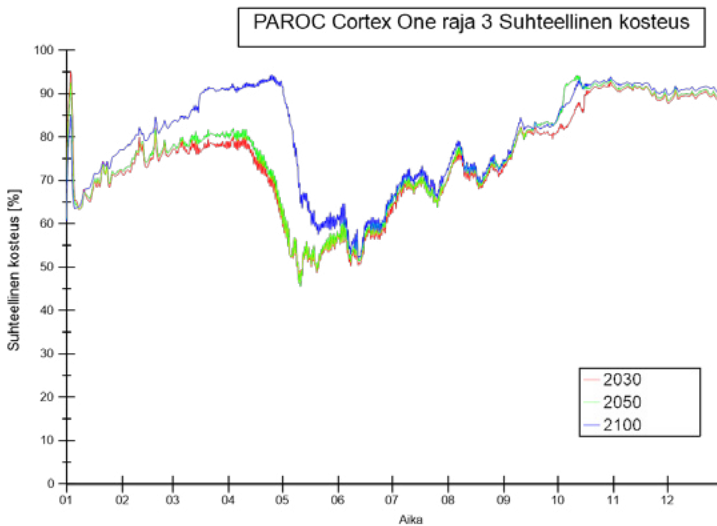
- Tuloksista huomataan, että suhteellisen kosteuden tasot nousevat rajassa 2 tulevaisuudessa.
- Suhteellisen kosteuden tasojen kasvu ei aiheuta haasteita rakenteen oikeaoppiselle toiminnalle.

Kuva 93. PAROC Cortex One raja 2 suhteellinen kosteus



- Rajan 3 lämpötilan tuloksista huomataan tulevaisuuden ulko-olosuhteiden lämpötilan nousu.
- Tuloksista huomataan varsinkin talviajan lämpötilojen nousu.

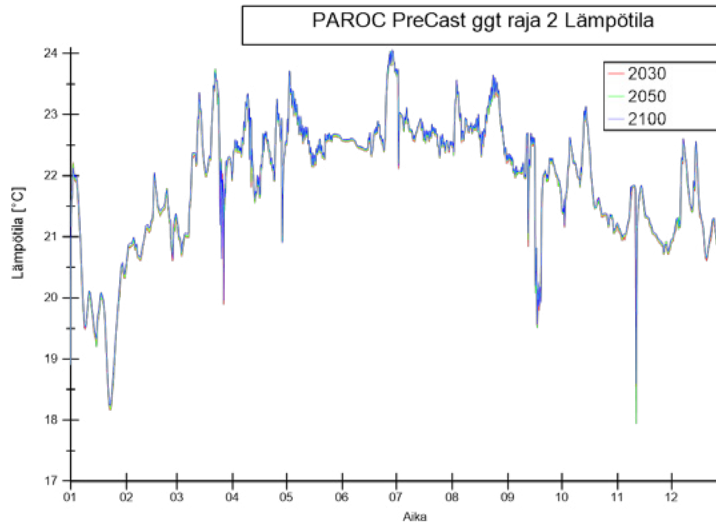
Kuva 94. PAROC Cortex One raja 3 lämpötila



- Suhteellisen kosteuden tasot kasvavat rajassa 3 tulevaisuudessa.
- Varsinkin kevät ajan 2100 käyrästä havaitaan huomattava suhteellisen kosteuden kasvu.
- Suhteellisen kosteuden tasojen kasvu ei aiheuta haasteita rakenteen oikeaoppiselle toiminnalle.
-

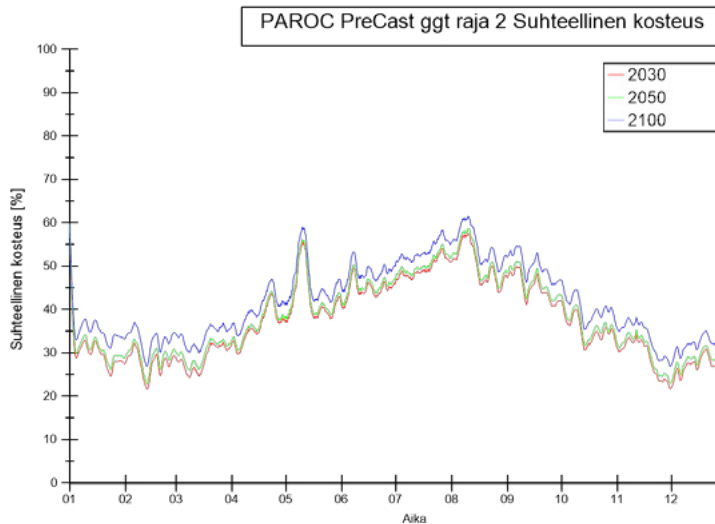
Kuva 95. PAROC Cortex One raja 3 suhteellinen kosteus

US2 PAROC
PreCast ggt
Raja 2



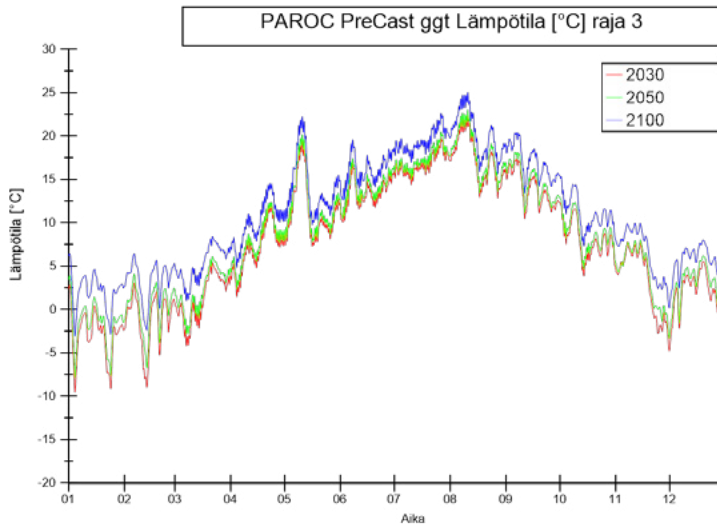
- Tulevaisuuden ulkoilman kohonneet lämpötilat eivät vaikuta huomattavasti rajan 2 lämpötilan tuloksiin.
- Tämä johtuu rajan 2 sijainnista rakenteessa, (betonisisäkuori - eristekerros)

Kuva 96. PAROC PreCast ggt raja 2 lämpötila



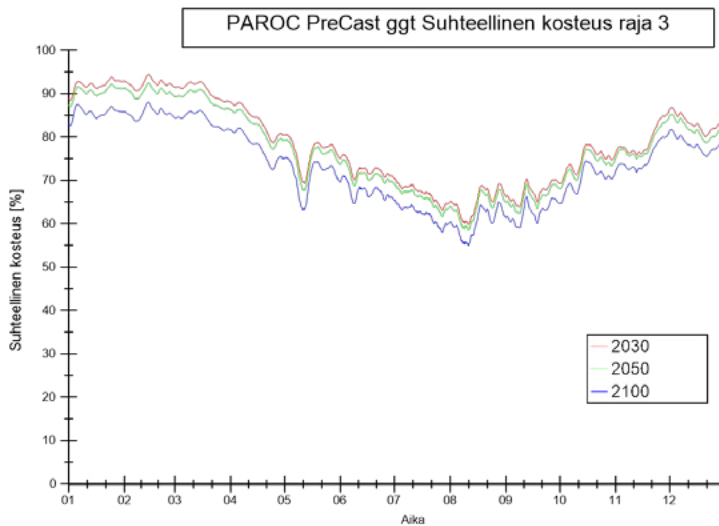
- Tuloksista huomataan, että suhteellisen kosteuden tasot nousevat rajassa 2 tulevaisuudessa.
- Suhteellisen kosteuden tasojen kasvu ei aiheuta haasteita rakenteen oikeaoppiselle toiminnalle.

Kuva 97. PAROC PreCast ggt raja 2 suhteellinen kosteus



- Rajan 3 lämpötilan tuloksista huomataan tulevaisuuden ulko-olosuhteiden lämpötilan nousu.
- Tuloksista huomataan varsinkin talviajan lämpötilojen nousu.

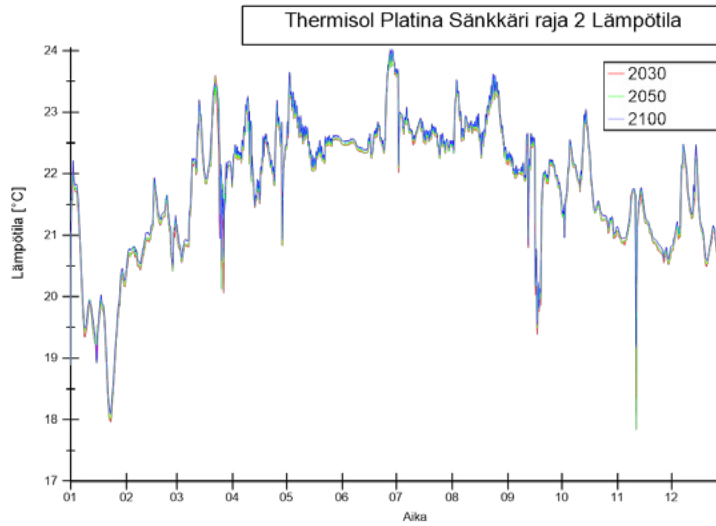
Kuva 98. PAROC PreCast ggt raja 3 lämpötila



- Suhteellisen kosteuden tasot laskevat rajassa 3 tulevaisuudessa

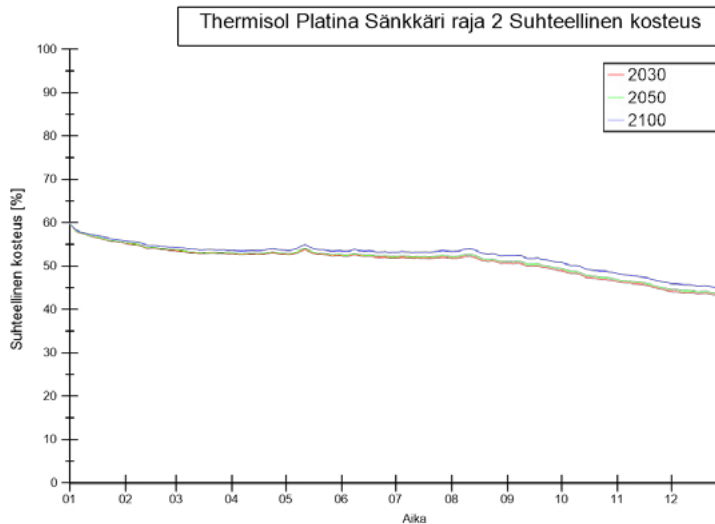
Kuva 99. PAROC PreCast ggt raja 3 suhteellinen kosteus

US3 Thermisol
Platina Sänkkäri
Raja 2



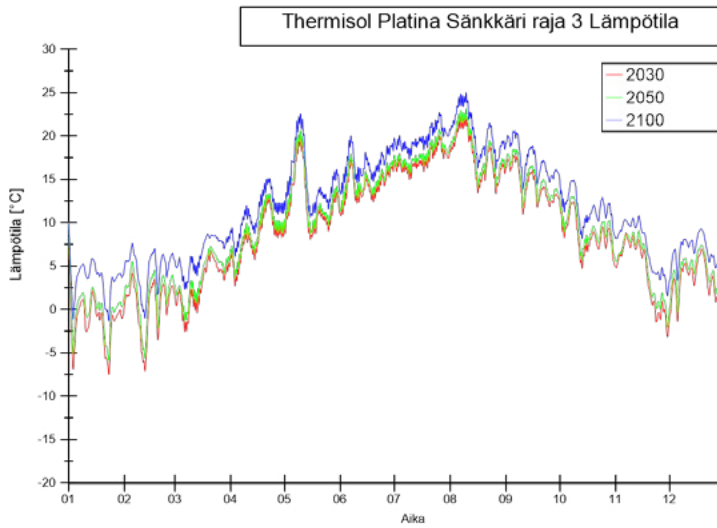
- Tulevaisuuden ulkoilman kohonneet lämpötilat eivät vaikuta huomattavasti rajan 2 lämpötilan tuloksiin.
- Tämä johtuu rajan 2 sijainnista rakenteessa, (betonisisäkuori - eristekerros).

Kuva 100. Thermisol Platina Sänkkäri raja 2 lämpötila



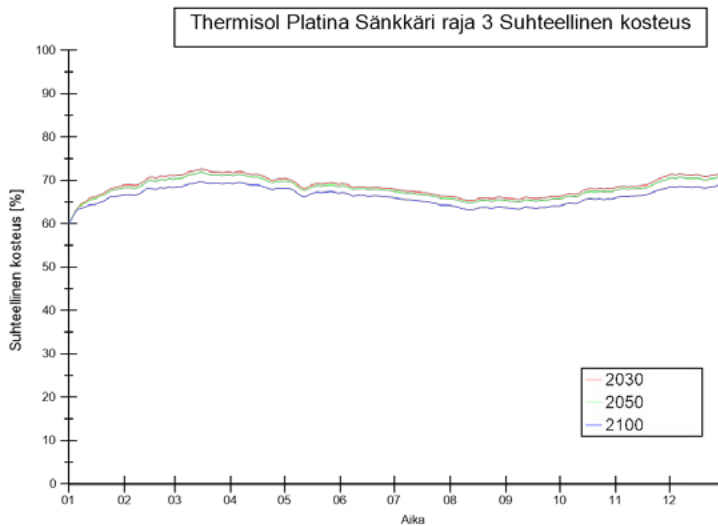
- Suhteellisen kosteudet tasot rajassa 2 nousevat hyvin vähän tulevaisuuden ilmasto-olosuhteissa.

Kuva 101. Thermisol Platina Sänkkäri raja 2 suhteellinen kosteus



- Rajan 3 lämpötilan tuloksista huomataan tulevaisuuden ulko-olosuhteiden lämpötilan nousu.
- Tuloksista huomataan varsinkin talviajan lämpötilojen nousu

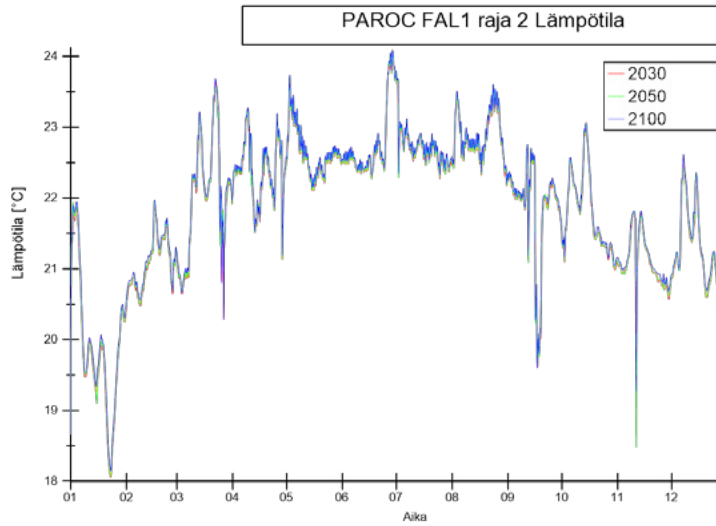
Kuva 102. Thermisol Platina Sänkkäri raja 3 lämpötila



- Suhteellisen kosteudet tasot rajassa 3 laskevat hyvin vähän tulevaisuuden ilmasto-olosuhteissa.

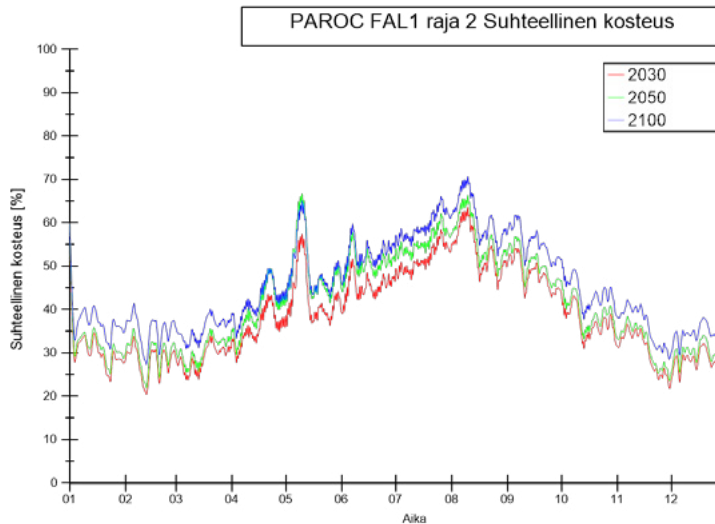
Kuva 103. Thermisol Platina Sänkkäri raja 3 suhteellinen kosteus

US4 PAROC
FAL1 (nykyinen
Linio 80)
Raja 2



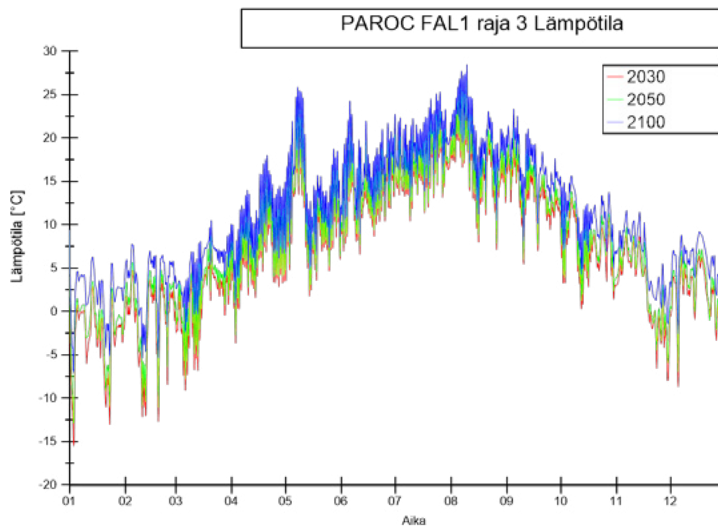
- Tulevaisuuden ulkoilman kohonneet lämpötilat eivät vaikuta huomattavasti rajan 2 lämpötilan tuloksiin.
- Tämä johtuu rajan 2 sijainnista rakenteessa, (betonisisäkuori - eristekerros).

Kuva 104. PAROC FAL1 raja 2 lämpötila



- Tuloksista huomataan, että suhteellisen kosteuden tasot nousevat rajassa 2 tulevaisuudessa.
- Suhteellisen kosteuden tasojen kasvu ei aiheuta haasteita rakenteen oikeaoppiselle toiminnalle.

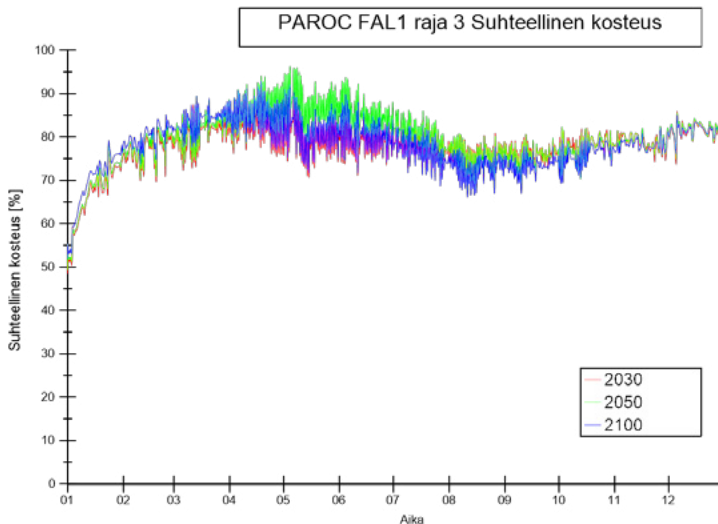
Kuva 105. PAROC FAL1 raja 2 suhteellinen kosteus



US4 PAROC FAL1
(nykyinen Linio
80)
Raja 3

- Rajan 3 lämpötilan tuloksista huomataan tulevaisuuden ulko-olosuhteiden lämpötilan nousu.
- Tuloksista huomataan varsinkin talviajan lämpötilojen nousu.

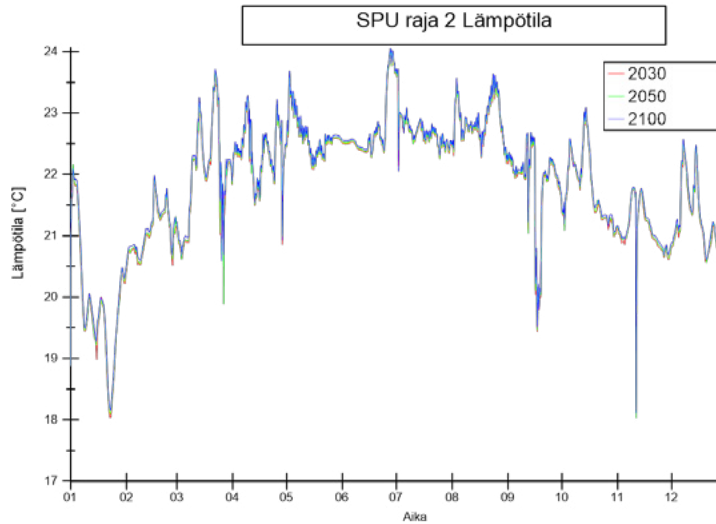
Kuva 106. PAROC FAL1 raja 3 lämpötila



- Rajan 3 tuloksista huomataan, että suhteellisen kosteuden tasot pysyvät saman suuruisina.
- Kesäajan tuloksista huomataan, että 2050 käyrän tulokset nousevat hieman muita käyriä korkeammalle

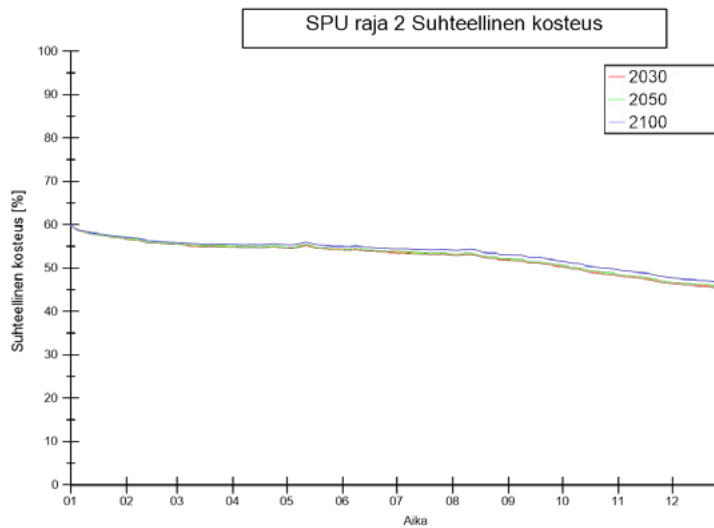
Kuva 107. PAROC FAL1 raja 3 suhteellinen kosteus

US5 Kingspan
Therma TW58
Raja 2



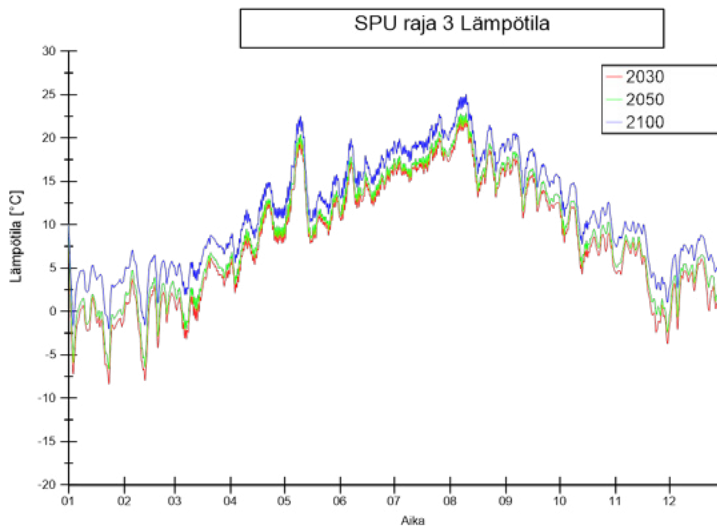
- Tulevaisuuden ulkoilman kohonneet lämpötilat eivät vaikuta huomattavasti rajan 2 lämpötilan tuloksiin.
- Tämä johtuu rajan 2 sijainnista rakenteessa, (betonisisäkuori - eristekerros).

Kuva 108. SPU raja 2 lämpötila (nykyinen tuotenimi Kingspan Therma TW58 150 mm)



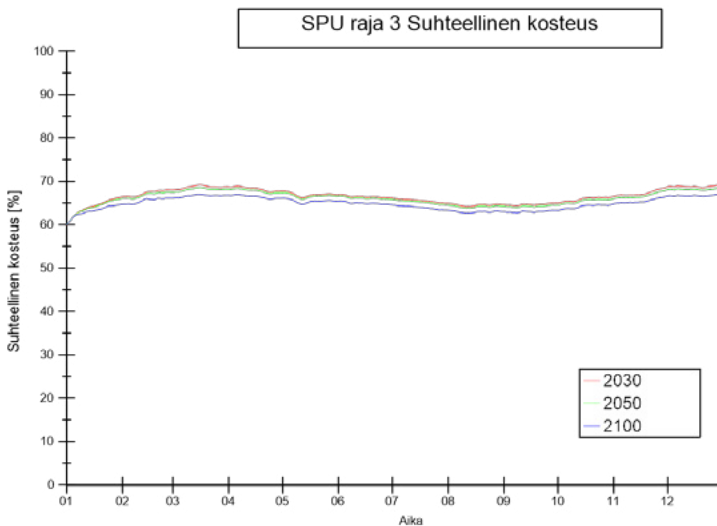
- Suhteellisen kosteudet tasossa 2 nousevat hyvin vähän tulevaisuuden ilmasto-olosuhteissa.

Kuva 109. SPU raja 2 suhteellinen kosteus (nykyinen tuotenimi Kingspan Therma TW58 150 mm)



- Rajan 3 lämpötilan tuloksista huomataan tulevaisuuden ulko-olosuhteiden lämpötilan nousu.
- Tuloksista huomataan varsinkin talviajan lämpötilojen nousu.

Kuva 110. SPU raja 3 lämpötila (nykyinen tuotenimi Kingspan Therma TW58 150 mm)



- Rajan 3 tuloksista huomataan, että suhteellisen kosteuden tasot pysyvät saman suuruisina.
- Kesäajan tuloksista huomataan, että 2050 käyrän tulokset nousevat hieman muita käyriä korkeammalle

Kuva 111. SPU raja 3 suhteellinen kosteus (nykyinen tuotenimi Kingspan Therma TW58 150 mm)

Seuraavissa kappaleissa esitellään jokaisen tutkitun rakennetyypin lämpö- ja suhteellisen kosteuden simuloinnin tulokset rajoissa 2 ja 3. Kuvaajissa esiintyy 3 käyrää, joista punainen esittää vuoden 2030 tuloksia, vihreä 2050 ja sininen 2100 vastaavia. Kuvaajien viereen on kirjoitettu kommentit tuloksista.

Yhteenveto

Edellä esitettyjen kuvien muutokset lämpötiloissa ja kosteuksissa **eivät aiheuttaneet riskiä** rakenteiden oikeaoppiselle toiminnalle.

Taulukko 11. Tammikuun keskiarvo lämpötilat rajassa 3

Rakennetyyppi	2030	2050	2100
Sandwich-rakenteet			
US2 PAROC PreCast ggt	-2,9 °C	-1,7 °C	2,1 °C
US3 Thermisol Platina Sänkkäri	-1,3 °C	-0,2 °C	3,4 °C
US5 Kingspan Therna TW58	-1,9 °C	-0,7 °C	2,7 °C
Tavanomaiset rakenteet			
US1 PAROC Cortex One	-3,3 °C	-2,1 °C	1,7 °C
US4 PAROC FAL1 (nykyinen LINIO 80)	-3,3 °C	-2,0 °C	1,9 °C

Alla olevissa taulukoissa esitetään **tammikuun** keskiarvot kaikissa rakennetyypeissä lämpötilalle, suhteelliselle kosteudelle ja absoluuttiselle kosteudelle rajassa 3. Taulukoissa esitetään eri ryhmissä sandwich-rakenteet sekä tavanomaiset rakenteet.

Taulukon 11 tuloksista huomataan, että keskiarvolämpötilat rakenteen rajassa 3 **kasvat** tasaisesti tulevaisuuden datassa. Tämä ilmiö oli jo ennustettavissa edellä esitettyjen tulevaisuuden ilmastoennustemallien perusteella.

Taulukko 12. Tammikuun keskiarvo suhteelliset kosteudet rajassa 3

Rakennetyyppi	2030	2050	2100
Sandwich-rakenteet			
US2 PAROC PreCast ggt	92 %	91 %	86 %
US3 Thermisol Platina Sänkkäri	73 %	72 %	70 %
US5 Kingspan Therna TW58	72 %	70 %	68 %
Tavanomaiset rakenteet			
US1 PAROC Cortex One	89 %	89 %	91 %
US4 PAROC FAL1 (nykyinen LINIO 80)	82 %	83 %	88 %

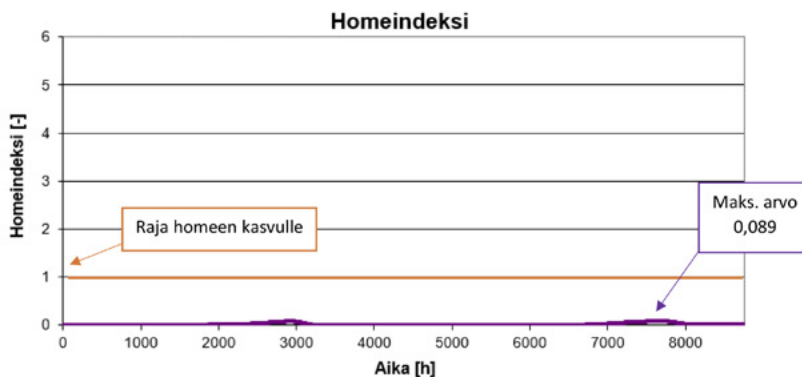
Taulukko 13. Tammikuun keskiarvo absoluuttisen kosteudet rajassa 3

Rakennetyyppi	2030	2050	2100
Sandwich-rakenteet			
US2 PAROC PreCast ggt	3,6 g/m ³	3,9 g/m ³	4,8 g/m ³
US3 Thermisol Platina Sänkkäri	3,2 g/m ³	3,4 g/m ³	4,2 g/m ³
US5 Kingspan Therna TW58	3,0 g/m ³	3,2 g/m ³	4,0 g/m ³
Tavanomaiset rakenteet			
US1 PAROC Cortex One	3,4 g/m ³	3,7 g/m ³	5,0 g/m ³
US4 PAROC FAL1 (nykyinen LINIO 80)	3,2 g/m ³	3,5 g/m ³	4,6 g/m ³

Taulukon 12 suhteellisen kosteuden tuloksista huomataan, että suhteellisen kosteuden arvot **laskevat** sandwich-rakenteiden rajan 3 mittapisteissä tulevaisuudessa. Vastaavasti rakennetyypeissä US1 ja US4 suhteellisen kosteuden arvot **nousevat** tulevaisuudessa. Eroavaisuus johtuu siitä, että rakenteissa US1 ja US4 simuloitujen rajapisteet ovat eriste-tuuletusrako rajapinnassa, jonka vuoksi ne ovat suoraan kosketuksissa ulkoilmaan, joka ennusteiden mukaan muuttuu kosteammaksi ja lämpimimmäksi, kuten edellä olevissa kappaleissa esitetään.

Esitettyjen tulosten perusteella voidaan todeta, että lämpötilat ja kosteustasot kasvavat tutkituissa rakenteissa tulevaisuuden ilmastoennustemallien mukaan. Esitetyt **muutokset eivät aiheuta ongelmia rakenteiden oikeaoppiselle toiminnalle**. Seuraavassa kappaleessa esitetään simuloinnin tulosten perusteella lasketut homeindeksit.

HOMEINDEKSILASKENNAN TULOKSET



Kuva 112. US1 raja 3 homeindeksikuvaaja 2100

Kaikkien tutkittavien rakenteiden simuloitujen tulokset vietiin Suomalaiseen homeindeksi laskuriin. Homeindeksit laskettiin vuosille 2030, 2050 ja 2100. Simulointimalleja varten ilmastoennustemallien 1 vuoden datat monistettiin 5 vuoden dataksi, jotta saatiin tehtyä kattava homeindeksitarkastelu. Kuvassa 112 esitetään US₁ – rakenteen rajan 3 homeindeksilaskennan tulos vuoden 2100 olosuhteilla. Kuvasta huomataan, että homeindeksi pysyy reilusti **alle yhden**, joka on raja-arvo homeen kasvun alkamiselle.

Taulukossa 14 esitetään homeindeksilaskennan tulokset rajassa 3. Raja 3 valittiin tarkasteltavaksi, koska kyseinen kohta on todennäköisin kohta homeen kasvun mahdollisuudelle käytetyissä rakenteissa. Tulosten perusteella voidaan sanoa, että lämpö- ja kosteusteknisten tarkasteluiden tulosten perusteella **homeen kasvulle ei ole mahdollisuutta**.

Taulukko 14. Maksimihomeindeksit rajassa 3

Rakennetyyppi	2030	2050	2100
US1 PAROC Cortex One	0,016	0,059	0,089
US2 PAROC PreCast ggt	0,121	0,098	0,052
US3 Thermisol Platina Sänkkäri	0	0	0
US4 PAROC FAL1 (nykyinen Linio 80)	0,001	0,012	0,001
US5 Kingspan Therma TW58	0	0	0

JOHTOPÄÄTÖKSET

Simuloinnin tulosten perusteella voidaan todeta, että Welleissä käytössä olevat rakenteet toimivat oikeaoppisesti myös tulevaisuuden ilmastoennustemalleilla. Riskiolosuhteita homeen kasvulle ei ollut simuloinnin tuloksissa. Kuten muitakin simulointituloksia tarkasteltaessa, on huomioitava laskennan yksinkertaistus. Tuloksia tarkasteltaessa on myös huomioitava, että simulointimalleissa ei ole mallinnettu tuuletusputkien ja -urien toimintaa, jotka parantavat käytettyjen rakenteiden kosteusteknistä toimintaa. Simulointimalli on ns. ideaalitalanne rakenteesta, eikä se ota huomioon viistosateen vaikutusta sekä virheellisen asentamisen mahdollistamia kosteusvuotoja yms.

Tarkemmat tarkastelut rakenteiden toiminnasta, joissa otetaan huomioon viistosateen ja muiden tekijöiden vaikutus ovat tarpeen, jotta simuloinnin tuloksia voidaan pitää täysin pitävinä. Tehty simulointi rajaa pois ulko-olosuhteiden muutoksen perusteella aiheutuvat riskit rakenteissa.

Ennustetun ilmastonmuutoksen seurauksena ulkolämpötilat nousevat, sademäärät kasvavat ja pilvisuus lisääntyy. Lisäksi myös ulkoilman suhteellinen kosteus voi nousta ja pilvisuus lisääntyä. Edellä mainitut tekijät lisäävät homeen kasvun mahdollisuut-

ta ja kosteuden tiivistymisen mahdollisuutta varsinkin rakenteiden ulko-osissa. Lisäksi rakenteiden kuivuminen hidastuu ja kuivumisajat pitenevät. (Tampereen teknillinen yliopisto, 2013.)

Tällä hetkellä käytössä olevat rakenteet toimivat myös tulevaisuuden ilmastossa. Edellä mainittujen riskitekijöiden vuoksi tulevaisuudessa on tärkeää toteuttaa kosteudenhallinta huolellisesti. Tärkeitä kosteudenhallintaan vaikuttavia tekijöitä ovat mm. viistosateelta suojaaminen, riittävän tuulettumisen varmistaminen sekä elementtien saumaaminen.

LÄHDELUETTELO

- [1] Ilmatieteenlaitos, 2014. Rakennusfysiikan ilmastolliset testivuodet. Viitattu 6.3.2017 <http://ilmatieteenlaitos.fi/rakennusfysiikan-ilmastolliset-testivuodet>
- [2] Tampereen teknillinen yliopisto, 2013. Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Viitattu 6.3.2017 <http://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/rakentamisen-kehittaminen/frame-loppuraportti.pdf>

Ikkunoiden syvyysuuntainen sijoittaminen betonielementissä

JOHDANTO

Kasvatavat seinäpaksuudet aiheuttavat sen, että ikkuna joutuu ikään kuin syvennykseen sisä- ja/tai ulkopuolelta. Tällainen syvennys heikentää ilman liikkumista ikkunan pinnassa. Toisaalta seinän paremmat U-arvot pienentävät lämmitystarvetta. Käytännössä esim. ilmalämmitykseen siirtyminen merkitsee sitä ettei ikkunan läheisyydessä ole lämmönlähdettä.

Erityisesti kiinteän ikkunan karmirakenne asennettuna seinärakenteeseen tekee herkästi kylmäsillan ikkunan ja seinän rajapintaan. Tällöin ikkunan reuna-alueen lämpötila saattaa laskea kastepisteen tuntumaan.

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää ikkunan syvyysuuntaisen sijoittamisen merkitystä vaipan kosteus- ja lämpötekniseen toimintaan sekä ikkunan reuna-alueen toimivuuden parantaminen. Tutkimus toteutettiin simulointimallilla COMSOL Multiphysics-ohjelmistolla. Mallinnus ja tulosten analysointi toteutettiin ostopalveluna Vaasan yliopistolta.

Mallinnuksessa keskityttiin selvittämään nykyaikaisen ikkunoiden, erityisesti avattavan 2+2 ja kiinteän 3K-rakenteen vaikutusta ikkunan ja seinärakenteen rajapinnan lämpötiloihin ja kosteustekniseen toimivuuteen. Lisäksi tutkittiin huurtumattoman lasin toiminnan edellytyksiä em. Rakenteissa ja selvitettiin raja-arvo-olosuhteita ikkunan toimivuudelle. Tarkastelu kohdennettiin ikkunan reuna-alueille.

SIMULOINNIN LÄHTÖTIEDOT

Yleistä

Simulointi toteutettiin COMSOL Multiphysics-ohjelman Heat transfer in Building materials ja moisture transport moduuleilla. Simuloidut ikkunarakenteet tuotiin COMSOL-ohjelmaan 2D CAD-tiedostoina. Työssä ei simuloitu ilmavirtauksia eikä integroidun ilmanvaihtokoneen toimintaa (ilmavirtaukset & lämmöntuotto). (Backman A. 2017)

Seinärakenteena simuloinnissa käytettiin mineraalivillaeristeistä betonisandwich seinärakennetta (Betoni 120 mm – Mineraalivilla 220 mm – Betoni 90 mm). Simuloinnissa käytettyjen rakennusmateriaalien ominaisuudet saatiin COMSOL-ohjelmasta ja puuttuvien materiaalien tiedot täydennettiin alan kirjallisuudesta. (Backman A. 2017)

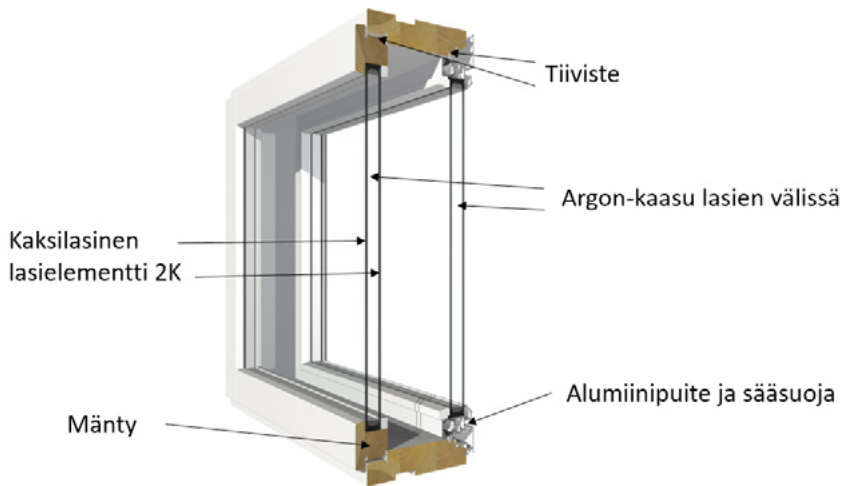
Simuloinnin ajanjaksoksi valittiin yksi vuosi. Simuloinnin sisäilman olosuhteina käytettiin vakioitua 20 °C lämpötilaa sekä 50 % suhteellista kosteutta. Ulkoilman olosuhteet saatiin ohjelmaan sisältämästä ASHARE tietoperustasta. Simuloinnin virtuaalisena sijaintina käytettiin Muonion kuntaa. (Backman A. 2017)

Työssä simuloitavat kolme erilaista ikkunarakkaisua esitetään seuraavassa kappaleessa. Jokaiselle kolmelle ikkunarakkaisulle toteutettiin kolme erilaista simulointia. Simuloinneissa tutkittiin ikkunan syvyysuuntaisen sijoittamisen vaikutusta sen lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan. Tutkittavia ikkunan sijainteja olivat seinärakenteen sisäreuna, rakenteen keskusta ja ulkoreuna. (Backman A. 2017)

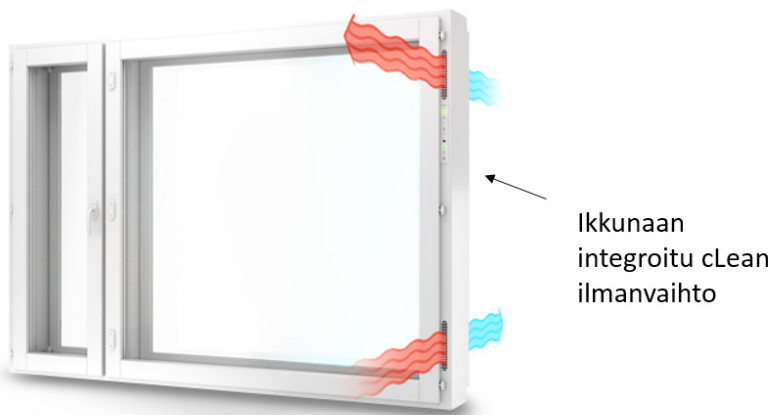
SIMULOITAVAT RAKENTEET

Skaala Alfa 40 N ikkuna

Skaala Alfa 40 N ikkunassa on kaksi kaksilasista eristyslaselementtiä (2K+2K) (Kuva 113). Molemmat lasielementit ovat avattavia. Molemmat lasielementit muodostavat tiiviin elementin, jonka keskusta on täytetty Argon-kaasulla. Ikkunan kehys ja sisäpuite ovat mäntyä, ulkona sijaitseva puite on alumiininen. Ikkunassa käytetyt tiivisteet ovat synteettistä kumia. Skaala Alfa 40 N ikkunoihin on kehitetty karmiin integroitava ilmanvaihtojärjestelmä. Skaala Alfa cLean-ilmanvaihtoikkunassa yhdistyvät ikkuna, älykäs ilmanvaihto ja lämmön talteenotto (Kuva 114). (Skaala 2017a)



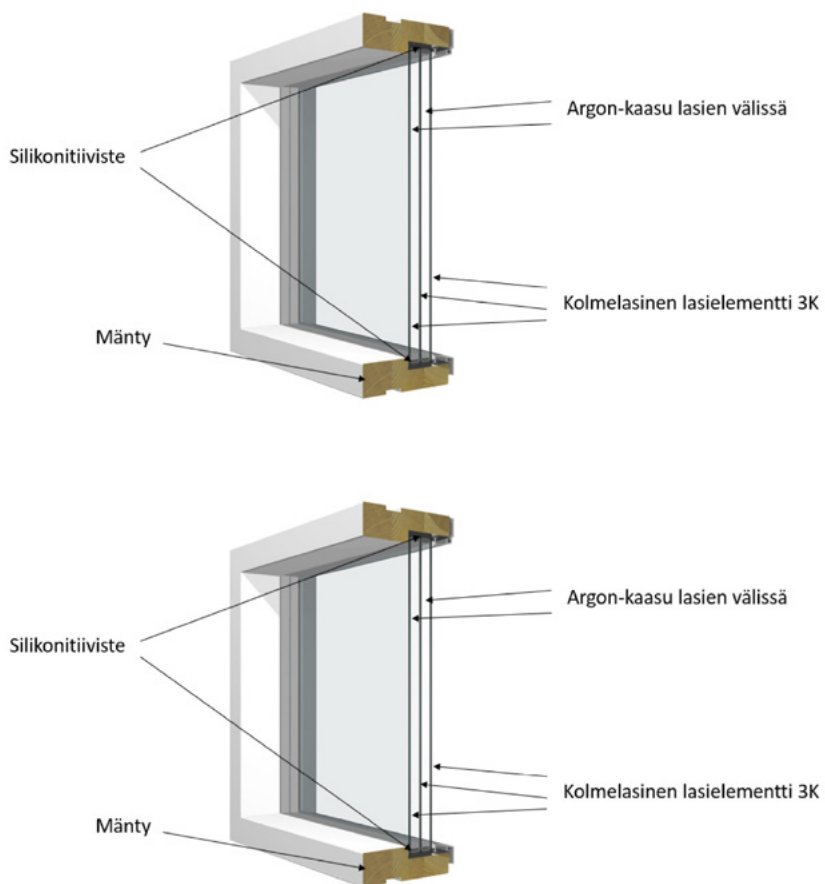
Kuva 113. Skaalan Alfa 40 N ikkuna (Skaala 2017b, muokattu)



Kuva 114. Skaala Alfa 40 N ikkuna integroidulla cLean ilmanvaihdolla (Skaala 2017a, muokattu)

Skaala ULEK ikkuna

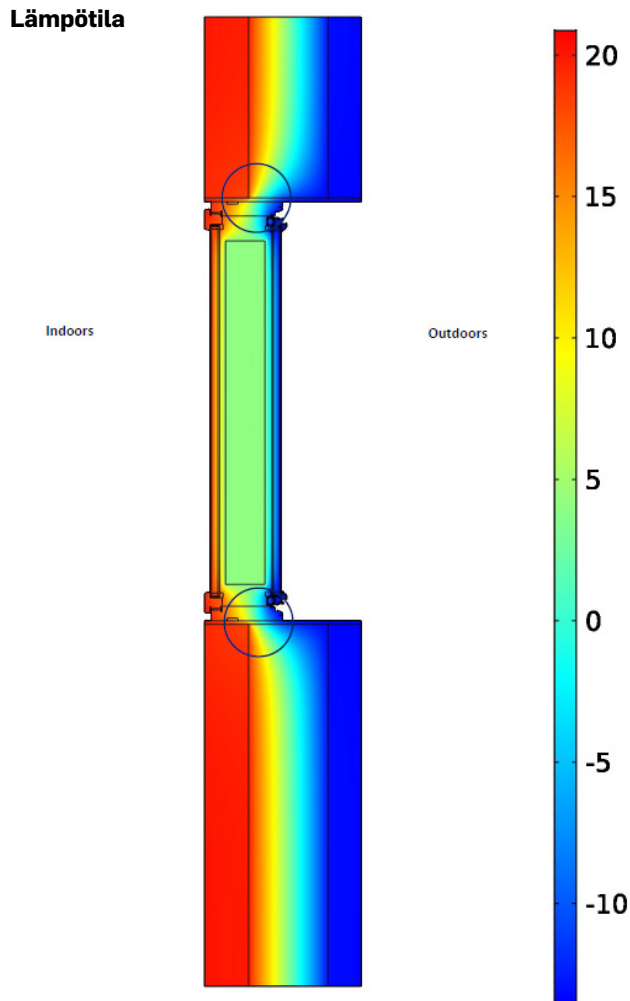
Skaala ULEK ikkuna on kiinteä kolmelasinen (3k) ikkuna (Kuva 115). Ikkunan karmi on mäntyä, tiivisteenä silikonia ja ulkoinen puite on alumiinia. (Skaala 2017b)



Kuva 115. Skaala ULEK ikkuna (Skaala 2017b, muokattu)

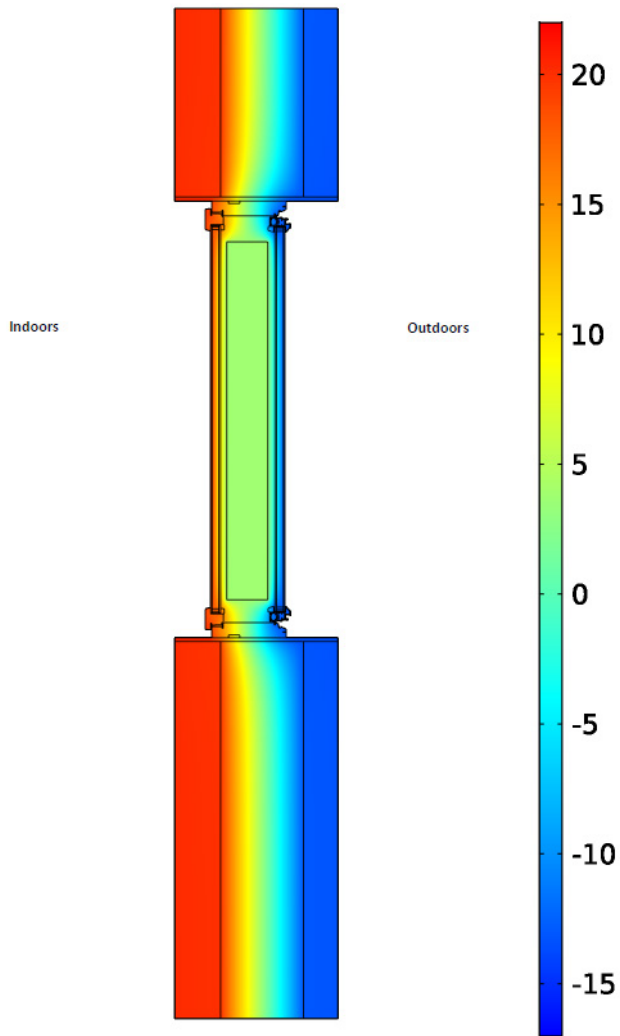
SIMULOINNIN TULOKSET

Skaala Alfa 40N ikkuna cLean järjestelmällä



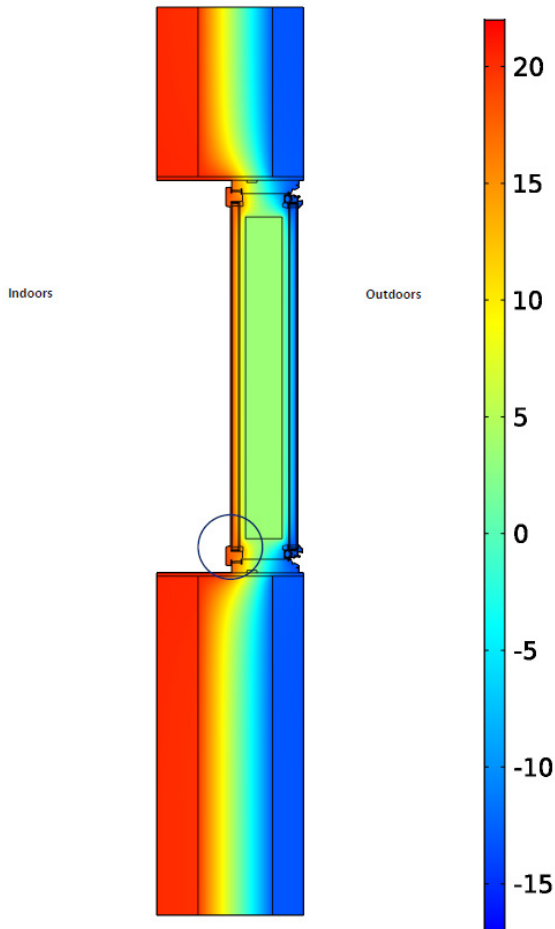
Kuva 116. Skaala Alfa 40N ikkuna cLean-järjestelmällä. (Backman A. 2017)

Kuvassa 116 esitetään lämpötilagradientti ikkunan sijaitessa seinärakenteen sisäpinnassa. Sisälämpötila on $+21^{\circ}\text{C}$ ja ulkolämpötila -13°C . Oikealla sijaitseva liukuva väriasteikko esittää lämpötilaa celsiusasteina. Lämpötilan muutos on hyvin jyrkkä seinän ja ikkunakehyksen välillä (mustat ympyrät). Betonikuoren lämpötila on tasainen. (Backman A. 2017)



Kuva 117. Skaala Alfa 40N ikkuna cLean-järjestelmällä. (Backman A. 2017)

Kuvassa 117 esitetään lämpötilagradientti ikkunan sijaitessa seinärakenteen keskellä. Sisälämpötila on $+21^{\circ}\text{C}$ ja ulkolämpötila -13°C . Oikealla sijaitseva liukuva väriasteikko esittää lämpötilaa celsiusasteina. Lämpötila on jakautunut tasapainoisesti ikkunnallisessa seinärakenteessa. (Backman A. 2017)

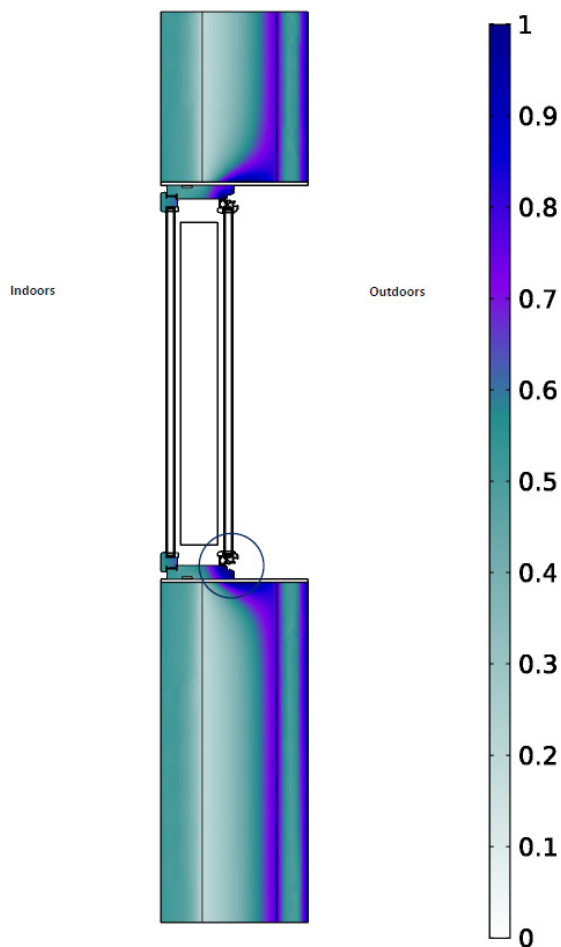


Kuva 118. Skaala Alfa 40N ikkuna cLean-järjestelmällä. (Backman A. 2017)

Kuvassa 118 esitetään lämpötilagradientti ikkunan sijaitessa seinärakenteen ulkopinnassa. Sisälämpötila on $+21^{\circ}\text{C}$ ja ulkolämpötila -13°C . Oikealla sijaitseva liukuva väriasteikko esittää lämpötilaa celsiusasteina. Ikkunan sisäpuolen lämpötila on viileämpi kuin keskellä sijaitsevan ikkunan (kuva 117). (Backman A. 2017)

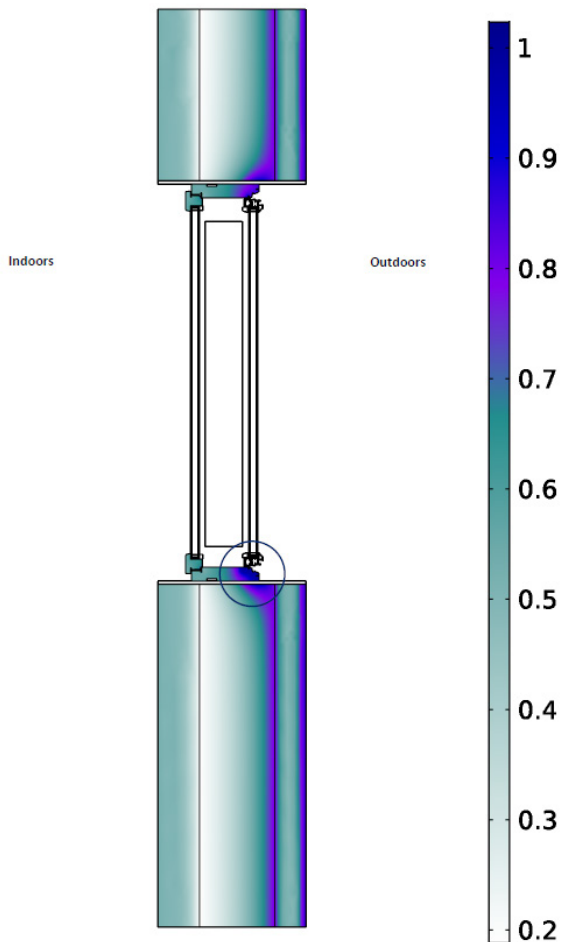
Kuvassa 119 esitetään suhteellisen kosteuden gradientti ikkunan sijaitessa seinärakenteen sisäpinnassa. Sisälämpötila on $+21^{\circ}\text{C}$ ja ulkolämpötila -13°C . Oikealla sijaitseva

Suhteellinen kosteus



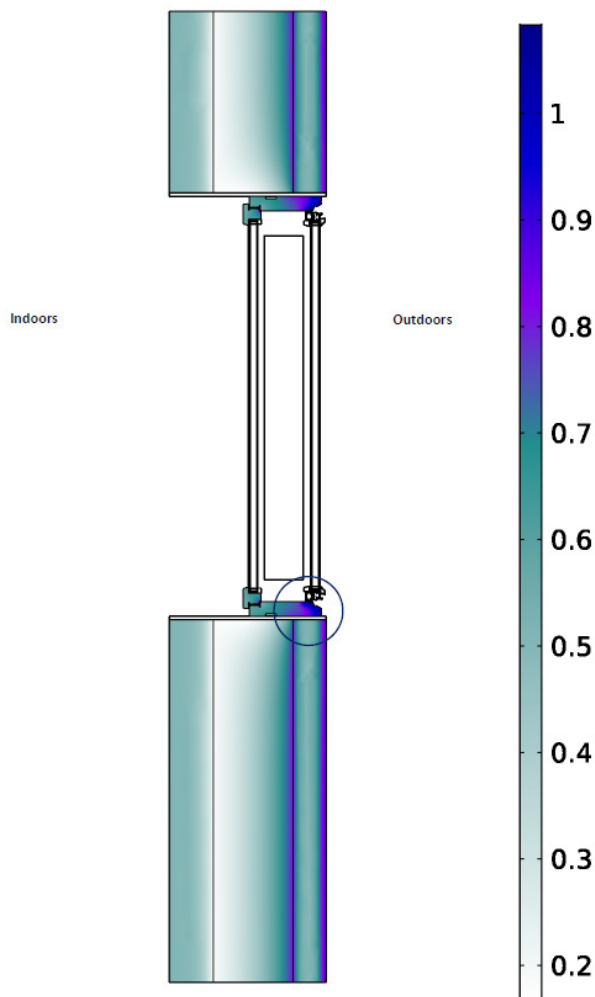
Kuva 119. Skaala Alfa 40N ikkuna cLean-järjestelmällä. (Backman A. 2017)

liukuva väriasteikko esittää suhteellista kosteutta prosentuaalisesti, jossa lukuarvo 1 = 100%. Kosteuden tasot ovat suurimpia lähimpänä materiaalien pintoja. Kosteuden pitoisuus on haitallisen suuri alemman ikkunapuitteen kohdalla (musta ympyrä). (Backman A. 2017)



Kuva 120. Skaala Alfa 40N ikkuna cLean-järjestelmällä. (Backman A. 2017)

Kuvassa 120 esitetään suhteellisen kosteuden gradientti ikkunan sijaitessa seinärakenteen keskellä. Sisälämpötila on $+21^{\circ}\text{C}$ ja ulkolämpötila -13°C . Oikealla sijaitseva liukuva väriasteikko esittää suhteellista kosteutta prosentuaalisesti, jossa lukuarvo 1 = 100%. Kosteuden tasot ovat suurimpia lähimpänä materiaalien pintoja. Kosteuden pitoisuus on suuri alemman ikkunapuitteen kohdalla (musta ympyrä). (Backman A. 2017)

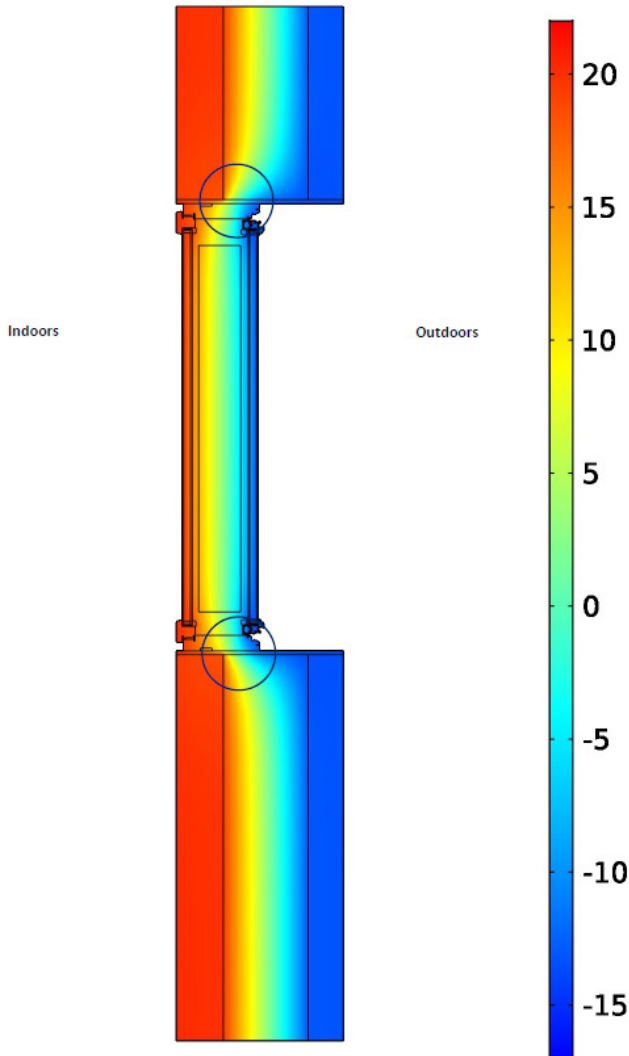


Kuva 121. Skaala Alfa 40N ikkuna cLean-järjestelmällä. (Backman A. 2017)

Kuvassa 121 esitetään suhteellisen kosteuden gradientti ikkunan sijaitessa seinärakenteen ulkopinnassa. Sisälämpötila on $+21^{\circ}\text{C}$ ja ulkolämpötila -13°C . Oikealla sijaitseva liukuva väriasteikko esittää suhteellista kosteutta prosentuaalisesti, jossa lukuarvo 1 = 100%. Kosteuden tasot ovat suurimpia lähimpänä materiaalien pintoja, mutta tasot eivät ole suuria. Kosteuden pitoisuus on vieläkin huomattava alemman ikkunapuitteen kohdalla (musta ympyrä). (Backman A. 2017)

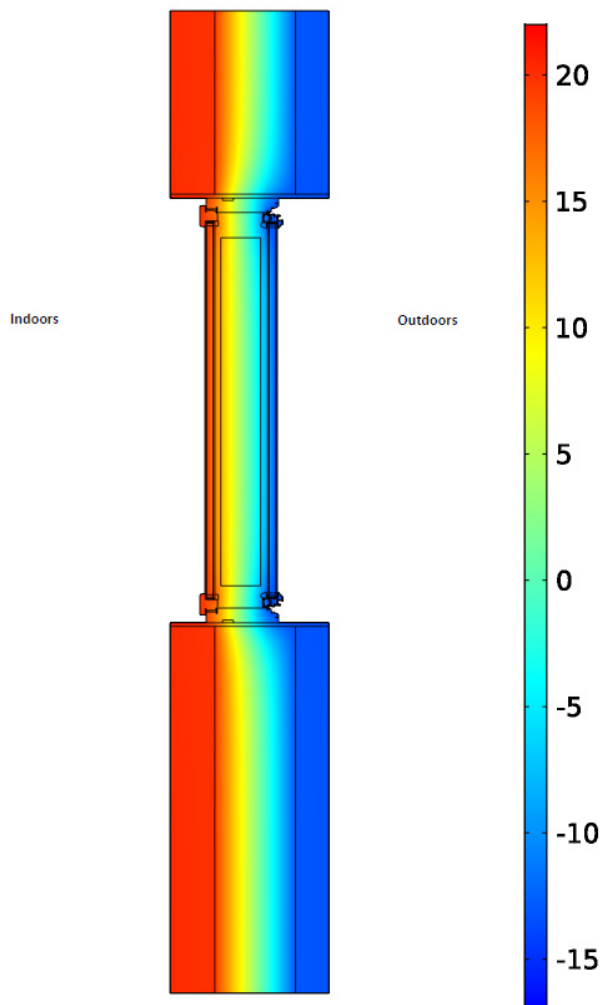
Skaala Alfa 40N ikkuna cLean järjestelmällä

Lämpötila



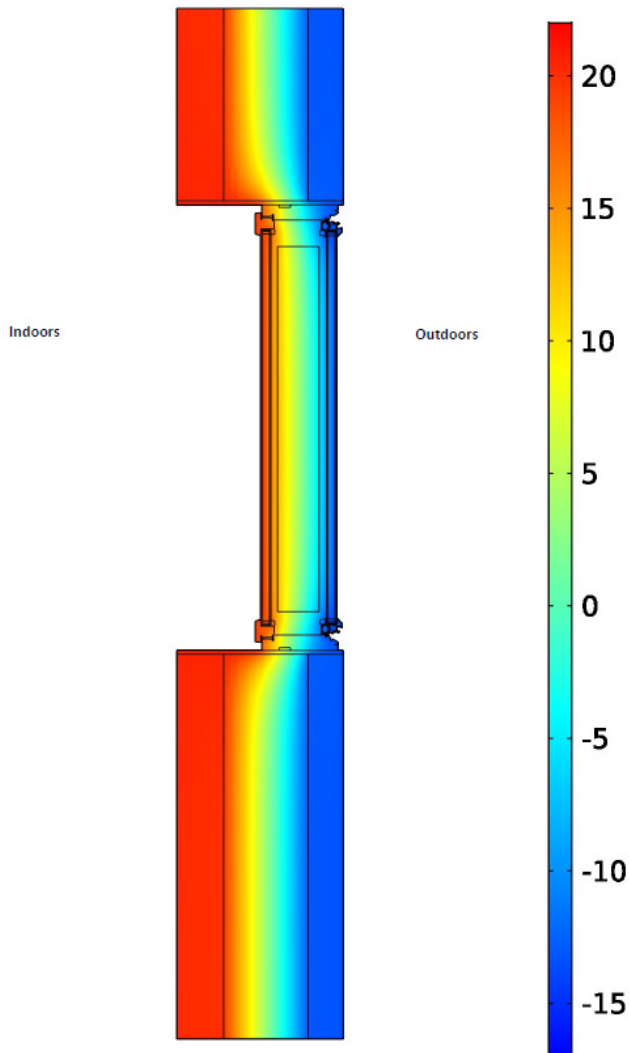
Kuva 122. Skaala Alfa 40N ikkuna cLean-järjestelmällä. (Backman A. 2017)

Kuvassa 122 esitetään lämpötilagradientti ikkunan sijaitessa seinärakenteen sisäpinnassa. Sisälämpötila on +21°C ja ulkolämpötila -13°C. Oikealla sijaitseva liukuva väriasteikko esittää lämpötilaa celsiusasteina. Lämpötilan muutos on hyvin jyrkkä seinän ja ikkunakehyksen välillä (mustat ympyrät). Betonikuoren lämpötila on tasainen. (Backman A. 2017)



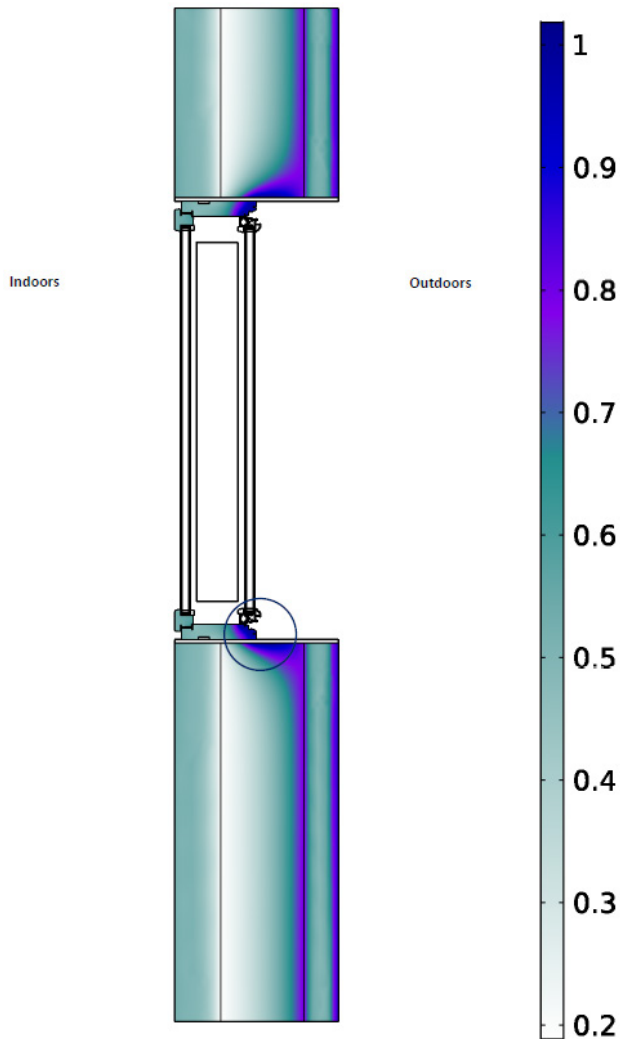
Kuva 123. Skaala Alfa 40N ikkuna ilman cLean-järjestelmää. (Backman A. 2017)

Kuvassa 123 esitetään lämpötilagradientti ikkunan sijaitessa seinärakenteen keskellä. Sisälämpötila on +21°C ja ulkolämpötila -13°C. Oikealla sijaitseva liukuva väriasteikko esittää lämpötilaa celsiusasteina. Lämpötila on jakautunut tasapainoisesti suuresta sisä- ja ulkolämpötilan erosta huolimatta. Betonikuoren lämpötila on tasainen. (Backman A. 2017)



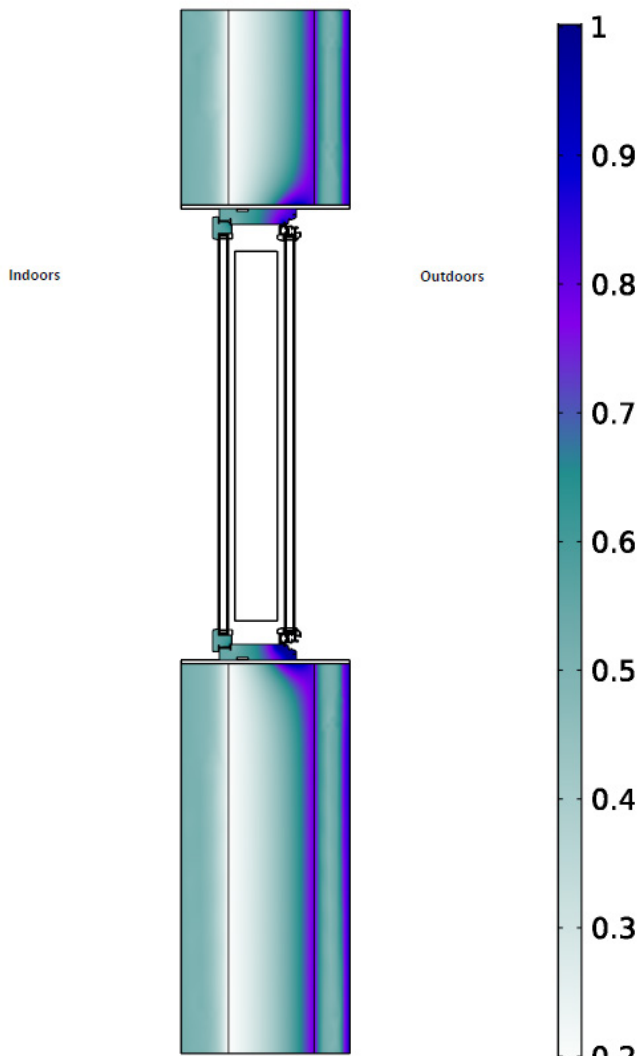
Kuva 124. Skaala Alfa 40N ikkuna cLean-järjestelmällä. (Backman A. 2017)

Kuvassa 124 esitetään lämpötilagradientti ikkunan sijaitessa seinärakenteen ulkopinnassa. Sisälämpötila on $+21^{\circ}\text{C}$ ja ulkolämpötila -13°C . Oikealla sijaitseva liukuva väriasteikko esittää lämpötilaa celsiusasteina. Sisätilan lämpö selvästi dominoi seinärakenteen simulointituloksia. Betonikuoren lämpötila on tasainen. (Backman A. 2017)



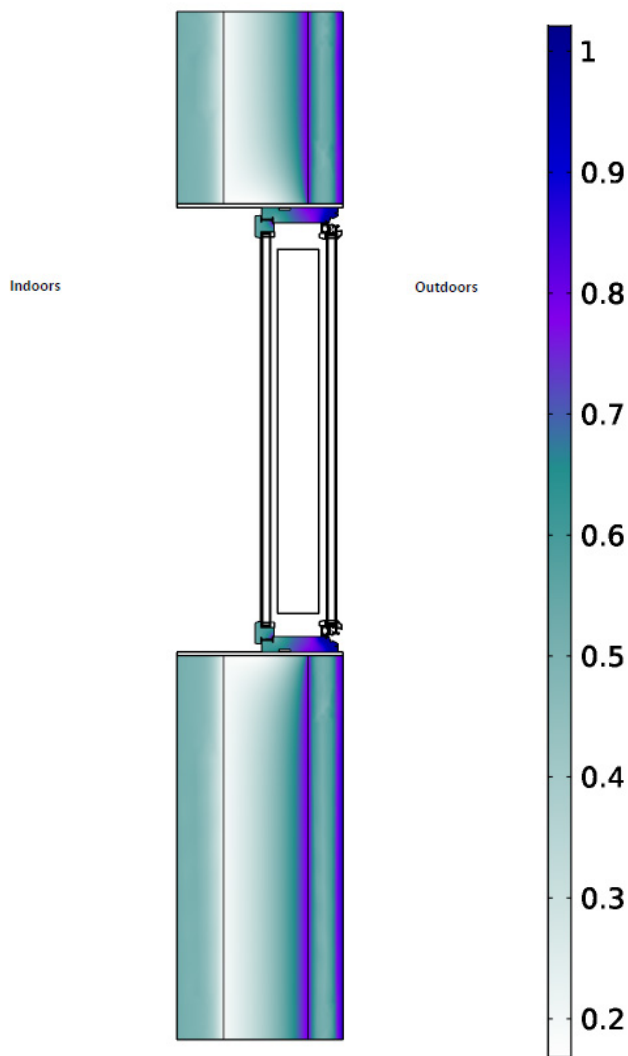
Kuva 125. Skaala Alfa 40N ikkuna ilman cLean-järjestelmää. (Backman A. 2017)

Kuvassa 125 esitetään suhteellisen kosteuden gradientti ikkunan sijaitessa seinärakenteen sisäpinnassa. Sisälämpötila on $+21^{\circ}\text{C}$ ja ulkolämpötila -13°C . Oikealla sijaitseva liukuva väriasteikko esittää suhteellista kosteutta prosentuaalisesti, jossa lukuarvo 1 = 100%. Kosteuden tasot ovat suurimpia lähimpänä materiaalien pintoja. Kosteuden pitoisuus on haitallisen suuri alemman ikkunapuitteen kohdalla (musta ympyrä). (Backman A. 2017)



Kuva 126. Skaala Alfa 40N ikkuna cLean-järjestelmällä. (Backman A. 2017)

Kuvassa 126 esitetään suhteellisen kosteuden gradientti ikkunan sijaitessa seinärakenteen keskellä. Sisälämpötila on $+21^{\circ}\text{C}$ ja ulkolämpötila -13°C . Oikealla sijaitseva liukuva väriasteikko esittää suhteellista kosteutta prosentuaalisesti, jossa lukuarvo 1 = 100%. Kosteuden tasot ovat suurimpia lähimpänä materiaalien pintoja. Kosteuden pitoisuus on suuri alemman ikkunapuitteen ulkopuolella. (Backman A. 2017)

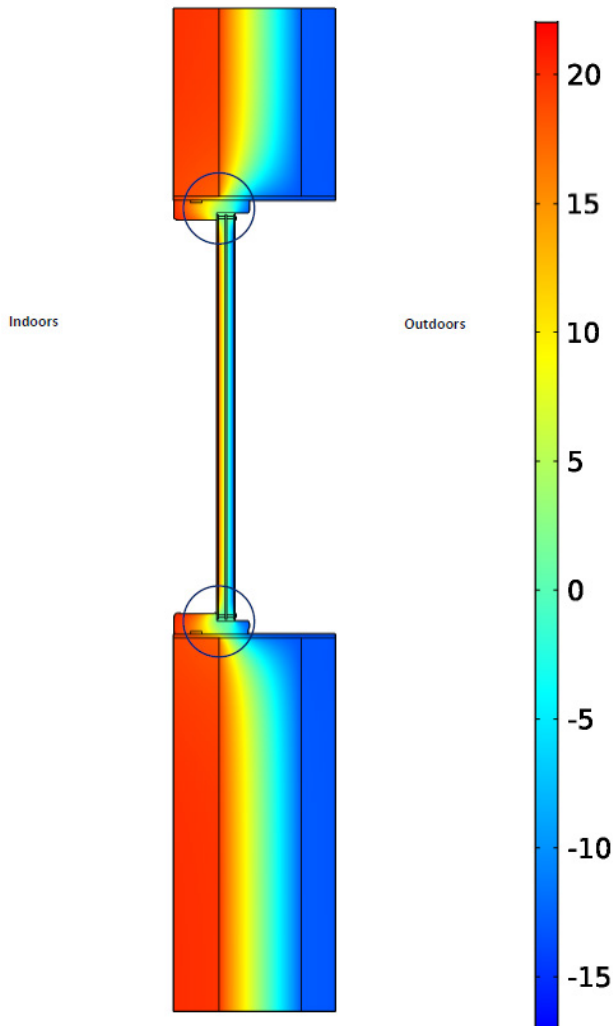


Kuva 127. Skaala Alfa 40N ikkuna ilman cLean-järjestelmää. (Backman A. 2017)

Kuvassa 127 esitetään suhteellisen kosteuden gradientti ikkunan sijaitessa seinärakenteen ulkopinnassa. Sisälämpötila on $+21^{\circ}\text{C}$ ja ulkolämpötila -13°C . Oikealla sijaitseva liukuva väriasteikko esittää suhteellista kosteutta prosentuaalisesti, jossa lukuarvo 1 = 100%. Kosteuden tasot ovat suurimpia lähimpänä materiaalien pintoja, mutta tasot eivät ole suuria. Kosteuden pitoisuus on suuri vain alemman ikkunapuitteen ulkopuolella. Kosteusjakauma seinärakenteessa on hyvin tasainen. (Backman A. 2017)

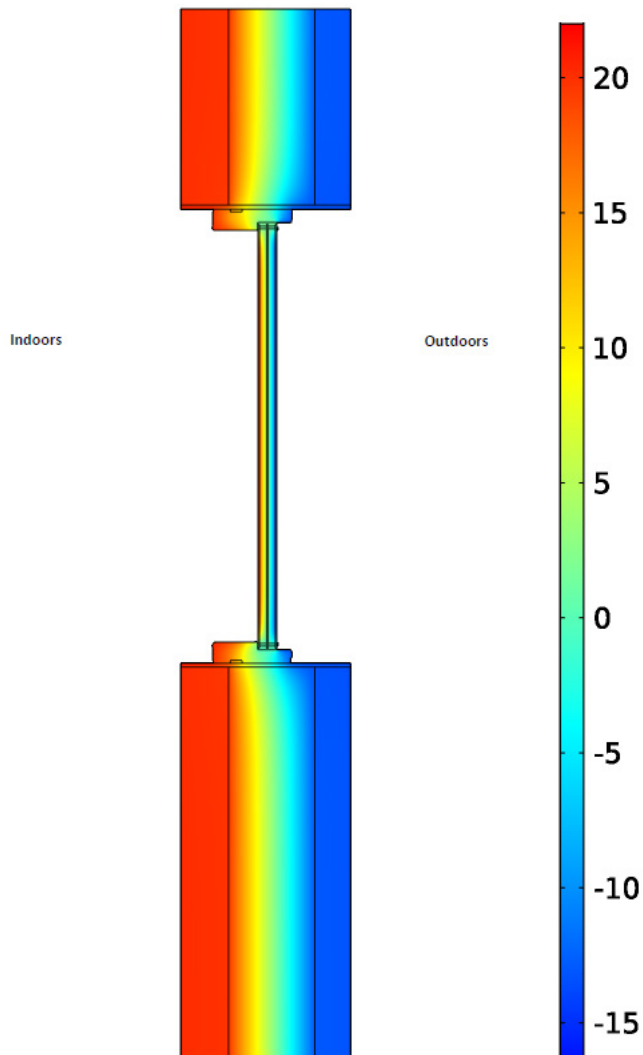
Skaala ULEK ikkuna

Lämpötila



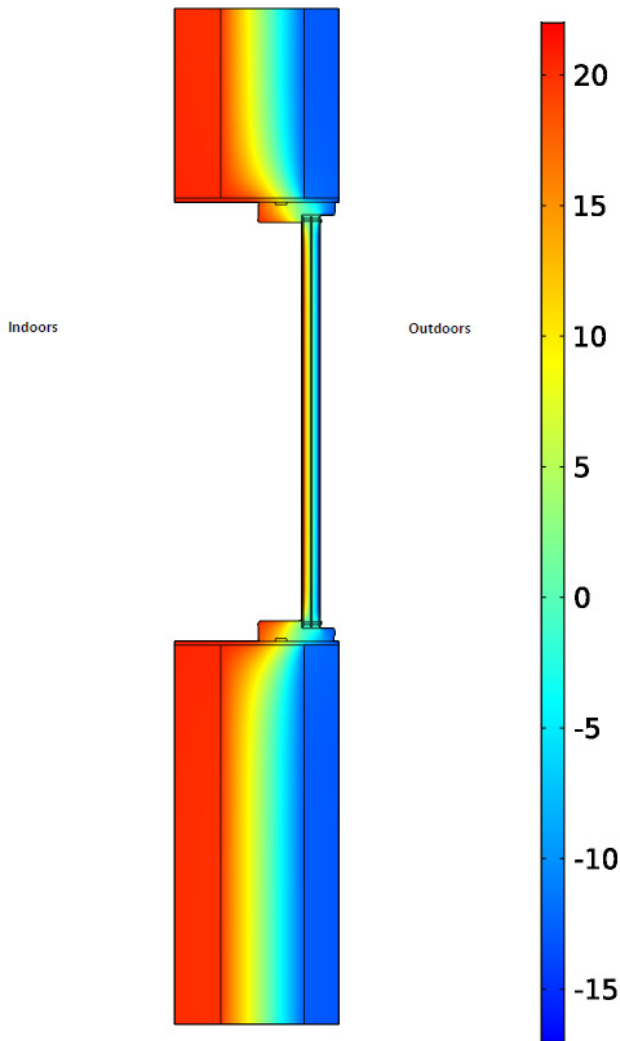
Kuva 128. Skaala Alfa 40N ikkuna cLean-järjestelmällä. (Backman A. 2017)

Kuvassa 128 esitetään lämpötilagradientti ikkunan sijaitessa seinärakenteen sisäpinnassa. Sisälämpötila on $+21^{\circ}\text{C}$ ja ulkolämpötila -13°C . Oikealla sijaitseva liukuva väriasteikko esittää lämpötilaa celsiusasteina. Lämpötila laskee lähelle 0°C ikkunarakenteen nurkkakohdissa (mustat ympyrät). Lämpötilan muutos on hyvin jyrkkä lasikerrosten välillä. (Backman A. 2017)



Kuva 129. Skaala ULEK ikkuna. (Backman A. 2017)

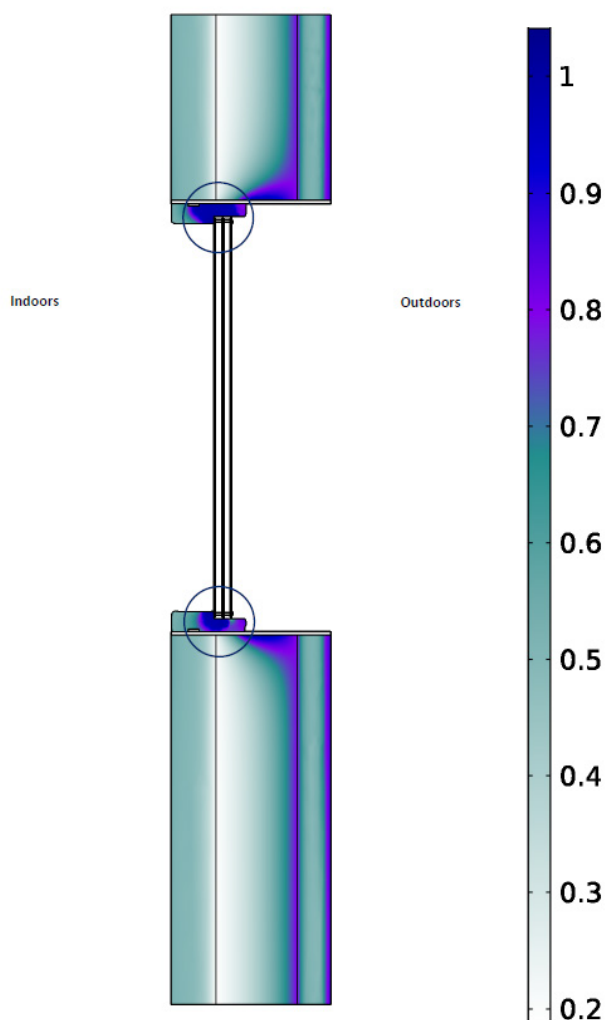
Kuvassa 129 esitetään lämpötilagradientti ikkunan sijaitessa seinärakenteen keskellä. Sisälämpötila on +21°C ja ulkolämpötila -13°C. Oikealla sijaitseva liukuva väriasteikko esittää lämpötilaa celsiusasteina. Lämpötila laskee lähelle 0 °C ikkunarakenteen sisäpuolen nurkkakohdissa. Lämpötilan muutos on hyvin jyrkkä lasikerrosten välillä. (Backman A. 2017)



Kuva 130. Skaala ULEK ikkuna. (Backman A. 2017)

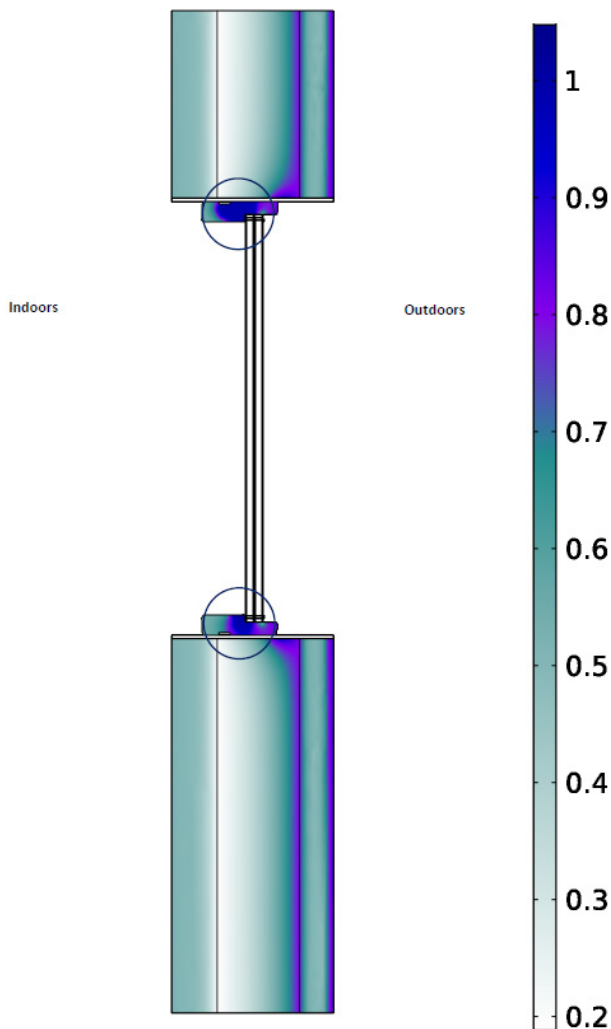
Kuvassa 130 esitetään lämpötilagradientti ikkunan sijaitessa seinärakenteen ulkopinnassa. Sisälämpötila on $+21^{\circ}\text{C}$ ja ulkolämpötila -13°C . Oikealla sijaitseva liukuva väriasteikko esittää lämpötilaa celsiusasteina. Lämpötila laskee lähelle 0°C ikkunarakenteen sisäpuolen nurkkakohdissa, mutta ei yhtä paljon kuin ikkunan sijaitessa seinärakenteen sisäpinnassa. Lämpötilan muutos on hyvin jyrkkä lasikerrosten välillä. (Backman A. 2017)

Suhteellinen kosteus



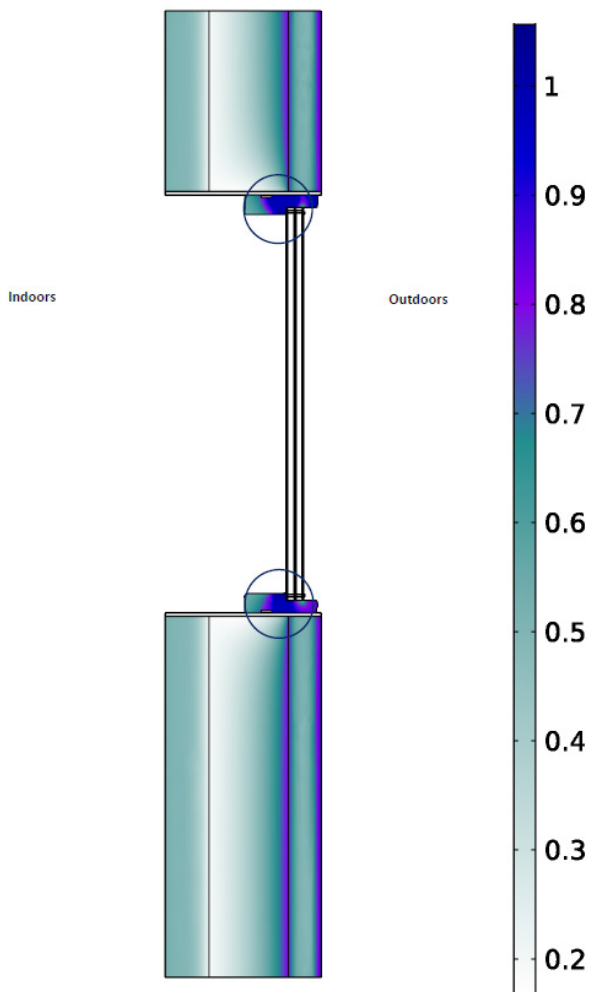
Kuva 131. Skaala ULEK ikkuna. (Backman A. 2017)

Kuvassa 131 esitetään suhteellisen kosteuden gradientti ikkunan sijaitessa seinärakenteen sisäpinnassa. Sisälämpötila on $+21^{\circ}\text{C}$ ja ulkolämpötila -13°C . Oikealla sijaitseva liukuva väriasteikko esittää suhteellista kosteutta prosentuaalisesti, jossa lukuarvo 1 = 100%. Kosteuden tasot ovat suurimpia lähimpänä materiaalien pintoja. Kosteuden pitoisuus on haitallisen suurta ikkunapuitteiden kohdalla (mustat ympyrät). (Backman A. 2017)



Kuva 132. Skaala ULEK ikkuna. (Backman A. 2017)

Kuvassa 132 esitetään suhteellisen kosteuden gradientti ikkunan sijaitessa seinärakenteen keskellä. Sisälämpötila on $+21^{\circ}\text{C}$ ja ulkolämpötila -13°C . Oikealla sijaitseva liukuva väriasteikko esittää suhteellista kosteutta prosentuaalisesti, jossa lukuarvo 1 = 100%. Kosteuden tasot ovat suurimpia lähimpänä materiaalien pintoja. Kosteuden pitoisuus on haitallisen suurta ikkunapuitteiden kohdalla (mustat ympyrät). (Backman A. 2017)



Kuva 133. Skaala ULEK ikkuna. (Backman A. 2017)

Kuvassa 133 esitetään suhteellisen kosteuden gradientti ikkunan sijaitessa seinärakenteen ulkopinnassa. Sisälämpötila on $+21^{\circ}\text{C}$ ja ulkolämpötila -13°C . Oikealla sijaitseva liukuva väriasteikko esittää suhteellista kosteutta prosentuaalisesti, jossa lukuarvo 1 = 100%. Kosteuden tasot ovat suurimpia lähimpänä materiaalien pintoja. Kosteuden pitoisuus on hyvin suurta ikkunapuitteiden kohdalla (mustat ympyrät). Kosteuden tasot seinärakenteessa ovat siedettävällä tasolla. (Backman A. 2017)

JOHTOPÄÄTÖKSET

Tehty tutkimus osoittaa kuinka tärkeää on simuloida rakenteita, mikäli halutaan tarkkaa tietoa siitä mitä tapahtuu materiaalien sisällä ja rajapinnoissa. Kyseisessä simulointityössä mielenkiintoisimmat tarkastelun alueet olivat ikkunoiden karmirakenteet sekä materiaalien rajapinnat. (Backman A. 2017)

Simulointitulosten voidaan todeta, että ikkuna paras syvyysuuntainen sijoituspaikka on sandwich-rakenteen keskellä, kuten betoniteollisuus sen ohjeistaa. Ikkuna tulee lämpöteknisen toiminnan vuoksi sijoittaa sandwich-rakenteen eristetilan kohdalle (keskelle), jotta rakenteeseen muodostuu yhtenäinen lämmöneristekerros.

Tämän simulointitutkimuksen tulosten avulla voidaan osoittaa alueet, jotka ovat kriittisimpiä ikkunallisen seinärakenteen oikeaoppiselle toiminnalle. Laboratoriotestaus on tarpeen, jotta tehtyjä simulointituloksia voidaan pitää luotettavina, koska simulointituloksissa muutamassa kohdassa kosteuden tasot nousivat hyvin korkealle. Tulosten perusteella voidaan todeta, että ikkunan syvyysuuntaisella sijoittamisella on suuri vaikutus rakenteen toimintaan. Myös käytetyllä ikkunatyypillä on vaikutusta lämmön ja kosteuden käyttäytymiseen. 3K-eristyslaselementit vaikuttivat liian ohuilta rakenteilta tämän tyyppiseen seinärakenteeseen, mutta kyseisen ikkunan syvyysuuntaisella sijoittamisella pystyttiin vaikuttamaan kosteuden tasoihin ikkunan karmirakenteessa. Paksumpi 2K+2K eristyslaselementti ei saavuttanut niin korkeita suhteellisen kosteuden tasoja rakenteen sisäpuolella, mutta rakenteen ulkopuolella saavutetut kosteuden tasot olivat korkeita. (Backman A. 2017)

Tehtyjen simulointitulosten varmentamiseksi on tarpeen tehdä lisää simuloiteja, mielellään 3D-ulottuvuudessa. Lisätutkimuksissa tulisi 3D-ulottuvuuden lisäksi selvittää ikkunaan sisällytetyn ilmanvaihtojärjestelmän lämmöntuotto ja sekä järjestelmän tuottaman ilmavirtausten vaikutukset. Tässä simuloinnissa ilmanvaihtojärjestelmä cLean käsiteltiin pelkästään ikkunaan sijoitettuna metallisena rakenteena. Myöskään ikkunalaseissa olevia selektiivisiä pinnoitteita sekä puun pinnoitusmateriaaleja ei ollut simuloitu tässä työssä, näillä ominaisuuksilla on kuitenkin suuri vaikutus rakenteiden oikeaoppiseen sijaintiin. (Backman A. 2017)

LÄHTEET

Skaala 2017a. Ilmanvaihtoikkunat. Web-sivu. Osoitteessa <http://www.skaala.com/ilmanvaihtoikkunat.html>

Skaala 2017b. Ikkunat. Web-sivu. Osoitteessa: <http://www.skaala.com/ikkunat.html>

Backman Antti 2017. Ikkunasimulointiraportti. Sisäinen dokumentti.

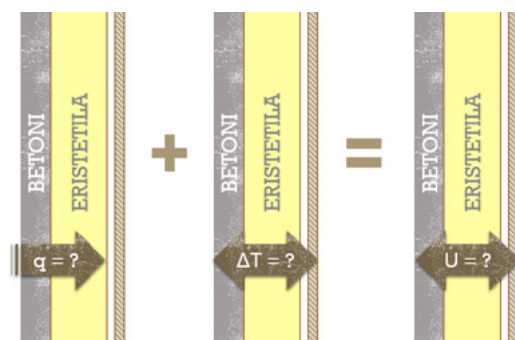
Rakenteen tehollisen eristävyysmittaus

TAUSTA

U-arvon tehollisella mittauksella pyrittiin selvittämään itse tehollisen eristävyysmittauksen lisäksi olosuhteiden, erityisesti kosteuden ja lämpötilan vaikutusta eristävyysmittaukseen. Laskennallisesta näkökulmasta U-arvo on rakennesuunnitelmien pohjalta laskettu lämmönläpäisykerroin, joka pysyy vakiona koko rakennuksen elinkaaren ajan. Todellisuudessa rakenteen lämmönläpäisykyky muuttuu ympäristön olosuhteiden myötä jatkuvasti. Se, mitä laskenta ei myöskään huomioi, ovat ajan myötä tapahtuvat muutokset materiaalien ominaisuuksissa sekä poikkeamat rakennesuunnitelmien ja toteutuneiden rakenteiden välillä.

Rakenteiden lämmönjohtavuuden muutos kosteuden vaikutuksesta riippuu materiaalin hygroskooppisuudesta, eli materiaalin kyvystä sitoa ja luovuttaa ilman kosteutta. Materiaaliin sitoutuva kosteus kasvattaa materiaalin lämmönjohtavuutta, ja muutoksen suuruus on suoraan verrannollinen materiaalin hygroskooppisuuteen. Kiinteän olomuodon saavuttava kosteus johtaa lämpöä nestemäistä olomuotoa paremmin, joten rakenteen kylmimmissä kohdissa hygroskooppisen kosteuden merkitys kasvaa. (Tampereen teknillinen yliopisto, 2005)

Lämpötilan vaikutus materiaalin lämmönjohtavuuteen korostuu rakenteen uloimmissa osissa. Materiaalin lämpötilan noustessa sen lämmönjohtavuus kasvaa. Lämpötila vaikuttaa materiaalin kiteiden värähtelyenergiaan, jolla on suuri vaikutus lämmön johtumisessa materiaalissa. (Laine, 2010)



Kuva 134. Rakenteen tehollisen eristävyysmittausperiaate

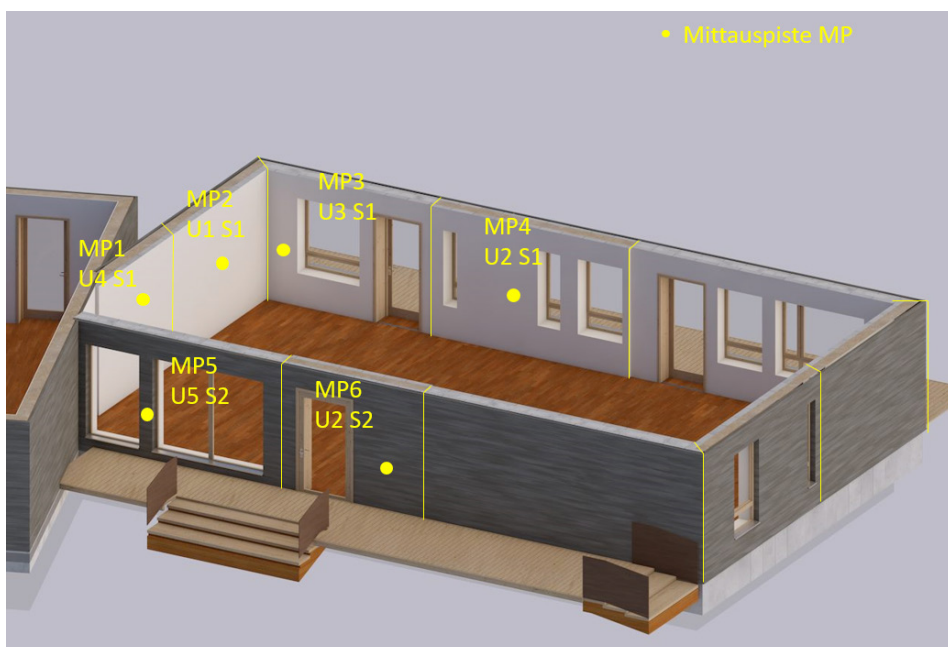
TUTKIMUSMENETELMÄ JA -JÄRJESTELYT

Rakenteen tehollinen eristävyys selvitettiin kenttäolosuhteissa selvittämällä rakenteen ulko- ja sisäpinnan lämpötilaero sekä lämpövuon määrä. Mitattuja suureita käyttäen saatiin selville rakenteen lämmönvastus ja -johtavuus. Mittausmenetelmä on kokeellinen, eikä laajempaa kokemuspohjaa laitteen käytöstä rakennusfysikaalisissa sovelluksissa ole saatavilla.

Mittauksissa käytettiin laitetta HukseFlux TRYSO₃. U-arvomittaus suoritetaan asettamalla valitun rakenteen sisäpuolelle lämpövuon- ja lämpötila-anturi, sekä termoparin toinen lämpötila-anturi seinärakenteen vastakkaiselle puolelle. Laitteen kompakti koko mahdollistaa laitteen käytön lähes kaikkialla, ainoana rajoitteena ollessa verkkovirran tarve. Laitteen käyttöolosuhteet ovat hyvin laajat: antureiden toiminta-alue on -30 Co - +70 Co, ja keskusyksiköllä -20 Co - +50 Co. Laite on varustettu myös valosäteilyanturilla. Laite on yhdistetty modeemiin, jonka avulla mitattavaa dataa voidaan seurata reaaliaikaisesti verkkosivulta. Reaaliaikaisen seurannan lisäksi saatavilla on myös laajemman ajanjakson tarkastelu, josta tallennettua dataa voi hakea valitsemillaan ajankohdilla ja parametreilla graafisena ja taulukkomuotoisena tulkintana.

Anturien herkkyiden vuoksi mittauskohteen olosuhteiden hallinta on ensiarvoisen tärkeää tuloksien luotettavuuden varmistamiseksi. Kaikkia olosuhteita ei kuitenkaan voida kontrolloida, jota kompensoidaan laskennallisilla virheenkorjauksilla. Kaikkia häiriötekijöitä ei voida kuitenkaan laskennallisesti kompensoida, jonka vuoksi stabiilit, häiriöttömät olosuhteet ovat avain tarkimpiin mittaustuloksiin. Selkeästi vaikuttavia, mittaustulokset mitätöiviä häiriötekijöitä ovat muun muassa laatoitetut ja voimakkaasti lämpösäteilyä heijastavat pinnat, karkeat pinnat, lämmitys- tai jäähdytyslaitteiston läheisyys, voimakkaat valonlähteet, ihmisten läsnäolo mittauspisteiden läheisyydessä sekä vetoisuus. (ISO, 2014)

Mittaustarkkuus kohteessa tapahtuvissa mittauksissa on valmistajan mukaan 20%, kun taas laboratorio-olosuhteissa puolestaan saavutetaan 5% tarkkuus samalla laitteistolla. Epävarmuutta kohteissa tapahtuviin mittauksiin tuovat muuttuvat, hallitsemattomat olosuhteet. (HukseFlux, 2016)



Kuva 135. Tehollisen eristävyden mittauspisteet

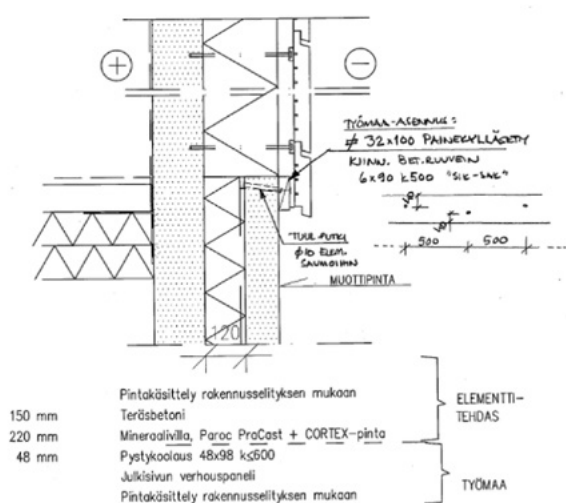
Tutkimuskohteena on koulutuskuntayhtymän koulutus- ja työhyvinvointikeskus Wellevi, joka sijaitsee Levisalmella, Kittilässä. Rakenteen suhteellisen kosteuden mittaaminen ei vaatinut erillisiä järjestelyjä, vaan data pystyttiin keräämään rakennusvaiheessa asennetuista antureista. Tarkempi kuvaus mittausjärjestelyistä löytyy artikkelista mittausjärjestelmän esittely. Seinärakenteen eristävyden mittauspistettä lähimpänä sijaitsevien, eri syvyyksille sijoitettujen kosteus- ja lämpötila-antureiden mittaamista arvoista laskettiin suhteellisen kosteuden tuntikohtainen keskiarvo, joka esitetään alla olevissa taulukoissa U-arvon rinnalla.

TULOKSET

Tulokset on esitetty rakenteittain, ja mittausjaksolla mitatut U-, RH- ja lämpötila-arvot on esitetty taulukoissa jokaisen mitatun tunnin keskiarvona. Alimmalla rivillä on esitetty koko mittausjakson mittaustulosten keskiarvot.

Suhteellisen kosteuden ja lämpötilan arvot ovat rakenteen yhdessä pisteessä eri syvyyksillä sijaitsevien anturien keskiarvoja, jolloin arvot kuvaavat parhaiten koko rakenteen olosuhteita, eikä pelkästään yksittäisen materiaalikerroksen. Tarkastelu suoritettiin joka rakenteelle myös kerroksittain, mutta yksittäisen rakennekerroksen olosuhteiden ei havaittu mittausjakson aikana vaikuttavan selkeästi muiden kerrosten olosuhteita enempää.

PAROC Cortex One, US 1.1

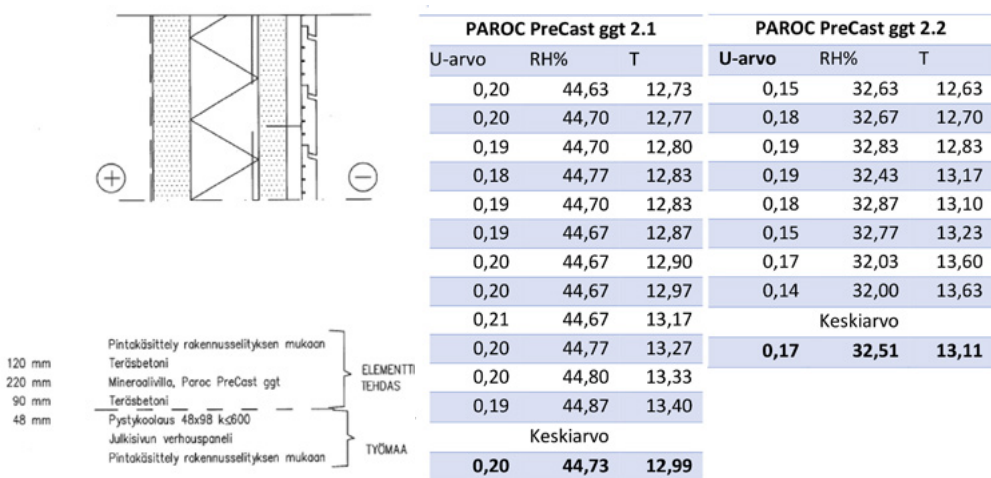


PAROC Cortex One		
U-arvo	RH%	T
0,16	35,47	13,70
0,16	35,43	13,67
0,14	35,47	13,67
0,15	35,47	13,63
0,16	35,47	13,63
0,17	35,50	13,63
0,17	35,53	13,63
0,17	35,53	13,67
0,17	35,53	13,70
0,18	35,53	13,70
0,18	35,57	13,70
0,18	35,57	13,73
0,17	35,63	13,77
0,15	35,60	13,80
Keskiarvot		
0,16	35,52	13,69

Kuva 136. Ulkoseinätyyppi 1:n poikkileikkaus ja rakenne

Rakenteen mitatun U-arvon keskiarvo oli mittausjaksolla $0,16 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$, laskennallisen arvon ollessa $0,144 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$. Valmistajan/suunnittelijan ilmoittama U-arvo on $0,17 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$. Rakenteessa vallitsevan suhteellisen kosteuden ja lämmönläpäisykertoimen välillä on havaittavissa korrelaatio, mutta lämpötilan ei havaittu vaikuttavan lämpötekniseen toimivuuteen mittausjakson aikana.

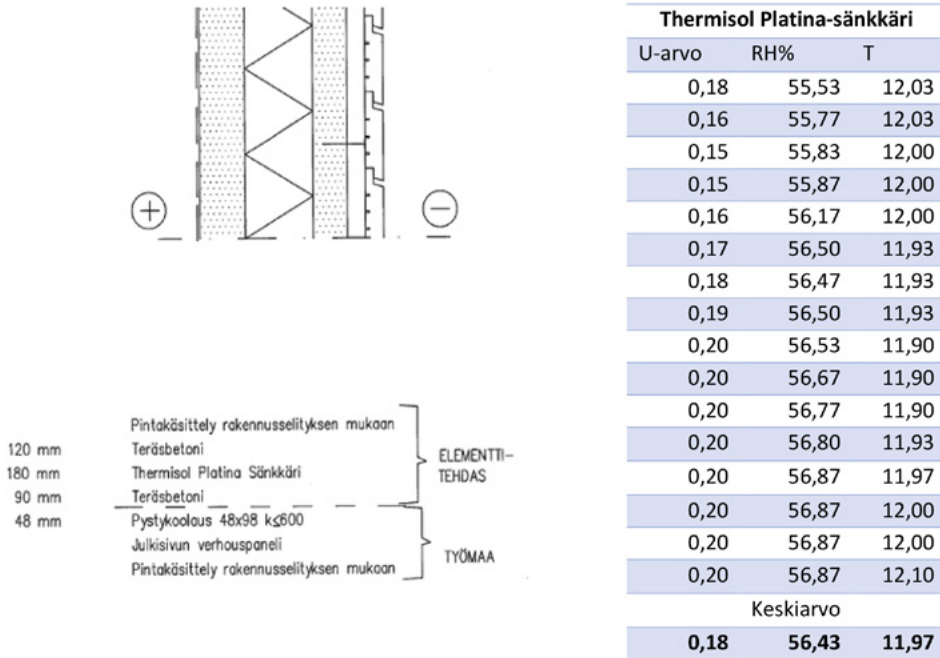
PAROC PreCast ggt, US 2.1 & 2.2



Kuva 137. Ulkoseinätyyppi 2:n poikkileikkaus ja rakenne

Kyseisen elementtityypin toimintaa oli mahdollista mitata kahdesta eri elementistä mittausten suoritusajankohtana. Mitattu lämmönläpäisykerroin oli elementissä 2.1 $0,2 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$, ja elementissä 2.2 $0,17 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$. Laskennallinen lämmönläpäisykerroin on $0,144 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$. Valmistajan/suunnittelijan ilmoittama U-arvo on $0,17 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$. Tuloksista voidaan päätellä, että rakenteen lämmönläpäisykerroin ja suhteellinen kosteus olivat suoraan verrannollisia mittaussarjojen aikana. Lämmönläpäisykerroin ja lämpöolosuhteiden välillä ei havaittu korrelaatiota tarkastelujaksolla.

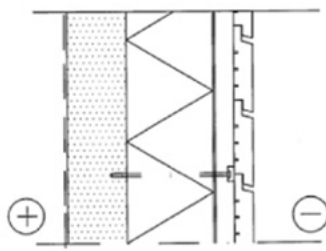
Thermisol Platina Sänkkäri, US 3.1



Kuva 138. Ulkoseinätyyppi 3:n poikkileikkaus ja rakenne

Rakenteen mitatun U-arvon keskiarvo oli mittausjaksolla $0,18 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$, laskennallisen U-arvon ollessa $0,163 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$. Valmistajan/suunnittelijan ilmoittama U-arvo on $0,17 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$. Rakenteen lämmönläpäisykertoimen ja rakenteessa vallitsevan suhteellisen kosteuden välillä oli mittausajanjaksolla havaittavissa yhteys. Rakenteen lämpötilan ja U-arvon välillä ei todettu korrelaatiota.

PAROC FAL 1, US 4.1



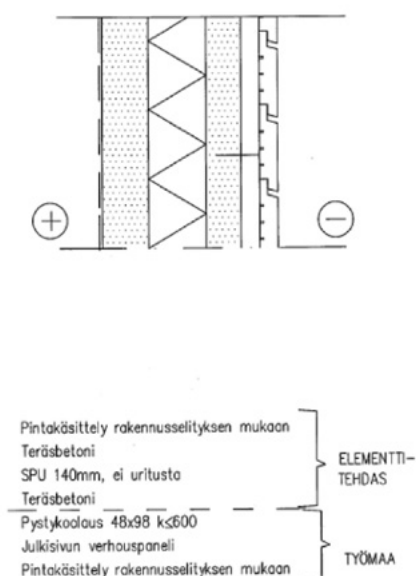
Pintakäsittely rakennusseityksen mukaan	}	ELEMENTTI- TEHDAS
Teräsbetoni		
Mineraalivilla, Paroc FAL1, kiinnitys liimaloastilla	}	TYÖMAA
Ohutrappaus		
Pystykoolaus 48x98 ks600		
Julkisivun verhouspaneli		
Pintakäsittely rakennusseityksen mukaan		

PAROC FAL 1		
U-arvo	RH%	T
0,18	32,10	12,17
0,17	32,07	12,13
0,15	32,07	12,10
0,15	32,10	12,10
0,16	32,17	12,10
0,17	32,20	12,13
0,17	32,20	12,13
0,17	32,20	12,13
0,17	32,23	12,13
0,18	32,33	12,17
0,18	32,40	12,27
0,18	32,40	12,27
0,17	32,40	12,30
0,16	32,47	12,33
Keskiarvo		
0,17	32,24	12,18

Kuva 139. Ulkoseinätyyppi 4:n poikkileikkaus ja rakenne

Rakenteen mitatun U-arvon keskiarvo oli mittausjaksolla $0,17 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$, laskennallisen U-arvon ollessa $0,173 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$. Valmistajan/suunnittelijan ilmoittama U-arvo on $0,17 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$. Rakenteen lämmönläpäisykertoimen ja rakenteessa vallitsevan suhteellisen kosteuden välillä oli mittausajanjaksolla havaittavissa yhteys. Myös rakenteen lämpötilan ja lämmönläpäisykertoimen välillä on havaittavissa korrelaatio.

Kingspan Therma TW58, US 5.2



Kingspan Therma TW58		
U-arvo	RH%	T
0,18	38,27	13,10
0,17	38,27	13,10
0,17	38,17	13,07
0,17	38,13	12,97
0,16	38,03	12,83
0,16	37,87	12,70
0,17	37,87	12,43
0,17	37,73	12,23
0,17	37,37	12,03
0,17	37,20	11,80
Keskiarvo		
0,17	37,91	12,63

Kuva 140. Ulkoseinätyyppi 5:n poikkileikkaus ja rakenne

Rakenteen mitatun U-arvon keskiarvo oli mittausjaksolla $0,17 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$, laskennallisen U-arvon ollessa $0,146 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$. Valmistajan/suunnittelijan ilmoittama U-arvo on $0,17 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$. Rakenteen lämmönläpäisykertoimen ja rakenteessa vallitsevan suhteellisen kosteuden välillä ei mittausajanjaksolla havaittu korrelaatiota. Myöskään rakenteen lämpötilan ei havaittu vaikuttavan selkeästi lämmönläpäisykertoiin. Elementin mittauspiste ei mittausmenetelmän kannalta ollut ideaali runsaiden ikkunapintojen ja kapeiden sandwich-osuuksien vuoksi, jolloin mittausvirhe voi poiketa valmistajan ilmoittamasta arvosta.

JOHTOPÄÄTÖKSET

Lähes kaikissa mitattavissa elementtirakenteissa oli havaittavissa jonkin asteinen korrelaatio kosteuden ja lämmönläpäisykertoimen välillä. Lämpötilan ja lämmönläpäisykertoimen löyhä korrelaatio oli havaittavissa ainoastaan yhdessä elementtirakenteessa. Rakenteiden mitattu lämmönläpäisykyky vastasi laskennallista ja suunnitteluarvoa kun mittauksen virhemarginaali otetaan huomioon. Ero laskennallisen ja

valmistajan/suunnittelijan ilmoittaman U-arvon välillä selittyy eri laskentamenetelmien ja -arvojen käytöllä. Lyhyehkön mittausajanjakson aikana olosuhdemuutokset jäivät maltillisiksi, minkä vuoksi on vaikeaa määrittää tarkkaa suhteellisen kosteuden ja lämpötilan vaikutuksen määrää rakenteen lämmönläpäisykertoimeen.

Mittausmenetelmä osoittautui käyttökelpoiseksi rakenteiden lämpötekni- sen toimivuuden arvioinnissa ja soveltuu hyvin kokonsa puolesta kenttätestaukseen, kunhan häiriötekijät poistetaan tai otetaan huomioon laskennallisesti. Etenkin keinotekoisesti luoduissa, stabiileissa olosuhteissa laitteella pystyttiin mittaamaan hyvinkin tarkasti rakenteen lämpötekni- sta toimintaa.

Mittaustilanteissa ongelmia havaittiin laatoitetuilla alueilla, lämpösäteilyä voimakkaasti heijastavilla pinnoilla, lämmitys- ja jäähdytyskomponenttien läheisyydessä, alueilla joihin kohdistuu vetoa, kylmäsiltojen kohdalla, karkeilla pinnoilla sekä valonlähteiden läheisyydessä. Häiriötekijöiden poistaminen ja/tai huomioon ottaminen on edellytys luotettaville mittaustuloksille.

Menetelmä on sovellettavissa materiaalien lämpötekni- sestä toimivuudesta aina maaperän lämpövuomittauksiin. Laitteiston inhimillinen koko mahdollistaa mittaukset halutussa sijainnissa, eikä mitattavaa rakennetta tai materiaalia näin ollen tarvitse saada laboratorioon.

LÄHTEET

1. Hukseflux. HFP01 & HFP03 Heat Flux Plate / Heat FLux Sensor.
2. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona.
3. Katariina Laine, Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet.
4. ISO. ISO 9869-1 Thermal insulation - Building elements - In situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance, Part 1: Heat flow meter method.

Rakenteen kosteuden mittaamisen porareikämenetelmällä

JOHDANTO

Porareikämittauksen tavoitteena oli varmentaa Levisalmella sijaitsevan kohteen betonielementtirakenteisten ulkoseinien sisään asennettujen lämpötilaa ja suhteellista kosteutta mittaavien antureiden antamat tulokset toista mittaamenetelmää hyödyntäen. Toimenpiteen ansiosta rakenteen sisäisten anturien arvoja voidaan pitää luotettavina, sekä osittain myös täydentää mahdollisesti puutteellisia tai puuttuvia mittaus-tuloksia. Porareikämittauksella pyrittiin selvittämään kosteus rakenteen eri syvyyksillä.

Tutkimuskohteena on koulutuskuntayhtymän koulutus- ja työhyvinvointikeskus Wellevi, joka sijaitsee Levisalmella, Kittilässä. Kohteen huoneisto-osa on varustettu rakennusvaiheessa lämpötila- ja kosteusantureilla, ja kosteusteknistä toimivuutta on seurattu pidemmällä ajanjaksolla.



Kuva 141. Porareikämittausputket Wellevin koetalolla

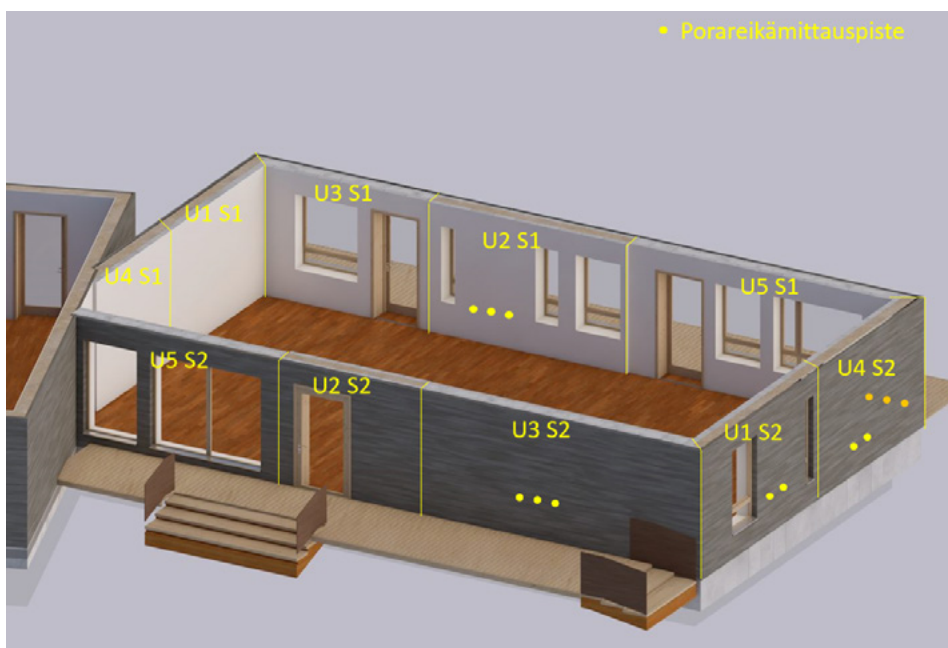
TUTKIMUSMENETELMÄ

Porareikämittaus prosessina on kaksivaiheinen, jossa ensimmäinen osuus on puhtaasti valmistelevaa työtä, ja jälkimmäinen osuus täysin pelkkää mittaamista. Ennen näitä vaiheita työn suoritukseen liittyvät tekijät, kuten mittaussyvyys ja mittapistee tulee olla määriteltynä ja perusteltuna. Tässä tapauksessa mittauspisteiden syvyyksiksi määritettiin samat syvyydet kuin rakenteeseen asennetuilla antureilla, jotta tulokset ovat vertailukelpoiset. Kaikki porareiät tehtiin samalle korkeudelle, mahdollisimman homogeeniseen kohtaan rakennetta jossa häiriötekijät, kuten ikkunat ja läpiviennit ovat mahdollisimman etäällä.

Valmisteleavassa osuudessa rakennuksen julkisivuverhoukseen porataan reikä, jonka jälkeen varsinaiseen rakenteeseen porataan läpimitaltaan 16 millimetrin reikä. Porrattu reikä puhdistetaan imurilla ylimääräisestä pölystä ja materiaalista. Julkisivuverhouksen tuomien haasteiden vuoksi imuri piti puhdistamisen onnistumisen takaamiseksi varustaa ohuella jatkopillillä, jotta kaikki mittausta häiritsevä irtoaines saatiin porareiästä pois. Puhdistettuun reikään asetetaan reiän suuruinen, läpimitaltaan 16 millimetrin sähköasennusputki, joka ulottuu reiän pohjaan saakka. Putki tiivistetään asennuksen jälkeen. Valmisteluvaiheen jälkeen mittauspisteiden olosuhteen täytyy antaa tasoittua vähintään 3 vuorokautta, jotta porareiän kosteus- ja lämpöolosuhteet tasaantuvat normaalia toimintaa vastaavalle tasolle (RT 14-10984).

Varsinainen mittaosio suoritetaan tasaantumisaajan, eli aikaisintaan 3 vuorokauden päästä valmistelevista toimenpiteistä. Tässä tapauksessa mittauspisteet saivat tasoittua 12 vuorokautta, mikä eliminoi porauksen mittatarkkuutta laskevat vaikutukset mittaputkessa ja porareiässä täysin. Ennen mittauksen aloitusta kirjataan ympäröivät lämpö- ja kosteusolosuhteet. Varsinaisessa mittaussuoritteessa putken pään tiivistävä teippi puhkaistaan joko puukolla tai kosteusmittarin mittapäällä. Ensimmäisessä menetelmässä kosteusanturi tulee saada välittömästi puhkaisun jälkeen mittaputkeen. Kun mittapää on asetettu porareikään, tulee tiivisteteipin ja mittapään liitoskohta tiivistää. Tämän jälkeen mittapään annetaan tasoittua. Tasoittumisaika vaihtelee eri mittapäillä minuuteista tunteihin. Tässä tapauksessa tasaantumisaika oli keskimäärin 10 minuuttia. Tasaantumisaajan jälkeen havainnoidut suureet, lämpötila ja suhteellinen kosteus kirjataan tuloslomakkeelle. Porareikämittaus voidaan samasta reiästä uudestaan, tosin uusi mittausta vaatii tiivisteteipin vaihtamisen ehjään, ja noin vuorokauden tasaantumisaajan.

Mittauksissa käytettiin laitetta DOSER Messtechnik AD4A. Laitte on varustettu sekä pintakosteusanturilla, että lisävarusteena olevalla, puikkomallisella kosteus- ja lämpötila-anturilla. Laittevalmistajan ilmoittama mittaustarkkuus suhteelliselle kosteudelle mittauksen aikana vallinneissa olosuhteissa on $\pm 1,75\%$ ja lämpötilalle $\pm 0,5\%$. Porareikämittauksen tuloksia verrataan myöhemmin rakenteeseen asennettujen anturien arvoihin. Porareikämittaus toteutettiin RT 14-10984-ohjeen mukaisesti.



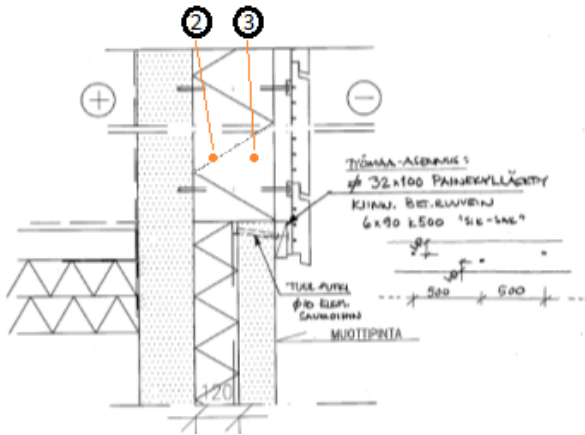
Kuva 142. Porareikämittauspisteet esitetty Wellevin 3D-mallissa

Porareikämittaukset suoritettiin 23.5.2017 klo 11-13 Wellevissä. Jokaista rakennetta tarkasteltiin 2 tai 3 eri syvyydeltä rakenteesta riippuen. Syvyydet vastaavat rakenteiden sisään asennettujen antureiden arvoja, ja ovat näin ollen vertailukelpoisia. Mittapisteiden korkeussuuntainen sijoittelu on identtinen jokaisessa mittapisteessä. Kuvassa 142 näkyvä sivuttaissuuntainen sijoittelu pyrittiin suorittamaan mahdollisimman häiriövapaisiin, puhtaisiin seinäpintoihin, jossa ikkunoiden, läpivientien tai vastaavien vaikutus olisi minimaalinen. Porareikämittauksen sekä jatkuvan mittauksen tulokset on esitetty alla rakennekohtaisesti taulukkomuodossa.

Mittausmenetelmän luonteen vuoksi lämpötilassa ja sen seurauksena myös suhteellisessa kosteudessa on eri mittausmenetelmien välillä eroavaisuuksia, jonka vuoksi tarkkuutta tarkastellaan absoluuttisen kosteuden pohjalta. Mittausmenetelmien välinen lämpötilaero selittyy mittaputken ja rakenteen eroavien lämmönjohtavuusominaisuuksilla. Absoluuttinen kosteussisältö pysyy kuitenkin mittaputkessa mittaus-
syvyyden kanssa yhdenmukaisena. Ilmoitetut syvyydet ovat syvyyksiä ulkoilman ulkopinnasta, ja mittapisteet on merkitty rakennekohtaisiin leikkauskuviin.

TULOKSET

PAROC Cortex One, US 1.2



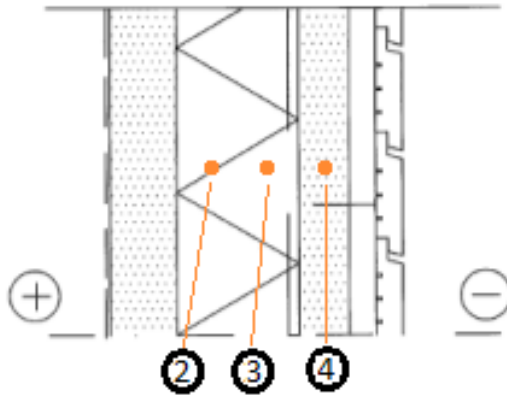
Kuva 143. Ulkoseinätyypin 1 rakenne ja mittapisteeet

Kuvassa 143 esitetyn elementtityypin kosteus mitattiin kahdelta eri syvyydeltä. Taulukossa 15 näkyvä rakenteen absoluuttisen kosteussisällön mitattu arvo oli lähes identtinen molemmilla mittausmenetelmillä.

Taulukko 15. Porareikämittausten ja rakenteeseen integroidun mittausjärjestelmän tulokset mittauspisteittäin

US1.2		Porareikä			Sisäänrakennettu		
Mittauspiste	Reiän syvyys	RH (%)	T (Co)	Abs. (g/m ³)	RH (%)	T (Co)	Abs. (g/m ³)
1							
2	255	35	14,5	4,4	26	18,9	4,3
3	135	38	11,5	3,9	29	16,5	4

PAROC PreCast ggt, US 2.1



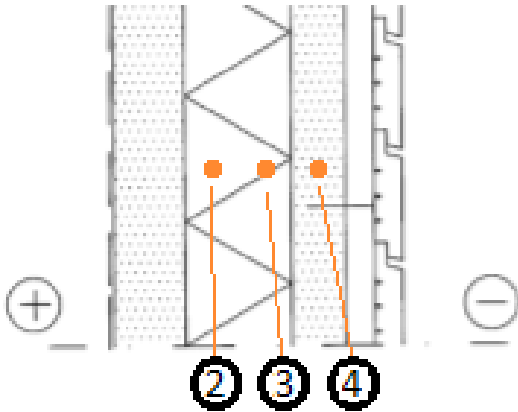
Kuva 144. Ulkoseinätyypin 2 rakenne ja mittapistet

Kuvassa 144 esitetyn elementtityypin kosteus mitattiin kolmelta eri syvyydeltä. Taulukossa 16 näkyvä rakenteen absoluuttisen kosteussisällön mitattu arvo oli lähes identtinen molemmilla mittausmenetelmillä.

Taulukko 16. Porareikämittausten ja rakenteeseen integroidun mittausjärjestelmän tulokset mittauspisteittäin

US2.1		Porareikä			Sisäänrakennettu		
Mittauspiste	Reiän syvyys	RH (%)	T (Co)	Abs. (g/m ³)	RH (%)	T (Co)	Abs. (g/m ³)
2	345	47	12,7	5,3	29	19,9	5,1
3	235	60	9,7	5,6	46	13,9	5,5
4	135	69	8,1	5,8	61	9,6	5,6

PAROC PreCast ggt, US 2.1



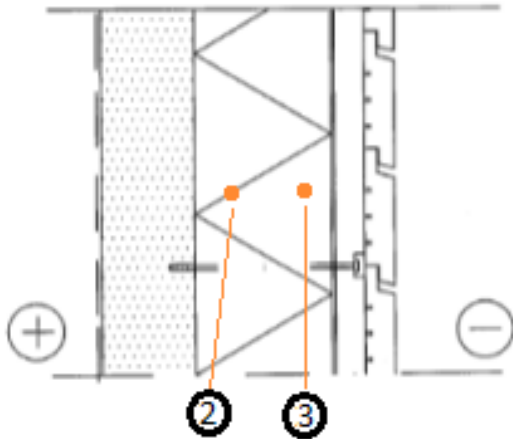
Kuva 145. Ulkoseinätyypin 3 rakenne ja mittapisteeet

Kuvassa 145 esitetyn elementtityypin kosteus mitattiin kolmelta eri syvyydeltä. Rakenteen sisäisten antureiden antama lämpö- ja kosteusteknisen datan on havaittu jo aiemmin olevan paikoin puutteellista, paikoin epäjohdonmukaista, jonka vuoksi sisäänrakennettujen anturien arvot on jätetty pois vertailusta. Porareikämittauksen tuloksien voidaan täydentää elementin kosteusteknistä dataa mittausajankohdan osalta. Taulukossa 17 näkyvät absoluuttisen kosteussisällön arvot olivat oletetun kaltaisia.

Taulukko 17. Porareikämittausten ja rakenteeseen integroidun mittausjärjestelmän tulokset mittauspisteittäin

US3.2		Porareikä			Sisäänrakennettu		
Mittauspiste	Reiän syvyys	RH (%)	T (Co)	Abs. (g/m ³)	RH (%)	T (Co)	Abs. (g/m ³)
2	315	69	12,5	7,6			
3	225	83	9,5	7,6			
4	135	87	6,6	6,6			

PAROC FAL 1, US 4.1



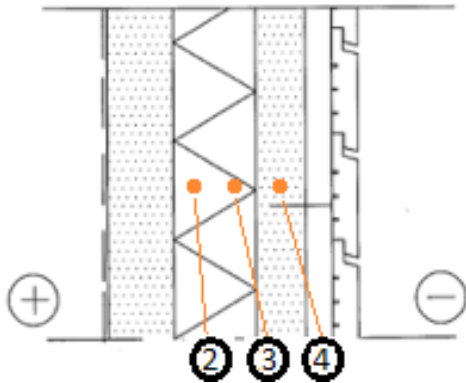
Kuva 146. Ulkoseinätyypin 4 rakenne ja mittapisteet

Kuvassa 146 esitetyn elementtityypin kosteus mitattiin kahdelta eri syvyydeltä. Taulukossa 18 näkyvä rakenteen absoluuttisen kosteussisällön mitattu arvo oli lähes identtinen molemmilla mittausmenetelmillä uloimmassa vertailupisteessä. Sisemässä mittauspisteessä sijaitsevista antureista ei ollut saatavilla lämpö- ja kosteusteknistä dataa.

Taulukko 18. Porareikämittausten ja rakenteeseen integroidun mittausjärjestelmän tulokset mittauspisteittäin

US4.2		Porareikä			Sisäänrakennettu		
Mittauspiste	Reiän syvyys	RH (%)	T (Co)	Abs. (g/m ³)	RH (%)	T (Co)	Abs. (g/m ³)
1							
2	225	34	13,6	4			
3	115	34	12,3	3,7	27	16,8	3,8

Kingspan Therma TW58, US 5.2



Kuva 147. Ulkoseinätyypin 5 rakenne ja mittapisteet

Kuvassa 147 esitetyn elementtityypin kosteus mitattiin kolmelta eri syvyydeltä. Taulukossa 19 näkyvä rakenteen absoluuttisen kosteussisällön mitattu arvo oli lähes identtinen molemmilla mittausmenetelmillä, poikkeuksena tarkastelupiste 2, jossa absoluuttisen kosteuden erotus kahden mittausmenetelmän välillä on noin $1,6 \text{ g/m}^3$. Syytä poikkeamaan ei voida selvittää ilman, että rakenne avataan ja integroidun mittausjärjestelmän anturin mittaussyvyys ja asennustapa määritetään.

Taulukko 19. Porareikämittausten ja rakenteeseen integroidun mittausjärjestelmän tulokset mittauspisteittäin

US5.1		Porareikä			Sisäänrakennettu		
Mittauspiste	Reiän syvyys	RH (%)	T (Co)	Abs. (g/m ³)	RH (%)	T (Co)	Abs. (g/m ³)
2	293	53	12,6	5,9	48	18,3	7,5
3	218	68	11,4	7	49	14,6	7,1
4	135	78	8,4	6,7	73	9,7	6,7

JOHTOPÄÄTÖKSET

Mittaukset saatiin suoritettua suunnitelmanmukaisesti, ja mittaukselle asetetut tavoitteet saavutettiin. Mittausjärjestelyjen ansiosta tuloksista saatiin vertailukelpoiset, jolloin niitä pystyttiin vertaamaan rakenteen sisäisten anturien arvoihin.

Kerätyt mittaustulokset tukivat seinärakenteeseen asennettujen anturien tuottamia arvoja, kun niitä tarkasteltiin absoluuttisen kosteuden osalta. Mittaputken poikkeavan lämmönjohtavuuden vuoksi lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vertailu eri mittausmenetelmien välillä ei ole mielekästä, mikä tiedostettiin jo ennen mittausuoritetta. Porareikämittauksen ja rakenteisiin integroidun järjestelmän tulokset vastasivat toisiaan hyvin, ainoan poikkeuksen ollessa US5.1 Kingspan Therma TW58 -elementin mittapiste 4. Syytä poikkeamalle ei voida määrittää ilman tarkempia tutkimuksia, jossa sisäänrakennetun anturin asennustapa ja -syvyys selvitettäisiin tarkasti.

Jo ennen porareikämittauksia, Thermisol-elementeissä sijaitsevien anturien antamien mittaustulosten luotettavuus on kyseenalaistettu ja varsinaiset tulokset jätetty huomiotta, jonka vuoksi kyseisen elementin kohdalla porareikämittauksella ainoastaan täydennettiin hyvin puutteellista, olemassa olevaa tietoa rakenteen kosteussisällöstä. Tietoa täydennettiin yhden ajankohdan osalta. Elementin kosteussisältö osoitautui oletetun kaltaiseksi.

Voidaan siis todeta mittausuorituksen onnistuneen ja mittaustulosten olevan tarkkoja ja luotettavia mittaustulosten vertailun pohjalta, kun vertailusta poistetaan jo aiemmin tiedostetut puutteet ja epävarmuudet Thermisol-elementeissä sijaitsevien anturien antamissa arvoissa sekä yllättävä poikkeama Kingspan Therma TW58 -elementin 5.1 mittaussektori 5.1.2.2:ssa, jossa oli havaittavissa selkeä poikkeama.

LÄHTEET

1. Rakennustieto. RT 14-10984, Betonin suhteellisen kosteuden mittaus

Lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan tarkastelu CLT- ja betonirakenteissa

JOHDANTO

Lapin ammattikorkeakoulu on tehnyt muutaman viimeisimmän vuoden aikana lämpö- ja kosteusteknistä tutkimusta useammassa eri hankkeessa. Tämän raportin tavoitteena on tarkastella CLT- ja betonielementtien ominaisuuksia ja eroavaisuuksia. Samaa eristetyyppiä (PAROC Cortex One) on käytetty molempien tutkittavien rakennuskohteiden seinärakenteissa. CLT -koetalossa vuosina 2013 -2015 toteutetun tutkimuksen lähtökohtana oli Digipolis Oy:n hallinnoima, koetaloprojekti. Projektin toteuttajaosapuolina toimivat Lapin AMK, Kemin Digipolis Oy ja ammattiopisto Lappia. Projektin toimintoina toteutettiin:

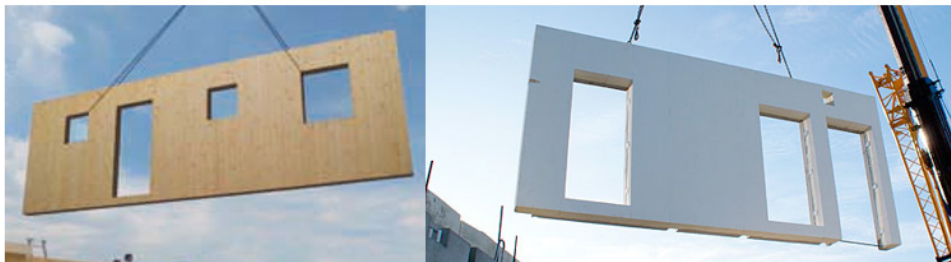
- CLT-pientalon kokeellinen rakennushanke
- CLT-rakenteiden toimivuuden tutkimushanke
- CLT-rakentamisen tiedonkeruu- ja esittelyhanke.

Lapin AMKin päävastuulla olivat koetaloprojektissa toteutettavat rakennusfysikaaliset tutkimukset sekä uudesta rakenneratkaisusta koostettava koulutusmateriaali. Lapin AMKin toteuttamia tutkimuksia CLT-koetalolla olivat:

- lämpö- ja kosteustekninen seurantatutkimus
- rakenteiden paukemelun seurantatutkimus
- rakenteiden muodonmuutosten mittaukset
- vaipparakenteiden ilmatiiviyyden pitkäaikäistutkimus.

Lapin ammattikorkeakoululla käynnistyi vuoden 2015 keväällä EFCONE-tutkimusprojekti, jossa tutkitaan nykyisten energiatehokkuusmääräysten mukaisten betonielementtien lämpö- ja kosteusteknistä käyttäytymistä. Tutkimus toteutetaan Levillä Kittilässä todellisessa tutkimuskohteena Rovaniemen koulutuskuntayhtymän omistamassa koulutus- ja työhyvinvointikeskus Welleissä.

Projektin tavoitteena on nykyisten rakenteiden kosteusturvallisuuden todentaminen sekä tulosten huomioiminen uudentyypisten rakenteiden suunnittelussa. Projektin tarkoituksena on tuottaa lämpö- ja kosteusteknisten mittausjärjestelyiden avulla tutkittua tietoa nykyaikaisten, energiatehokkaiden rakenteiden rakennusfysikaalisesta toiminnasta. Kuvassa 148. CLT- ja betonielementti esitetään CLT- ja betonielementti.



Kuva 148. CLT- ja betonielementti

TARKASTELTAVAT RAKENTEET

CLT-koetalossa ja Wellevisä on molemmissa tutkittu seinärakeneratkaisua samalla PAROC Cortex One mineraalivillaeristeellä (Kuva 149). Seinärakenteiden sisäpinnassa on massiivinen levymäinen kerros, koetalossa CLT:stä ja Wellevisä betonista, joka toimii myös seinärakenteen höyrynsulkuna. PAROC Cortex One eristepaksuus on CLT-koetalossa 180 mm ja Wellevisä 220 mm. Eristekerroksen ulkopuolella molemmissa rakenteissa on tuuletusrako ja ulkoverhouspaneeli. Molemmissa tutkimuskohdeissa kyseiset rakennetyypit on sijoitettu sekä pohjois- että eteläseinälle ja ulkoverhouspaneeli maalattu tummaksi. Suurin eroavaisuus ja samalla haaste seinärakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan tarkastelun kannalta ovat mittausantureiden paikat rakenteissa. CLT-koetalossa mittausanturit on sijoitettu rakennekerrosten rajapintoihin, kun taas Wellevisä anturit ovat rakennekerrosten sisällä. Tarkastelussa on vertailtu rakennusten pohjoisseinien sektoreita.



Kuva 149. Rakennelikkaukset ja antureiden sijainti

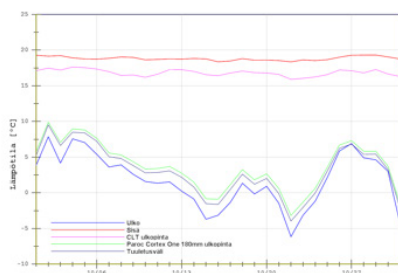
TARKASTELUJAKSO

Rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan tarkasteluun etsittiin sopivaa aikajaksoa säädatan perusteella, koska CLT-koetalo sijaitsee Kemissä ja Wellevi Kittilän Levillä. Ilmatieteen laitoksen ylläpitämästä lämmitystarvelukujen kuukausitilastosta vertailtiin eri vuosien kuukausia molempien kohteiden tutkimusjaksoilta. Lämmitystarveluku saadaan laskemalla yhteen kunkin kuukauden päivittäisten sisä- ja ulkolämpötilojen erotus. Yleisimmin käytetään lämmitystarvelukua S₁₇, joka lasketaan +17 °C:ksi oletetun sisälämpötilan ja ulkolämpötilan vuorokausikeskiarvon erotuksen perusteella. Lämmitystarveluvun laskennassa ei oteta huomioon päiviä, joiden keskilämpötila on keväällä yli +10 °C ja syksyllä yli +12 °C. Vertailupaikkakuntien (Oulu ja Sodankylä) arvot korjattiin kohdepaikkakuntien mukaisiksi (Kemi ja Kittilä). Lämmitystarvelukujen vertailun perusteella lämmityskauden yhteneviksi kuukausiksi valikoituvat Kemin vuoden 2014 lokakuu (503 °Cvrk) ja Kittilän vuoden 2015 lokakuu (525 °Cvrk). Lokakuu sopii myös hyvin kosteusteknisen toiminnan tarkasteluun. Lämmitystarvelukujen laskennan jälkeen vertailtiin ulkolämpötilojen ja ulkoilman suhteellisen kosteuden mitattuja arvoja valituilta kuukausilta toisiinsa. Mittaustulosten perusteella aikajaksojen ulko-olosuhteet todettiin riittävän samanlaisiksi päivittäisestä vaihtelusta huolimatta.

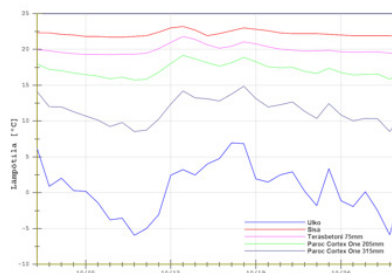
LÄMPÖTEKNINEN TOIMINTA

Alla olevissa kuvissa (Kuva 150) on esitetty elementtien lämpöteknisten mittausten tuloksia tutkimusjaksoilla. Ulkolämpötilojen vuorokautisten keskiarvojen vaihteluvälit olivat CLT-koetalolla (-6,2 – 7,9 °C, lokakuussa 2014) ja Wellevisä (-5,9 – 7,0 °C, lokakuussa 2015).

CLT-koetalo 10/2014 (°C)



Wellevi 10/2015 (°C)



Kuva 150. Elementtien mittauspisteiden lämpötilat

Tulosten perusteella määritellyt päivakohtaisten keskiarvojen vaihteluvälit eri mitauspisteissä on esitetty alla olevassa taulukossa (Taulukko 20).

Taulukko 20. Mitatun lämpötilan vaihteluvälit Welleissä (lokakuu 2015) ja CLT-koetalossa (lokakuu 2014).

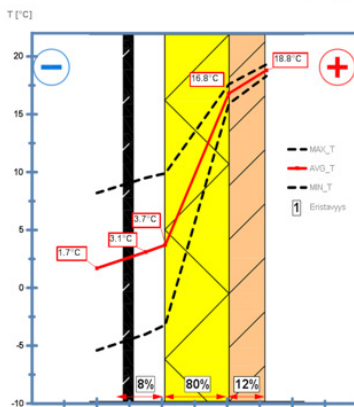
Tarkasteltava kohta (CLT-koetalo)	T _{min} [°C]	T _{mean} [°C]	T _{ylin} [°C]
Sisälämpötila, Layer 1 [CLT-koetalo]	+18.3 °C	+18.8 °C	+19.3 °C
US1 S4: Layer 2 [CLT - PAROC Cortex One]	+15.9 °C	+16.8 °C	+17.6 °C
US1 S4: Layer 3 [PAROC Cortex One, ulkopinta]	- 3.2 °C	+3.7 °C	+9.9 °C
US1 S4: Layer 4 [Tuuletusväli]	- 4.0 °C	+3.1 °C	+9.5 °C
Ulkolämpötila [CLT-koetalo]	- 6.2 °C	+1.7 °C	+7.9 °C

Tarkasteltava kohta (Wellevi)	T _{min} [°C]	T _{mean} [°C]	T _{ylin} [°C]
Sisälämpötila [Wellevi]	+21.7 °C	+22.2 °C	+23.2 °C
U1S1: Layer 1 [Teräsbetoni 75 mm]	+19.3 °C	+20.0 °C	+21.8 °C
U1S1: Layer 2 [PAROC Cortex One 205 mm]	+15.7 °C	+17.1 °C	+19.2 °C
U1S1: Layer 3 [PAROC Cortex One 315 mm]	+8.5 °C	+11.5 °C	+14.9 °C
Ulkolämpötila [FMI] [Wellevi]	- 5.9 °C	+0.5 °C	+7.0 °C

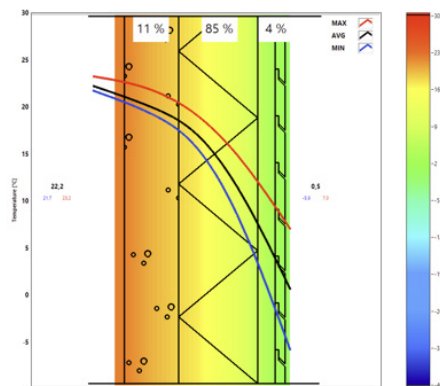
- Lämpötilamittauksiin perustuvan tarkastelun perusteella elementin lämpötekniinen toiminta on suunnitellun kaltaista.

Alla olevassa kuvassa (Kuva 151) on esitetty lämpöjakaumat elementtien alueella mittausjaksojen aikana. Lämpöjakauma on esitetty prosenttijakaumana, jossa tarkastellaan eri rakennekerrosten lämpötilan jakaumaa suhteessa koko rakenteen yli esiintyvään lämpötilaeroon. Rakennekerrokset on jaettu molemmissa elementtityypeissä kolmeen tarkasteltavaan segmenttiin: 1) Betonielementti / CLT-elementti, 2) Eristekerros, 3) Tuuletusväli ja ulkoverhous.

CLT-koetalo 10/2014 (°C)



Wellevi 10/2015 (°C)



Kuva 151. Lämpöjakaumat elementeissä

Mittaustulosten elementtikohtaisessa arvioinnissa voidaan verrata lämpötilajakaumia laskennallisiin eristävyys (lämmönvastus, R) arvoihin. Laskennalliset arvot on esitetty alla olevissa taulukoissa (Taulukko 21)

Taulukko 21. Laskennalliset lämmönvastusten arvot rakenteen eri osissa.

PAROC Cortex One (CLT-koetalo)				
Materiaali	d	λ	R	%
Sisäpuolen pintavastus			0,130	16 %
CLT-elementti	100	0,11	0,91	
Eriste (Cortex One)	180	0,033	5,455	83 %
Tuuletusväli	88	0	0	
Ulkoverhous	28	0	0	1 %
Ulkopuolen pintavastus			0,040	
RT [$\frac{m^2 K}{W}$]			6,535	100 %
U-arvo [$\frac{W}{m^2 K}$]			0,153	

PAROC Cortex One (Wellevi)				
Materiaali	d	λ	R	%
Sisäpuolen pintavastus			0,130	4 %
Betoni (sisäkuori)	150	1,2	0,125	
Eriste (Cortex One)	220	0,033	6,667	96 %
Tuuletusväli	48	0	0	
Ulkoverhous	25	0	0	1 %
Ulkopuolen pintavastus			0,040	
RT [$\frac{m^2 K}{W}$]			6,962	100 %
U-arvo [$\frac{W}{m^2 K}$]			0,144	

- Lämpötilamittauksiin perustuvan tarkastelun perusteella elementin lämpötekninen toiminta on suunnitellun kaltaista.
- Huomioitavaa on betonisen sisäkuoren laskennallista osuutta suurempi osuus mitatusta lämpötilajakaumasta (UIS1 = 11 %, laskennallinen = 4 %). Tämän arvioidaan perustuvan betonin suureen termiseen massaansa, joka pitää sisäkuoren lämpötilan korkeammalla pakkasjakson aikana, kuin mitä lämmönvastusten perusteella arvioitu lämpötilajakauma olisi.
- Myös rakenteiden ulko-osassa on hieman suurempi osuus lämpöjakaumasta, minkä arvioidaan perustuvan tuuletusvälin toimintaan. Tuuletusväliä ei lämmönvastusten laskennassa oteta lainkaan huomioon.

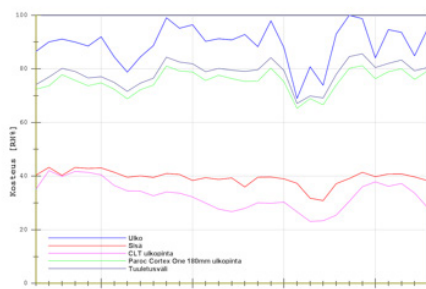
Elementit toimivat lämpöteknisesti tehokkaalla ja suunnitellulla tavalla.



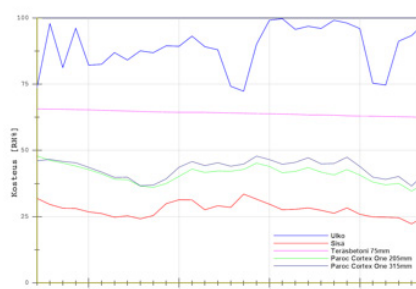
KOSTEUSTEKNINEN TOIMINTA

Alla olevassa kuvassa (Kuva 152) on esitetty elementtien kosteusteknisten mittausten tuloksia tutkimusjaksoilla.

CLT-koetalo 10/2014 (RH %)



Wellevi 10/2015 (RH %)



Kuva 152. Elementtien mittauspisteiden suhteellisen kosteuden arvot.

Tulosten perusteella määritellyt päiväkohtaisten keskiarvojen vaihteluvälit eri mittauspisteissä on esitetty alla olevassa taulukossa (Taulukko 22).

Taulukko 22. Mitatun suhteellisen kosteuden vaihteluvälit CLT-koetalossa (lokakuu 2014 ja Wellevisä (lokakuu 2015)

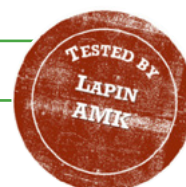
Tarkasteltava kohta (CLT-koetalo)	RH _{min} [%]	RH _{mean} [%]	RH _{max} [%]
Sisätilan kosteus, Layer 1 [CLT-koetalo]	31 %	39 %	43 %
U1 S4: Layer 2 [CLT - PAROC Cortex One]	23 %	33 %	42 %
U1 S4: Layer 3 [PAROC Cortex One, ulkopinta]	65 %	75 %	81 %
U1 S4: Layer 4 [Tuuletusväli]	72 %	78 %	85 %
Ulkopuolen kosteus [CLT-koetalo]	69 %	86 %	~100 %

Tarkasteltava kohta (Wellevi)	RH _{min} [%]	RH _{mean} [%]	RH _{max} [%]
Sisätilan kosteus [Wellevi]	22 %	28 %	34 %
U1S1: Layer 1 [Teräsbetoni 75 mm]	63 %	64 %	66 %
U1S1: Layer 2 [PAROC Cortex One 205 mm]	35 %	41 %	48 %
U1S1: Layer 3 [PAROC Cortex One 315 mm]	37 %	43 %	48 %
Ulkopuolen kosteus [FMI] [Wellevi]	72 %	89 %	~100 %

Mittaustulosten analysoinnissa tarkastellaan kosteusteknistä toimintaa diffuusion kondenssin tai kesäkondenssin näkökulmasta.

- Mittausten perusteella elementtien alueella suhteellisen kosteuden lukemat ovat pysyneet hyvin hallinnassa.
- Elementtien kosteusteknisessä toiminnassa ei esiinny riskiä diffuusion kondenssille mittaussjaksen aikana.
- Toiminta on tämän kaltaisille elementeille tyypillistä, sillä normaalitilanteessa betoni ja CLT sisäkuori toimivat tehokkaina höyrynsulkuina.

Elementit toimivat kosteusteknisesti turvallisella ja suunnitellulla tavalla.



Yhteenveto

Energiatehokkaat elementtiratkaisut arktisissa olosuhteissa (EFCONE) –projekti käynnistettiin yritysosaapuolten tarpeesta. Osallistuvat yritykset halusivat vastuullisina toimijoina todentaa nykyisten tuotteidensa kosteusturvallisuutta todellisessa käyttöympäristössä. Tutkimuksen käyttöympäristönä toimi Levillä sijaitseva Rovaniemen koulutuskuntayhtymän omistama koulutus- ja työhyvinvointikeskus Wellevi. Tutkimuksessa hyödynnettiin neljää erillistä menetelmää lämpö- ja kosteusteknisen toimivuuden varmentamiseksi;

1. Elementtikohtaiset lämpö- ja kosteustekniset mittaukset
2. Seinäelementtien ja ikkunarakenteiden lämpö- ja kosteustekniset simuloinnit
3. Toiminnallisen U-arvon mittaus seinäelementeistä
Kosteusmittaukset porareijistä

Projektin aikana analysoitiin betonielementeistä kerättyä lämpö- ja kosteusdataa, joiden avulla arvioitiin elementtien käyttäytymistä eri olosuhteissa. Mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että kaikki kohteessa käytetyt ulkoseinärakenteet toimivat lämpöteknisesti odotetulla tavalla. Arvio perustuu käyttötilanteessa mitattuihin lämpötasoihin rakenteen poikkileikkauksen eri syvyyksiltä. Lämpöteknisissä mittauksissa elementtien lämpöjakaumat ovat olleet suunnitellun kaltaisia.

Mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että kaikki kohteessa käytetyt ulkoseinärakenteet toimivat kosteusteknisesti turvallisella tavalla. Arvio perustuu käyttötilanteessa mitattuihin kosteustasoihin rakenteen poikkileikkauksen eri syvyyksiltä. Mittaustulosten perusteella on voitu havainnoida diffuusion kondenssin tai kesäkon-denssin mahdollista ilmenemistä sekä homeriskin tasoa rakenteessa. Yleisellä tasolla mittausten perusteella voidaan sanoa, että tuulettuvilla seinärakenteilla keskimääräi-siset suhteellisen kosteuden tasot ovat olleet alhaisempia kuin sandwich-tyyppisillä rakenteilla. On syytä kuitenkin korostaa, että tämä ei ole tutkimusjakson aikana aiheuttanut minkäänlaisia riskejä yhdenkään rakenteen osalta.

Lämpö- ja kosteusteknisten tulosten käsittelyn helpottamiseksi, kehitettiin web-siilla toimiva käyttöliittymä. Tulosten tarkasteluun tarkoitettua käyttöliittymän suunnittelun lähtökohtana oli, että elementtien lämpö- ja kosteusteknisen toimivuuden tarkastelu on helppoa ja vaivatonta. Käyttökokemuksessa painotetaan visuaali-

suuteen ja intuitiivisuuteen, jotta se miellyttävä käyttää ja hyödynnettävissä ilman erillistä perehdytystä.

Projektissa tehtiin kattavat lämpö- ja kosteusteknisen toimivuuden tarkastelut simulaatiomallien avulla. Ensimmäisessä vaiheessa elementtien lämpö- ja kosteusteknisen toimivuuden simuloinnilla vertailtiin COMSOL Multiphysics ohjelmalla simuloituja tuloksia seinäelementtien antureiden tuottamaan mittaustietoon. Vertailun avulla todettiin, että elementeistä kerätty mittaustieto ja säädäntä perusteella tehty mallinnus korreloivat keskenään.

Seuraavassa vaiheessa toteutettiin simulaatiomallit elementtien lämpö- ja kosteusteknisestä toimivuudesta passiivitason ratkaisulla eli mallinnuksessa elementtien eristekerrosta kasvatettiin siten, että saavutettiin lämmönläpäisylle U-arvo 0,09. Simuloinnin avulla arvioitiin Wellevin rakennetyyppien toimintaa passiivitason ratkaisuna Kittilän olosuhteissa. Mallinnuksen perusteella rakenteiden suhteelliset kosteudet kasvoivat hieman, koska eristeen lisääminen laskee lämpötilaa eristeen ulkopintaan mentäessä. Kuitenkaan kohonneet suhteellisen kosteuden arvot eivät oleet lähellä riskirajoja.

Elementtien lämpö- ja kosteustekninen simulointi tulevaisuuden ilmastoennustemalleilla tutkittiin Wellevin rakennetyyppien toimintaa tulevaisuuden ilmastossa simuloimalla rakenteita Ilmatieteenlaitoksen laatimien ilmastoennustemallien datalla. Ilmastoennusteiden perusteella pahimmassa skenaariossa vuoden keskilämpötilat kohoavat muutaman asteen, sateet ja pilvisuus lisääntyvät. Mallinnusten perusteella ilmastonmuutos ei kuitenkaan aiheuttaisi nykymääräysten mukaisille elementeille kohonnutta kosteusriskiä. Tuloksissa ei huomioitu viistosateen merkitystä, joka voi käytännössä olla merkittävä. Toisaalta tutkimuskohteen seinäelementit ovat suojattu tuulettuvalla ulkoverhouksella eli viistosade ei suoraan vaikuta elementteihin.

Uuden tyyppisten ikkunoiden syvyysuuntainen sijoittaminen betonielementissä tutkittiin simuloinnin avulla. Tutkimusosio toteutettiin ostopalveluna Vaasan yliopistolta. Tarkastelussa oli kolme skenaariota: ikkuna on asennettu seinän sisäpinnan tasalle, ikkuna on keskellä seinärakennetta tai ikkuna on seinän ulkopinnassa. Simuloinnin perusteella todettiin, että seinärakenne toimii lämpö- ja kosteusteknisesti optimaalisesti, kun ikkuna on sijoitettu keskelle seinärakennetta syvyysuunnassa.

Paikan päällä tutkimuskohteessa toteutettiin kaksi varmistavaa mittausta. Seinäelementtien tehollisen eristävyuden mittausta toteutettiin lämpövuon mittauslaitteistolla alku talvesta 2017 ja keväällä 2017 tehtiin seinärakenteiden kosteuden mittaaminen porareikämenetelmällä. Seinäelementeistä mitatut teholliset U-arvot olivat käytännössä suunnitteluarvojen mukaisia. Poikkeamaa mittaustuloksissa aiheutti mittalaitteiden tarkkuus ja mittaolosuhteiden vaikutukset, jotka kuitenkin olivat mittatarkkuuden raja-arvoissa. Standardin mukaisissa porareikämittauksissa seinäelementeistä mitattiin kosteus samalta syvyydeltä kuin elementtien anturit sijaitsevat. Ulkoiset mittaukset vahvistivat seiniin asennettujen lämpö- ja kosteusantureiden mittaustiedot oikeiksi.

EFONE-projektin tutkimusten tulosten perusteella voidaan todeta, että nykymääräysten mukaiset betonielementtirakenteen toimivat suunnitellulla ja kosteusteknisesti turvallisella tavalla myös Lapin olosuhteissa. Energiatohokkuuden parantaminen eristekerrosta lisäämällä ei myöskään näyttänyt aiheuttavan kosteusturvallisuudelle riskiä tutkimusten perusteella. Tutkimuskohteessa käytetyt rakenneratkaisut toimivat kahden vuoden mittausajanjakson ajan suunnitellulla tavalla, eikä riskiolosuhteita esiintynyt.

Rovaniemen koulutuskuntayhtymän omistama koulutus- ja hyvinvointikeskus Wellevi on suunniteltu tutkimustoimintaa ja koulutusta silmällä pitäen. Rakennuksen suunnitteluvaiheessa korostui elinkaariajattelu. Se korostuu mm. tilojen muunneltavuuden ja energiaratkaisuiden osalta. Energiaratkaisuissa korostui energiatohokkuus ja uusiutuvan energian hyödyntäminen. Kohteessa on aurinkosähkö- ja aurinkolämpöjärjestelmät sekä päälämmönlähteenä maalämpöpumppu. EFCONE-projekti oli ensimmäinen tutkimushanke, jossa hyödynnettiin Wellevin monipuolisia mahdollisuuksia. Seinärakennetyyppejä rakennuksessa on kuutta erilaista tyyppiä, joista EFCONE-projektissa tutkittiin viittä betonirakenteista elementtiä kosteusturvallisuuden näkökulmasta. Kaikki kuusi rakenne tyyppiä ovat varustettu lämpö- ja kosteussensoreilla rakenteen syvyys- ja korkeussuunnassa.

Jatkossa Welleviä ja siitä kerättävää mitattua tietoa hyödynnetään myös muissa tutkimusprojekteissa. Kohde toimii mm. referenssikohteena pohjoismaisessa yhteisprojektissa, jossa tutkitaan kohdekohtaista uusiutuvan energian tuotantoa arktisissa olosuhteissa.

Kirjoittajat

Alakunnas, Tuomas

Insinööri (AMK), projektipäällikkö
Lapin AMK

Autioniemi, Juha

Insinööri (AMK), projekti-insinööri
Lapin AMK

Kuisma, Petri

TKT, yliopettaja
Lapin AMK

Pernu, Niko

Insinööri (AMK), projekti-insinööri
Lapin AMK

Pirttinen, Valtteri

Insinööri (AMK), projekti-insinööri
Lapin AMK

Sirkka, Antti

Insinööri (AMK), projektipäällikkö
Lapin AMK

Vatanen, Mikko

Insinööri (AMK), projektipäällikkö
Lapin AMK

Tämä artikkelikokoelma toteutettiin EFCONE (Energy Efficient Concrete Structures in Arctic Environment) Energiatehokkaat elementtiratkaisut arktisissa olosuhteissa –projektissa. Projekti toteutettiin ajalla 3/2015 – 6/2017. Projektissa tutkittiin Levillä, Kittilässä sijaitsevan betonielementtirakenteisen koulutus- ja työhyvinvointikeskus Wellevin lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa. Wellevin rakennusfysikaalista toimintaa tutkittiin rakenteisiin sijoitetuilla mittausantureilla, simuloinnilla sekä varmistavilla paikan päällä tehdyillä mittauksilla. Tähän artikkelikokoelmaan on koottu projektin aikana toteutetut tutkimukset.

Projekti käynnistettiin yritysosaapuolten tarpeesta, kun yritykset halusivat vastuullisina toimijoina todentaa nykyisten tuotteidensa kosteusturvallisuutta todellisessa käyttöympäristössä. Projektin päärahoittajana toimi Tekes (EAKR) ja yritysrahoituksesta vastasivat Lapin ammattikorkeakoulu, Betonteollisuus ry, YBT, Paroc, Kingspan Insulation, Rovaniemen insinööritoimisto ja Skaala. Projektin tarkoituksena on nykymääräysten mukaisten betonielementtien lämpö- ja kosteusteknisen toimivuuden varmentaminen todellisissa olosuhteissa.



Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020

LAPIN AMK

Lapland University of Applied Sciences

www.lapinamk.fi

ISBN 978-952-316-196-2