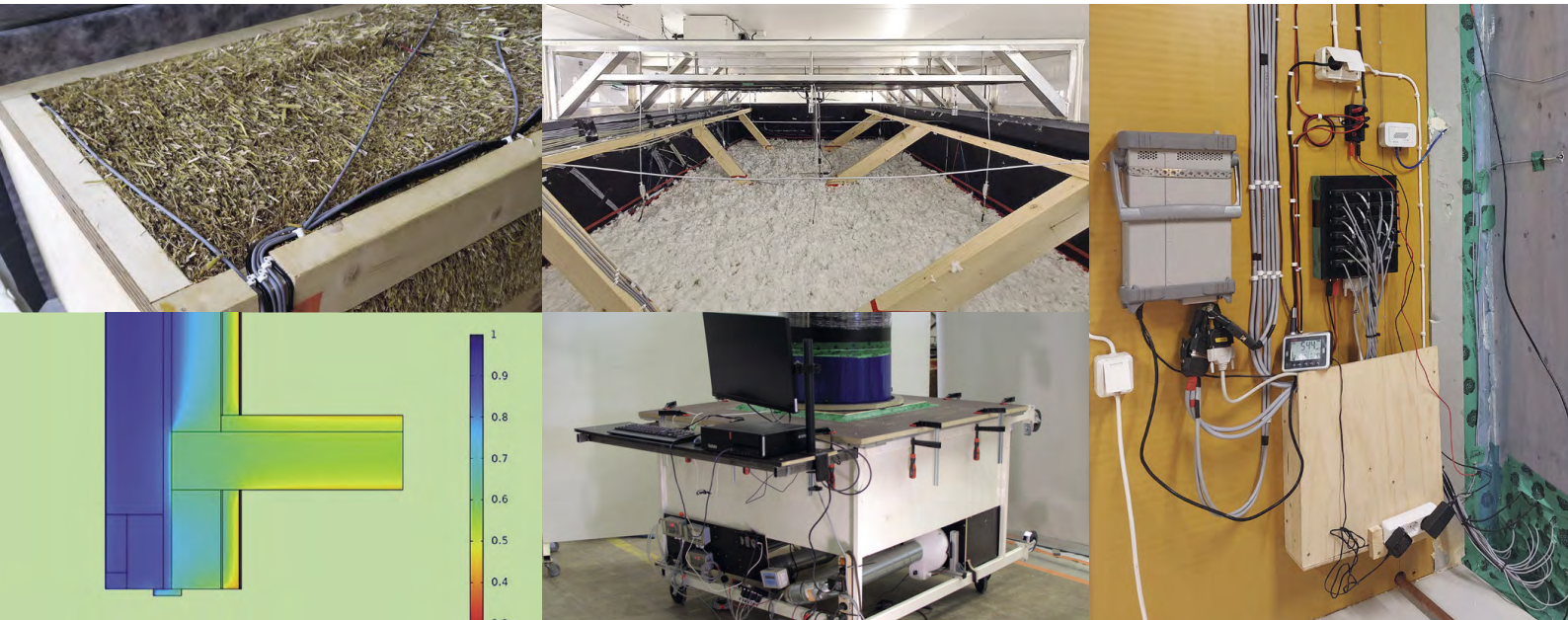


RAKENNUSFYYSIIKKA 2023

Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut
24.–26.10.2023, Tampere

Osa 1



RAKENNUSFYSIKKA 2023

Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut

24.– 26.10.2023, Tampere

Osa 1

Toimittajat Juha Vinha & Tuomas Raunima

Painopaikka:
Grano Oy
2023

ISBN 978-952-03-3118-4

Esipuhe

Elämme parhaillaan poikkeuksellisia aikoja maailmassa. Ennen edellistä rakennusfysiikkaseminaaria kohtasimme koronapandemian ja sen jälkeen Ukrainassa on alkanut verinen sota. Korkotaso on noussut ja sen seurauksena rakennusala on parhaillaan voimakkaissa talousvaikeuksissa. Tämä on osaltaan heijastunut myös tämänkertaisen rakennusfysiikkaseminaarin järjestelyihin. Kaikesta huolimatta olemme kyenneet järjestämään taas tämän perinteisen tapahtuman, joka selvästi kiinnostaa rakennus- ja kiinteistöalan asiantuntijoita laajasti Suomessa. Aktiivinen osallistuminen tähän seminaariin antaa meille tapahtuman järjestäjille parhaan palautteen siitä, että tapahtuma on tarpeellinen. Kiitokset siitä kaikille osallistujille.

Rakennusfysiikkaseminaari järjestetään nyt kahdeksannen kerran. Saimme tähän seminaariin taas yli 100 esitelmähdotusta, mikä kertoo siitä, että aihealueella tapahtuu jatkuvasti paljon merkittäviä asioita ja tutkimustoimintaa tehdään laajasti. Kuten tavallista, aivan kaikki ehdotukset eivät konkretisoituneet artikkeleiksi, mutta seminaarissa kuullaan yhteensä 91 puheenvuoroa, joka on samaa luokkaa kuin ennen korona-aikaa.

Seminaaripäivät on jaettu tutuksi tulleella tavalla eri aihepiirejä koskeviin teemoihin. Ensimmäisen päivän aiheet liittyvät rakennusfysiikan suunnitteluun ja toteutukseen, rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan sekä uusiin ohjeisiin. Samana päivänä esitellään myös rakennusfysiikan laskentatarkastelujen sekä laboratorio- ja kenttätutkimuksen tuloksia. Toisena päivänä keskitytään perinteiseen tapaan rakennusten kosteus- ja homeongelmiin, niiden ennaltaehkäisemiseen ja sisäilman laatuun. Tällöin kuullaan myös esityksiä kiinteistöjen olosuhteista, hallinnoinnista ja juridiikasta. Kolmannen päivän aihepiirinä ovat erityisesti luonnonmukainen ja vähähiilinen rakentaminen, ilmastonmuutokseen sopeutuminen sekä akustiikka.

Tampereen yliopistolla rakennusfysiikan tutkimusryhmässä on päättynyt tämän vuoden aikana useita suuria tutkimushankkeita, joista merkittävimpänä on ollut monivuotinen Business Finlandin rahoittama Future Spaces -hanke. Hankkeen kantavana teemana on ollut rakennusten ennakoiva korjaaminen siten, että niissä otetaan huomioon myös ilmastonmuutoksen aiheuttamat lisähaasteet ja seurataan sisäilman laatua erilaisten indikaattorien avulla. Tämän hankkeen tuloksia esitellään seminaarissa useissa esityksissä. Merkittävä osa rakennusfysiikan tutkimuksesta on keskittynyt myös luonnonmukaisiin ja vähähiilisiin rakennusmateriaaleihin ja rakenteisiin. Tämän aihealueen osalta on saatu päätökseen mm. kahden suuren ECOSAFE-hankkeen kokonaisuus, jossa keskityttiin kutterinlastueristeisten rakenteiden tutkimiseen. Myös näistä hankkeista on esityksiä seminaarissa.

Seminaarissa kuullaan tälläkin kertaa neljä keynote-puheenvuoroa ja ensimmäistä kertaa ne kaikki ovat ulkomaisten asiantuntijoiden pitämiä. Seminaarin avauspäivänä tiistaina keynote-puheenvuoron pitää professori Jan Carmeliet ETH Zürichistä Sveitsistä, jota pidän tällä hetkellä maailman johtavana rakennusfysiikkona. Hän julkaisee tutkimusryhmineen erittäin laajasti rakennusfysiikan eri aihealueilta tutkimusta ja on kiinnostunut mm. kaupunki-ilmaston olosuhteista, huokoisten materiaalien monimuotoinen käyttäytymisestä sekä monienergiajärjestelmistä rakennus- ja kaupunkimittakaavassa. Hän on ollut viime vuosina keynote-puhujana monissa rakennusfysiikan kansainvälisissä konferensseissa.

Tiistain toisen keynote-puheenvuoron pitää liiketoiminta- ja innovaatioalueen johtaja Kristina Mjörnell RISE:stä (Research Institute of Sweden) Ruotsista. Hän toimii myös dosenttina Lundin

yliopistossa. Hänen tutkimusalueitaan ovat rakennusten kosteudenhallinta, sisäympäristötutkimukset sekä energiatehokas ja kestävä rakennusten ja kestävien kaupunkien peruskorjaus ja uudelleenkäyttö. Hän on toiminut aktiivisesti myös monissa rakennusfysiikkaan liittyvissä järjestöissä sekä Ruotsissa että kansainvälisesti.

Keskiviikkona keynote-puheenvuoron pitää Pohjois-Amerikan johtaviin tutkijoihin kuuluva Michael Lacasse National Research Councilista Kanadasta. Hän on toiminut siellä yli kymmenen vuoden ajan julkisivurakenteiden tutkimusryhmän vetäjänä. Hänen tutkimusalueitaan ovat mm. ulkoseinien säänkesto ja kosteustekninen toiminta, rakennusosien kestävyuden arviointimenetelmien kehittäminen sekä rakenteiden kestävyys ilmastonmuutoksen vaikutuksia vastaan. Hän on CIB:n hallituksen jäsen (International Council for Research & Innovation in Building & Construction) ja toimii CIB W080 työkomission koordinaattorina sekä myös standardoinnin kehittämisessä.

Torstain keynote-luennoitsija on apulaisprofessori Andy Shea Bathin yliopistosta Iso-Britanniasta. Hän toimii tällä hetkellä siellä Digital Net Zero -energiajärjestelmien laboratorion johtajana. Hänellä on laaja kokemus kestävien rakennusten suunnittelusta ja kehittämisestä, ja hän on tutkinut monenlaisia luonnonmateriaaleja, joita voidaan käyttää rakennusten lämmöneristemateriaaleina, kuten olkea, hampppua ja sisalia. Hän on toiminut myös yli kymmenen vuoden ajan Innovatiivisten rakennusmateriaalien keskuksen (BRE CICM) jäsenenä ja on parhaillaan myös kansainvälisen Building Services Engineering Research and Technology -lehden päätoimittaja.

Kosteusturvallisen rakentamisen palkinto jaetaan seminaarin yhteydessä kuudetta kertaa. Tällä kertaa palkintoa tavoitteli 23 kilpailuehdotusta, joista kuusi tuomariston mielestä ansioituneinta ehdotusta esitellään voittajaehdokkaiden sessiossa. Mukana on jälleen ehdotuksia usealta eri kosteusturvallisen rakentamisen osa-alueelta. Voittajaehdokkaina esitellään Terveen talot uusitut RT-kortit, älykäs kuivanapitolämmitys, RIL 107 ohjekirjan uusin painos, ilmastonmuutokseen sopeutumista käsittelevä rakentamisen suunnitteluopas, kosteuskonvektiotutkimus mineraalivillaeristeisessä ulkoseinässä sekä Topten- käytäntöjen esittely Rakennustarkastusyhdistyksen verkkosivualustalla. Voittaja julkistetaan taas ehdokkaiden pitämien esitysten jälkeen keskiviikkona iltapäivällä ennen cocktailtilaisuutta.

Haasteellisesta taloudellisesta tilanteesta huolimatta suuri määrä yhteistyökumppaneita on lähtenyt jälleen mukaan tapahtumaan. Pääyhteistyökumppaneina tapahtumassa ovat tällä kertaa AFRY Rakennusfysiikka, Ramboll Finland Oy ja Sweco Finland Oy.

Kiitän kaikkia artikkelien tekijöitä ja esittäjiä, seminaaripäivien puheenjohtajia, tapahtuman organisointiin osallistuneita ihmisiä sekä yhteistyökumppaneita merkittävästä panoksesta seminaarin toteuttamisessa.

Tampereella 17.10.2023

Professori Juha Vinha
Tampereen yliopisto
Rakennusfysiikka
Seminaarin puheenjohtaja
RIL:n rakennusfysiikan toimikunnan puheenjohtaja

Rakennusfysiikka 2023 -seminaarin yhteistyökumppanit

Seuraavat organisaatiot ovat toimineet Rakennusfysiikka 2023 -seminaarin yhteistyökumppaneina:

Päyhteistyökumppanit

AFRY Rakennusfysiikka
Ramboll Finland Oy
Sweco

Muut yhteistyökumppanit

ABRESTO
Aerobiologian laboratorio, Turun
yliopisto
A-Insinöörit
ARDEX Oy
Bauroc
BMI Suomi
Christian Berner Oy, Tärinäeristys
Comsol Multiphysics -
simulointiohjelma
Hunton
IdeaStructura Oy
Insinööritoimisto Sulin Oy
ISO-Chemie GmbH
Jaatimet Oy
Kaakkois-Suomen Ammattikorkeakoulu
XAMK
Katepal Oy
Knauf Oy
Matolog Sensor Technologies
MEHTO
Mitta Oy
MoistMaster Oy
Muottikolmio - Isodrän - Termotuote
Peikko
Pietiko-Mittausongelmiesi ratkaisija
Pihla Group Oy
Purmo

Puurakentamisen ohjelma
Puurakentamiset elementit, vaativat
puurakenteet, vähähiiliset puuelementit
ja rakenteet.
Rakennuslehti
Rakennustarkastusyhdistys
Kiinteistönomistajat ja rakennuttajat
Rakli ry
Restart Oy
RIA
SAFA
SafeDrying Oy
Saint-Gobain Finland Oy
Sirate Group Oy
Sisäilmayhdistys ry
Sosiaali- ja terveystieteiden ministeriö
Tampereen Tilapalvelut
Tectis
Termex-Selluvilla hengittävä
lämmöneriste kaikkeen rakentamiseen
Terveet tilat 2028
TIIVISTALO
Timberfinder
Topten - Rakentamisen yhteiset
käytännöt
VILPE Oy
Wienerberger
Ympäristö ja Terveys -lehti

SISÄLLYSLUETTELO

OSA 1

Esipuhe	iii
Rakennusfysiikka 2023 -seminaarin yhteistyökumppanit	v
Keynotes	1
Efficient use and adaptive reuse of buildings <i>Kristina Mjörnell</i>	3
A1. Rakenteiden rakennusfysikaalinen suunnittelu ja toteutus	13
Monitoimiareenan yläpohjarakenne – Manchester, Bradford <i>Ilari Stenroos ja Andreas Linnell</i>	15
Finlandia-talon julkisivumateriaalin valintaprosessi ja valintaan vaikuttaneet tekijät <i>Jyrki Jalli</i>	21
Kalsiumsilikaattilevyjen kosteusteknisen toimivuuden vertailu sisäpuolelta lisälämmöneristetyissä suojelluissa rakennuksissa <i>Teemu Jokela</i>	27
Palikka Original – 50 vuotta parempaa rakentamista ja asumista <i>Birger Wasenius</i>	33
Suomalainen ristikkotalo <i>Kari Ojala</i>	41
A2. Laskennallinen mallinnus	47
Sisäliikuntatilan joustolattian kosteustekninen toiminta <i>Konsta Kallio ja Pauli Sekki</i>	49
Suuren puolilämpimän ryömintätilan olosuhteiden hallinnan laskennallinen tarkastelu <i>Petteri Huttunen ja Teemu Vanha-Viitakoski</i>	57
Laskentamalli rakennusten hybridienergiajärjestelmien nopeaan tuntitason tarkasteluun <i>Janne Hirvonen, Natalia Lastovets ja Piia Sormunen</i>	63
Dynaaminen painovoimaisen ilmanvaihdon laskentamalli ja infektioriskin arviointi potilashuoneessa <i>Natalia Lastovets, Mohamed Elsayed, Ville Silvonen, Anni Luoto ja Piia Sormunen</i>	69
Sisäilmasto-olosuhteiden kytketty virtauslaskenta <i>Antti Mikkonen</i>	75

Virtauslaskenta pandemian leviämisen estossa <i>Aku Karvinen</i>	81
A3. Rakenteiden ja rakennusten lämpö- ja kosteustekninen toiminta	87
Vähän lämpöä läpäisevien puurunkoisten ulkovaipparakenteiden tuuletusvälien lämpö- ja kosteustekninen toiminta <i>Klaus Viljanen ja Jari Puttonen</i>	89
Tarpeenmukaisen tuuletuksen vaikutus loivan katon kuivumiskykyyn ja rakenteen kesäaikana läpäisevään lämpövirtaan <i>Klaus Viljanen</i>	95
Tuulettuvien yläpohjakoerakenteiden laskennalliset vertailutarkastelut <i>Petteri Huttunen ja Juha Vinha</i>	101
Sisälämpötilan laskun vaikutus homeriskiin puurunkoisten pientalojen yläpohjarakenteissa <i>Eero Saleva ja Iina Maso</i>	109
Hyvin alaspäin kuivuva maanvastainen kantava teräsbetonilaatta <i>Jani Kallio ja Sami Niemi</i>	115
A4. Rakennusaikainen kosteudenhallinta ja hyvät työmaakäytännöt	121
CLT-elementin kosteusmittaustapojen vertailu <i>Miska Pöysäri</i>	123
CLT-rakenteiden kosteudenhallinta ja kuivumisen aiheuttama halkeilu <i>Topi Moisio, Lauri Lepikonmäki ja Teemu Vanha-Viitakoski</i>	129
Ilmakiertoisen kuivatuksen jaksottainen käyttö <i>Pasi Lehtimäki, Pauli Sekki ja Esa Tommola</i>	135
Lähes 200 toteutettua kohdetta - kokemuksia viidestä kuivatuspuhalluksella kuivaksi saadusta kiinteistöstä <i>Esa Tommola, Pasi Lehtimäki, Jouko Pakkanen ja Santeri Härkönen</i>	141
Tervetalo-tarkastusasiakirja projektipankkiratkaisuna <i>Susanna Peltola, Marianna Tuomainen ja Tiina Palviainen</i>	147
A5. Rakenteiden kosteusvauriot ja korjaus	153
Kuntoarviot vääristävät tieteellisten sisäilmatutkimusten tuloksia? <i>Vesa Koskinen, Vuokko Lappalainen, Timo Murtoniemi ja Tommi Vehviläinen</i>	155
Kosteusvaurioiden yleisyys pientalojen yleisimmissä riskirakenteissa <i>Anniina Salmela, Jonathon Taylor, Antti Heimlander, Martin Täubel, Jukka Lahdensivu ja Juha Pekkanen</i>	161

Tiiliverhotun puurunkoisen ulkoseinärakenteen korjausvaihtoehdot <i>Juha Jokisalo, Sami Pajunen, Ilia Kravchenko, Simo Kilpeläinen, Risto Kosonen, Tero Marttila ja Siiri Turpeinen</i>	165
Eristerappausten mikrobiologinen toimivuus <i>Virpi Leivo, Jussa Pikkuvirta, Toni Pakkala, Jommi Suonketo ja Matti Pentti</i>	171
Myöhäisen ettringiittireaktion merkitys betonijulkisivujen pakkasrapautumisessa <i>Niko Lindman, Elina Lahdensivu, Jukka Lahdensivu ja Toni Pakkala</i>	177
A6. Kiinteistöjen olosuhteet, hallinnointi ja juridiikka	183
Suomen koulurakennusten nykykunto <i>Katja Tähtinen, Tuomas Alapieti, Camilla Vornanen-Winqvist ja Heidi Salonen</i>	185
Lämpöolosuhteiden, ilman laadun ja painesuhteiden mittauksia sisäympäristössä <i>Sami Lestinen ja Lari Eskola</i>	191
Digitaalisen kaksosen tuottaminen ja sen käyttö kerrostalon olosuhdeseurannassa <i>Timo Lehtoviita, Jevgeni Anttonen, Kristian Hirvonen ja Tuomas Keränen</i>	199
Rakennusten olosuhteiden hallinta rakennusautomaation ja IOT mittalaitteiden yhteiskäytöllä <i>Samu Niska, Antti-Jaakko Alanko, Lari Eskola ja Sami Lestinen</i>	205
Sähköisellä tomografialla maanalainen osa rakennuksista haltuun <i>Pekka Tuominen, Juhani Korkealaakso ja Antti Knuuti</i>	211
Ovatko riskirakenteet rakennusvirheitä oikeudessa? <i>Tiina Koskinen-Tammi</i>	217
A7. Kosteusturvallisen rakentamisen palkinnon voittajaehdokkaat	223
Terve talo RT-kortit on uusittu <i>Leif Wirtanen, Magnus Stagnäs ja Timo Turunen</i>	225
Kosteusturvaa ja optimoitua energiansäästöä tilojen ylläpitoon älykkäällä kuivanapitolämmityksellä <i>Juha Vinha, Teemu Jokela, Juhani Heljo ja Juho Kantanen</i>	231
Ilmastonmuutokseen varautuminen ja vikasietoiset rakenteet uuden RIL 107-2022:n kantavina teemoina <i>Pekka Talaskivi, Pekka Laamanen, Ismo Heimonen, Tommi Mutanen, Lasse Rajala, Antti Souto, Timo Turunen ja Juha Vinha</i>	239
Ilmastonmuutokseen sopeutuminen rakentamisen suunnittelussa – opas rakennuttajille ja kiinteistönomistajille <i>Elli Kinnunen, Arttu Lehtonen ja Lauri Savolainen</i>	247

Puurunkoisten mineraalivillaeristeisten ulkovaipparakenteiden suunnittelu kosteuskonvektion kannalta <i>Klaus Viljanen ja Jari Puttonen</i>	253
Rakentamisen Topten-käytännöt Rakennustarkastusyhdistyksen uudella verkkosivualustalla <i>Emilia Tommila, Markku Hienonen ja Risto Levanto</i>	259
A8. Luonnonmukaiset rakennusmateriaalit ja -tuotteet	265
Rakeisen materiaalin homehtumisherkkyyden määrittämisen haasteet: homehdutuskokeet savetetulla ja puhtaalla kutterinlastulla <i>Anna-Mari Pessi, Eero Tuominen, Sirkku Häkkinen ja Juha Vinha</i>	267
Savetuksen vaikutus mikrobitoimintaan rakennusmateriaaleissa <i>Ilkka Valovirta, Mirja Salkinoja-Salonen, Timo Hokkanen ja Juha Vinha</i>	273
Suositteluvat kutterinlastueristeiset rakenneratkaisut <i>Jaakko Hietikko, Ilkka Valovirta, Eero Tuominen ja Juha Vinha</i>	279
Energiätehokas ja hiiliviisas rakennettu ympäristö – luontopohjaiset rakentamisen ratkaisut <i>Tuula Jyske, Henri Vanhanen, Marta Cortina Escibano, Peter Petros, Xie Long, Jutta Kauppi, Mikael Westermarck, Juha Vinha ja Kirsi Mikkonen</i>	285
Teollisesti valmistetut luonnonmukaiset rakennustuotteet <i>Mikael Westermarck ja Juha Vinha</i>	289
Korresta kerrostaloksi STALK-hanke <i>Mikael Westermarck, Matti Kilpiäinen, Pauli Karjala, Ilkka Tuurala, Matti Hautala, Sami Kiviaho, Mika Alanen, Johanna Liblik, Timo Jokinen ja Juha Vinha</i>	295
A9. Ilmastonmuutokseen sopeutuminen	301
Uudet rakennusfysiikan mitoituksivuodet ajasta riippuviin simuloointeihin – Rakentamisen mitoitussäät (RAMI) -hankkeen tuloksia <i>Anssi Laukkarinen, Teemu Jokela ja Juha Vinha</i>	303
Optimoitujen aurinkosuojakaihtimien hyödyntäminen rakennusten ylälämpenemisen hallinnassa <i>Simo Kilpeläinen, Risto Kosonen ja Juha Jokisalo</i>	311
Urban tree potential to reduce summertime overheating <i>Jonathon Taylor and Tianxing Zhang</i>	317
Machine learning to apply buildings physics at urban scales <i>Jonathon Taylor and Phil Symonds</i>	323

A10. Rakenteet muuttuvassa ilmastossa	329
Vihreän siirtymän hinta rakennuskannassamme <i>Arto Toorikka ja Mikko Koskivuori</i>	331
Nykyisen rakennuskannan kosteustekninen toimivuus muuttuvassa ilmastossa <i>Jukka Lahdensivu, Jussa Pikkuvirta ja Toni Pakkala</i>	337
Sisäpuolisen lämmöneristämisen vaikutukset rakenteiden kosteustekniseen toimintaan liitosalueilla <i>Katja Karhunen, Petteri Huttunen ja Juha Vinha</i>	343
Yritysten ja yhdistysten ilmoitukset	349

SISÄLLYSLUETTELO

OSA 2

Esipuhe	iii
Rakennusfysiikka 2023 -seminaarin yhteistyökumppanit	v
B1. Uudet ohjeet	351
RIL 225-2023 – Uusi ohje rakennusosien lämmönläpäisykertoimien laskentaan <i>Pekka Talaskivi, Antti Souto, Asso Erävuoma, Tapio Kilpeläinen, Pasi Käkelä, Tuuli Kunnas, Tuomo Ojanen, Pasi Typpö, Juha Vinha ja Tero Virrantuomi</i>	353
Tiiviiden rakennusten ilmanvaihdon mittaus- ja säätöohjeet <i>Lari Eskola, Sami Mäkinen ja Juhani Hyvärinen</i>	359
Kansallinen sisäilma ja terveys -ohjelma on koonnut useita ohjeita sisäilmatilanteiden hallintaan <i>Kaisa Jalkanen, Anniina Salmela ja Anne Hyvärinen</i>	365
Oppaat tilaajalle sisäilmasto-ongelman ratkaisemiseen ja siihen liittyviin sopimusasioihin <i>Veli-Matti Pietarinen, Timo Turunen, Leif Wirtanen, Kiia Miettunen, Simo Kinnunen, Kalevi Setälä, Jonna Järvinen, Kai Mettälä, Sami Koskela ja Susanna Turkia</i>	371
JUKO-ohjeistokansion päivitys <i>Stina Hyyrynen, Jukka Lahdensivu, Niko Lindman ja Toni Pakkala</i>	379
B2. Laboratorio- ja kenttätutkimukset	385
Betonin lämpötilan vaikutus betonin suhteelliseen kosteuteen <i>Laura Virtanen ja Pauli Sekki</i>	387
Reikätiilen ja laastin kosteustekninen yhteistoiminta materiaalikokeissa <i>Pauli Karjala, Ilkka Tuurala, Eero Tuominen, Ilkka Valovirta ja Juha Vinha</i>	393
Ilmanläpäisevyyden mittauslaite ja eräiden puhalluseristeiden ilmanläpäisevyyksiä <i>Sami Haapaniemi, Jaakko Hietikko, Eero Tuominen ja Juha Vinha</i>	401
Puhalluseristeiden ilmanläpäisevyydsmittaukset RIL225 -julkaisuun <i>Eero Tuominen, Sami Haapaniemi, Ilkka Tuurala, Jaakko Hietikko ja Juha Vinha</i>	407
Puhallettavien yläpohjaeristeiden sisäisen konvektion vaikutus niiden lämmöneristävyyteen <i>Teemu Jokela, Eero Tuominen ja Juha Vinha</i>	413
Tuulettuvien yläpohjien kosteustekninen toiminta kenttäkokeissa <i>Jaakko Hietikko, Kaapo Yletyinen, Ilkka Valovirta, Eero Tuominen ja Juha Vinha</i>	419

B3. Ulkovaipparakenteiden ilmatiiveys	425
Tuulensuojalevyn lämmöneristävyyden ja höyrynsulkukerroksen ilmatiivyyden vaikutus massiivipuulevyrunkoisen ulkoseinän ja välipohjan liittymän rakennusfysikaaliseen toimivuuteen <i>Santeri Tammi</i>	427
Julkisivutuotteiden suoritustason määrittäminen vaativiin kohteisiin <i>Andreas Limnell</i>	433
Puu- ja hybridirakenteiden liitosten tiiveys ja kosteuskäyttäytyminen <i>Anti Rohumaa</i>	439
B4. Haitta-aineet ja epäpuhtaudet	445
Asbestin käyttö rakennuksissa, nykytilan kartoitus <i>Timo Turunen, Leif Wirtanen ja Jukka Lahdensivu</i>	447
Rakennusmateriaalien PAH-yhdisteiden tutkiminen ja niiden vaikutus sisäilmaan <i>Paula Wuokko, Miia Pitkäranta, Pauli Sekki ja Jarno Komulainen</i>	453
Mikrobivaurion toteamisen haasteet. Kloorianisoli-analyysi tuomaan lisätietoa korjausrakentamiseen <i>Arja Asikainen, Pinja Tegelberg ja Jani Mäkelä</i>	461
Huurreveden tulokset korreloivat sisäilmaoireisiin ja vahvistavat ekologisen savikorjauksen turvallisuuden <i>Kirsi Vaali, Elisa Aattela, Marika Mannerström ja Tuula Heinonen</i>	467
Kloorianisolit sisäilmanongelman aiheuttajana – havaintoja ja johtopäätöksiä kenttä- ja laboratoriotutkimusten tuloksista <i>Johanna Holmström, Arttu Harmaala ja Minna Lilja</i>	473
B5. Sisäilman olosuhteet ja laatu	479
Sisäilman lämpötila- ja kosteusolosuhteet päiväkodeissa ja kouluissa <i>Tuomas Raunima, Anssi Laukkarinen, Antti Kauppinen, Mihkel Kiviste, Eero Tuominen, Joonas Ketko ja Juha Vinha</i>	481
Päiväkotien ja koulujen koneellisen ilmanvaihdon yöaikaisen pysäyttämisen vaikutus sisäilman olosuhteisiin ja laatuun <i>Tuomas Raunima, Joonas Ketko, Anssi Laukkarinen ja Juha Vinha</i>	487
Ilmanvaihdon käyttöajan ulkopuolisen pysäyttämisen vaikutukset koettuun sisäilmastoon käyttöaikana kouluissa ja päiväkodeissa <i>Pentti Kuurola, Tuomas Raunima, Joonas Ketko, Oluyemi Toyinbo, Juha Vinha ja Ulla Haverinen-Shaughnessy</i>	495
Pienhiukkaset suomalaisten rakennusten sisäilmassa – tuloksia Future Spaces -projektista <i>Laura Salo, Ville Silvonen, Ilpo Kulmala, Tuomas Raunima, Juha Vinha, Panu Karjalainen ja Topi Rönkkö</i>	501

Asumisterveysasetuksen soveltamisohjeen päivityksen vaikutus mineraalikuitunäytteisiin <i>Vesa Koskinen, Vuokko Lappalainen, Timo Murtoniemi ja Tommi Vehviläinen</i>	507
B8. Vähähiilinen ja energiatehokas rakentaminen	513
Rakennuksen pitkäaikaiskestävyyden selvittäminen osana elinkaariominaisuuksien tarkastelua <i>Janita Rintala</i>	515
Rakennusosien uudelleenkäyttö pienentää rakentamisen hiilijalanjälkeä <i>Jukka Lahdensivu ja Tero Niemelä</i>	521
Purettavaksi suunnittelun arviointi kantaville puurakenteille <i>Sonja Laasonen</i>	527
Yhteistyöllä taklaamaan kiertotalouden haasteita <i>Elina Yli-Luukko, Timo Kauppinen, Markku Hienonen ja Olli Teriö</i>	533
Energiaparannusten pitkäaikaisvaikutukset asuinkerrostalokohteiden sisäilmastoon <i>Elmeri Sorsa, Virpi Leivo, Minna Kempe ja Ulla Haverinen-Shaughnessy</i>	539
B9. Akustinen suunnittelu ja kuntotutkimus	545
Standardi SFS 5907 ”Rakennusten akustinen suunnittelu ja laatuluokitus” <i>Mikko Kylliäinen, Simo Laitakari, Timo Huhtala, Matias Remes, Pekka Taina, Johannes Usano, Ville Veijanen, Janne Hautsalo ja Oskar Lindfors</i>	547
Julkisen rakennuksen akustinen kuntotutkimus <i>Saana Romula, Mikko Kylliäinen ja Jesse Lietzén</i>	553
Hätäpoistumistilanteen taustäänitaso äänievakuointijärjestelmän suunnittelussa <i>Janne Saarelainen, Toni Poikonen, Olli Salmensaari ja Timo Peltonen</i>	559
Kevytrakenteisten hallimaisten tilojen ääniympäristö <i>Erkki Honkakoski, Lauri Talus, Jesse Lietzén ja Mikko Matalamäki</i>	565
B10. Melun ja värähtelyn torjunta	571
ECOSAFE 2 – Luonnonmukaisten materiaalien käyttö puurankarakenteisissa ääntä eristävissä rakenteissa <i>Jesse Lietzén, Ville Kovalainen ja Mikko Kylliäinen</i>	573
Raitioliikenteen aiheuttaman runkomelun arviointitavat <i>Pekka Taina ja Jarkko Punnonen</i>	579
Liikennetärinän torjunta rakennusten suunnittelussa <i>Timo Peltonen, Mats Heikkinen, Minna Santaholma, Mikko Roininen, Jukka Pätynen ja Lauri Vapalahti</i>	585
Yritysten ja yhdistysten ilmoitukset	591

Keynotes

Efficient use and adaptive reuse of buildings

Kristina Mjörnell
RISE Research Institutes of Sweden

Abstract

Cities and societies face fundamental challenges such as climate change, urbanisation, and polarisation. The severe consequences of climate change call for urgent reductions of carbon footprints and energy consumption combined with needs for more resilient buildings and infrastructures that can handle the effects of the change. Urbanisation, which means more people moving into cities lead to an increased demand for affordable housing. These are often available in residential areas the suburbs of cities. To avoid polarisation, actions are needed to reduce segregation and take into consideration the importance of developing living environments, which are attractive, healthy, and safe for citizens, where people from different socio-economic groups with diverse needs and demands have access to democratic arenas for collaborative urban development. With increased demands for energy efficiency and for affordable housing, we see an opportunity to create more housing through the conversion of outdated office space, unused business premises or storage and laundry rooms into housing. Renovation and conversion of premises into homes is partly about technical solutions to meet requirements for energy efficiency, indoor environment and accessibility, and partly other requirements that must be met for a building to be converted to other uses. This paper is based on the four-step principle for a sustainable built environment and present practice-based research with focus on how to renovate and convert existing premises into housing that meets future needs. They shall be environmentally sustainable, energy-efficient attractive with good indoor environment, safe and affordable in price. Technical solutions are evaluated and demonstrated that promote scale-up. Goal conflicts in current regulations and legislation are identified. The results contribute with knowledge to clients and other stakeholder involved in the process of making decisions on renovation and conversion.

1. Introduction

Mega drivers such as increased geopolitical tensions and faster climate change mean that we face major development challenges in our cities and communities. Extensive environmental and climate neutrality requirements, increased price for energy, housing, building materials and products and in some cases lack of certain types of materials och products, increased risk of damage as a result of extreme weather events, competition for space in the city for new construction, infrastructure, green space, climate adaptation measures, energy production, etc. require new ways of using and adapting the already built environment to new needs and requirements, but also to value the already built. A major part of the future urban spaces is already built, and it is up to the public and public building owners to use, renovate, redesign, and reconstruct them in an efficient way to provide attractive, healthy and safe living environments for citizens.

The building and construction sector has been mostly focused on interventions, innovation and technology that minimises environmental impact by reducing carbon emissions, waste and energy consumption. There is an urgent need to consider how buildings, cities and infrastructures can be - not only sustainable and resilient - but also regenerative, creating net benefits. There is an opportunity to re-think how we maintain, redesign, renovate and reconstruct our built

environments to meet new needs and requirements. If we are to achieve the targets of the Paris Agreement and UN Sustainable Development Goals, quantifying the environmental impact and energy performance of buildings is fundamental. Yet to make the built environment truly sustainable, we also need to address gaps in understanding of the relationship between the built environment, human and community health, and climate change adaptation practices.

With the energy transition intensified through the launch of the Renovation Wave, economic inequalities are increasing in many EU countries, affecting the demand for affordable housing. We must learn the art of moving fast forward towards the sustainable smart, low-carbon and energy-efficient city without destroying social, cultural, and democratic values along the way. Renovation, regeneration, or adaptation of existing buildings and neighbourhoods must consider existing cultural heritage in neighbourhoods and urban areas. And we must learn to do this in an economically sustainable way that also considers the needs of low-income households.

The real estate sector's shift in focus from energy to residents, initiated by the Paris Agreements, has been accelerated by the impact of the pandemic on working and living conditions. The ongoing transition demands a change in the assessment of buildings from material terms (components, construction as well as design), creating sustainable buildings and renovating existing stock to optimise both environmental impact and cost but also health, wellbeing, and comfort.

What will be the comprehensive short and long-term impacts of today's transformations of the built environment? What are the most promising solutions and how should we assess these? Given ever-growing needs and limited resources, we need a holistic framework that will go well beyond economic cost/benefit, while being flexible and responsive to various built environments and conditions, and suitably standardised, allowing for comparability, replication, and learning. The first challenge lies in identifying and measuring all the diverse environmental and social impacts and benefits associated with the redesign, renovation, or adaptation. Improved measurement means improved understanding and decision support and is a necessary early step towards transformative business models and new ways of capturing and increasing the value of the built environment for the planet and for people. The second challenge is that many of these various costs and benefits occur in the future and are subject to significant uncertainty. A certain intervention can be impossible (due to space restrictions, regulations, or technical barriers) or too expensive, and perhaps other measures could have a greater impact for the same price.

The construction and real estate sector has been under pressure to demonstrate its contribution to sustainability. Meaningful change in the built environment needs to be technically, economically, and socially viable. Meeting our obligations to become carbon neutral by 2050 and transitioning to sustainable spaces requires not only an improved built environment but an environment that supports profound changes in individual and collective behaviour. To reach this goal, the engagement and active participation of community stakeholders, including a diversity of citizens as well as professionals such as building owners, designers, contractors but also insurance companies, financial institutes, and governmental agencies, is critical to ensure that innovation in this field is resilient, sustainable, inclusive, and reflective of all building's residents.

2. Four steps principle towards a more sustainable built environment

Several sectors and areas have developed principles for increasing resource efficiency. Within transport infrastructure policy, the Swedish Transport Administration has explored the 'four-step principle' [1], which states that possible improvements to the transport system should be

considered in a specific order. The first step is to consider measures that can affect the demand for transportation and choice of mode of transport. The second is to consider measures that could lead to more efficient uses of existing infrastructure. The third is to consider limited reconstructions. The fourth, which is only to be considered if the first three are not sufficient, is new and large-scale investment in the construction of road infrastructure [1]. Another example of guiding resource use through general policies is the ‘waste management hierarchy’, which is part of the EU waste directive [2]. The hierarchy states that, to reduce the negative impact of waste, five steps should be taken. Step 1 states that waste should be avoided through measures relating to product development and design. Steps 2–5 relate to when a product has become waste and focus on ways of reusing, recycling, and, as a last resort, disposing of products.

Inspired by the four-step principle Höjer and Mjörnell (2019) presented a version adapted for the built environment including the following four steps, with the first step being the least energy- and resource-demanding, figure 1 [3]:

- The first step involves reducing the need for space (less space per activity).
- The second step is to intensify the use of existing surfaces, which can be done by more activities sharing the same surface (crowding together) or dividing surfaces over time (using the surface at different times of the day/week). These changes do not involve major interventions on the building itself.
- The third step involves adapting existing buildings to a different use, which involves both interventions on interiors, installations and sometimes even exterior. This, in turn, can lead to a changed climate impact, both reduced if energy efficiency measures are taken, and increased because new materials and products are then deployed. It is also about meeting new requirements and regulations such as fire, noise, and accessibility.
- The fourth step means that if you must build new, the building must be designed, planned, and built to be used efficiently and is flexible for change relation future needs. New buildings should also be designed and constructed for deconstruction and reuse and with as much reused materials as possible.

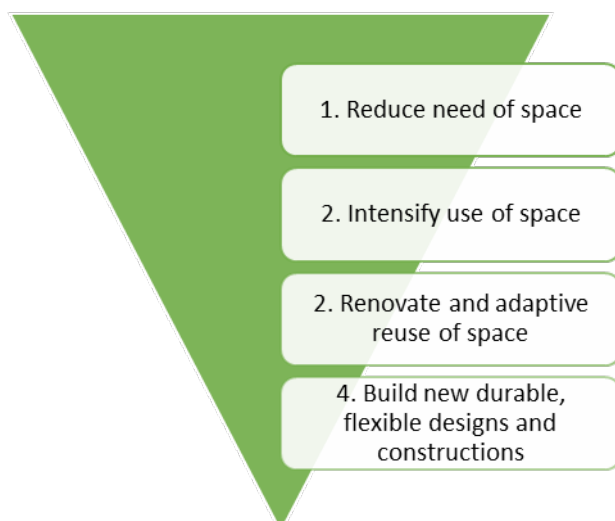


Figure 1. The four-step principle for built environment.

The following sections focus on the third step, emphasizing on how to renovate and convert existing premises into housing that meets future needs.

2.1 Reducing the demand for space

The first step is about reducing the need for space. Digitization has opened opportunities to reduce space as some activities are done digitally and no longer require a physical location, such as banking, e-commerce, some healthcare, certain educations, streaming services of film and music. Stores reduce their space and have smaller showrooms to display their goods while purchases are made online, and distribution of goods is done directly from a warehouse. After the pandemic, many companies have reduced their office space and are introducing flexible office solutions or using co-working facilities.

2.2 Intensifying the use of existing space

The second step is to intensify the use of space. There are great opportunities in multifunctional premises where several different activities can share a physical space over time or share the space at the same time. Examples of premises that are suitable for joint use are premises for education, lectures, conferences and cultural events or school gymnastics, leisure activities, sports events, but it can also be about sharing guest rooms, party rooms, laundry rooms, meeting rooms, bicycle workshop, carpenter's rooms among residents of small apartments. There are also examples of housing forms such as cooperative housing and co-living where most areas are common except for bedrooms.

Drivers and barriers to space-sharing initiatives were studied by Francart et. al. (2020) from the perspectives of building users and building sector and the result was that from the users' perspective, space sharing can be understood through the interplay between tangible aspects (e.g., concrete benefits derived from sharing), organisational aspects (e.g., common decision processes and conflict resolution) and social aspects (e.g., group identity and consensus on appropriate behaviours), [4]. From the perspective of architects and property owners, shareable spaces require features such as flexibility and multifunctionality. The design of such spaces is limited by regulatory issues (e.g., building regulations poorly accommodate shared facilities) and business-related issues. One such issue is that building performance metrics normalised based on floor area do not incentivise the efficient use of space, [4].

Sweden as most Nordic countries has among the highest floor area per capita in the world, even though it is unevenly distributed among the population. Today's situation with shortage of housing and divergence in supply in relation to demand, together with an increasing population, has led to high-occupancy-density housing in many areas, both in city centres and in the suburbs, which can lead to both social problems but also problems related to indoor environment, health, and well-being of occupants, which must of course be avoided, [5]. At the same time there is a growing trend towards compact living and tiny house trends in some groups of the population with purpose to have a sufficiency lifestyle, which is enabled by sharing of facilities, goods and services.

2.3 Adaptive reuse of buildings for climate- and resource efficiency

The third step involves renovation of existing buildings and adaptive reuse which refers to the process of reusing an existing building for a purpose other than which it was originally built or designed for. As for the third step, a thesis by Blakstad (2001) was published in 2001 on how knowledge about adapting office premises to new needs and new ways of working can be improved [6]. Then it was about changes of a building to new needs within the same business (offices) but a trend that seems to have come to stay is the change of office space to housing.

The trend started mainly in Stockholm, where previously officed turn-of-the-century properties were converted back to housing but has also been followed by conversions of newer properties built in the 1960s and 1970s. What has driven the development is a weaker interest in older office premises with a lower standard and that are not adapted to new needs (activity-based workplace, flexible workplaces, etc.).

In addition, the housing shortage, mainly in large cities, has driven development. One advantage of converting premises into housing is that you get a more vibrant district around the clock, which can increase the attractiveness of the premises that remain. The areas become more dynamic and exciting with elements of accommodation. Housing is a sought-after investment segment and with the previously low interest rates, the yield requirement has been driven down. There is also a large amount of capital available to invest in real estate. Conversion of outdated premises into housing provides better use of the space, which can lead to increased value of the properties.

Sustainable renovation and conversion of premises into housing is a complex dynamic process with different actors having multiple and sometimes conflicting goals and stakeholder interests. Renovation and regeneration take place in a multi-level institutional environment with conflicts between different forms of legislation and policies that further complicate how to implement sustainable renovation and regeneration of existing urban areas. Today, a building's use is governed by the detailed development plan, but if you are to facilitate the conversion of buildings to other uses in the future, today's policy and regulations regarding use need to be reviewed.

2.4 New construction: Flexible, designed for reconstruction and with reused material

The fourth step is to design and construct new buildings flexible in use, with a low environmental footprint and designed for deconstruction and with as much reused material as possible. New buildings should be built with a low climate footprint and with a design that does not require as many resources to operate. Examples are low energy wooden buildings made of as much bio-based materials as possible. But most important is that buildings are designed to last a long time so they do not need to be maintained and renovated as often, but also be flexible so that the building can be used for different activities and in the future rebuilt to meet new needs or deconstructed so that structures and materials can be reused.

This can be done by designing the load-bearing structure of the building enabling a flexible floor plan that can be changed as new needs arise. Another form of flexibility is building modules that can be moved to the places where you currently need building space, such as housing, preschools and offices. But modular buildings have been criticized for being monotonous in their design. Yet another example of flexible buildings is element construction, where the elements could be dismantled and used again in the future, for examples reuse of concrete elements [7]. Another way to reduce the climate footprint of new production is to use recycled materials and there is an increased interest from the industry, but there is still a lack of a functioning market with logistics, business models, quality assurance, traceability, guarantees, certification but also attitudes to recycled materials. Another issue is the availability of reused materials and products, which in some projects have been solved through donor projects supporting the new construction with materials and products.

3. The possibility of adaptive reuse of premises into housing

With changed conditions because of the pandemic but also demographic changes as a result of migration, there is a great need to partly reduce the office and commercial space, partly increase the living space. A mix of premises and housing with increased access to service in near home may reduce demand for transport but also open for possibilities for energy sharing and power equalization, since activities in offices, schools, shops and housing have very different energy demand pattern. A lively neighbourhood may be achieved in a significantly more resource- and thus energy-efficient way than by demolishing premises and build new housing.

Renovation and conversion of premises into housing is not only a set of technical activities carried out by a real estate company and their subcontractors. It is also a set of complex social interactions between a wide range of heterogeneous stakeholders with enormous resources involved where complex rules and norms are applied. At the same time, energy and power consumption targets must be given great focus. Renovations or conversion of individual buildings to new use, e.g., from offices to apartments, can affect surrounding areas. It is particularly important to understand how the development of the physical environment can affect vulnerable neighbourhoods.

If the premises are classified as office premises, a building permit must be applied for, for a change of use. As a building permit for housing is given, new requirements are placed on the design of the home regarding fire, accessibility, sound, and other technical designs such as bathrooms and installations. The load on the building in the form moisture loads will probably also be higher. This often means other requirements for plumbing, heating, and ventilation. As always with renovations or conversions, it is important to consider the building's technical, cultural-historical, and environmental values and make the renovation as careful as possible to save resources.

Our research focuses on how we can renovate, renew, and convert existing commercial buildings into housing that meet future needs and conditions. The homes must be environmentally sustainable, energy efficient but at the same time attractive, have a good indoor environment, be safe and affordable for residents with different needs and requirements.

3.1 Challenges and barriers for conversion of premises to housing

One obstacle to converting premises into housing is that the use of a building is regulated in the Swedish Planning and Building Act [8]. The zoning plan specifies what a building may be used for (commerce, offices, housing, etc.), which makes it difficult to simply change use. In addition to the legal obstacles, there are a number of other obstacles and challenges both political, economic, social, technical and environmental to change the use of a premises to housing. Below are some of the different types of obstacles and challenges that need to be solved in order to convert premises to housing. It is by no means a comprehensive description, but just a few examples identified in a pre-study by Mjörnell and Gunér (2023) [9].

List of examples of obstacles and challenges that need to be solved when converting premises to housing:

- Political: Conflicts between different political goals, such as profit requirements, housing supply, climate impact, social sustainability, political intensions to have active ground floors in premises.

- Economic: Comparatively lower rental income for housing than premises, especially in central locations, uncertainty when calculating costs for redevelopment. Disinterest from contractors in carrying out redevelopment projects. High production cost for conversion of individual apartments, difficult to estimate the budget for conversion because the rent must be negotiated.
- Social: A conversion can be perceived as disruptive to and affect existing tenants. New housing must meet requirements for quiet side for bedrooms, daylight, accessibility, escape routes, proximity to laundry rooms and garbage stations, etc.
- Technical: Conversion must meet requirements for new construction standard for energy use and other regulations. Ventilation must be adapted, and new ducts drawn in the ceiling, which in some cases leads to reduced ceiling height. Light and sound requirements must be met. Risks to exceed bearing capacity when making openings in the frame. Difficult to change the placement of stairwells and to get room for an elevator.
- Environmental: Cheaper with new building materials compared to recycled. Logistics of dismantling and storing materials for reuse. Lack of knowledge about dismantling and assembling used building materials. Get incentives to use recycled building materials.
- Legal: Difficult to make changes or deviations from the current zoning plan. Accessibility requirements and escape routes must be met while requirements regarding cultural-historical values and caution must be met. Parking-norms for access to parking spaces.

3.2 Potential for adaptive reuse of office space for housing in Swedish cities

Looking at the statistics of conversion of premises into housing in Sweden the last five years show that almost two thousand apartments have been created in total, with some differences over time and between metropolitan regions and the rest of the country [10].

Table 1. Created apartments in existing buildings in Sweden in recent 5 years.

Region	2018	2019	2020	2021	2022
<i>Greater Stockholm region</i>					
Conversion of premises into housing	1 129	869	1 061	387	350
Conversion of housing into premises	-1	-8	-20	-20	-59
Conversion of attics into housing	86	138	77	85	63
<i>Greater Gothenburg region</i>					
Conversion of premises into housing	348	149	311	112	221
Conversion of housing into premises	-1	-5	0	0	-12
Conversion of attics into housing	100	49	94	57	66
<i>Greater Malmö region</i>					
Conversion of premises into housing	257	339	180	148	275
Conversion of housing into premises	0	-3	0	-2	-2
Conversion of attics into housing	53	76	43	36	35
<i>Sweden except for 3 metropolitan regions</i>					
Conversion of premises into housing	1 078	1 424	1 559	1 530	1 133
Conversion of housing into premises	-23	-73	-124	-22	-27
Conversion of attics into housing	176	101	192	243	159

In order to gain more knowledge of how many premises there are vacant and whether these would be suitable as housing, a first study was conducted where we took a closer look at the 500

most recently announced premises in Gothenburg and 500 most recently announced premises in Stockholm during the week in April on a website for vacant premises objektvision.se, [9]. The premises were assessed based on four aspects: proximity to services, public transport, recreation and the suitability of the floor plan for housing. In the survey, we sorted out office space and premises in the category industry, workshops and logistics.

The results show that 39 of the 500 vacant premises in Gothenburg (2.3% of vacant space) could be used directly or with small renovation measures as housing and that 94 (about 12.2% of the vacant space) are in a good location close to services, public transport, recreation and would be possible to convert into housing. Of the 39 premises, about half are located in areas where we believe housing is permitted according to the detailed development plan.

Of the 500 vacant premises in Stockholm, it turned out that 22 premises (0.6% of all vacant space) with very little renovation could be used as housing and that 104 premises (7.8%) could have been converted into housing without too much effort. Some premises can be divided so that it is possible to create several apartments out of one room.

Assuming that an apartment is about 65 square meters in size, about 100 homes could have been made available with minimal renovation measures and about 520 homes with slightly more extensive reconstruction measures in Gothenburg and about 30 homes with minimal renovation measures and just over 380 homes with slightly more extensive reconstruction measures in Stockholm.

Table 2. Number of premises, areas and assessed suitability as housing in Gothenburg and Stockholm.

City	Close to services, public transport, recreation and possible as housing with small measures		Close to service, public transport, recreation and possible as housing after reconstruction		Total space of 500 empty premises in each city
	No premises	Space (sqm)	No premises	Space (sqm)	Space (sqm)
Gothenburg	39	6 334	94	33 796	276 479
Stockholm	22	2 049	104	24 984	319 241

A large part of the inventoried premises is located in properties with private owners who probably prefer to rent out to a commercial business because they can then get a higher rent. In the long run, however, vacant premises lead to lost revenue and the question is how long it is justifiable to stand with empty premises.

In order not to tie themselves up in long-term rental contracts with low rent levels, fixed-term contracts could be a solution. If there was flexibility in the use of building space, the type of contract could be adapted to the demand in the residential and premises market.

If you are going to convert any larger offices into housing, there is the question of who should move in. Can you create a good living environment with sufficient light in the large office complexes with great depths? The risk is that we create homes that are not good living environments. The functional requirements must of course be met and here we have a lot of challenges with light, sound, accessibility, moisture, fire, air, etc., but a certain flexibility in the regulations that does not entail risk to life and health would have been welcomed.

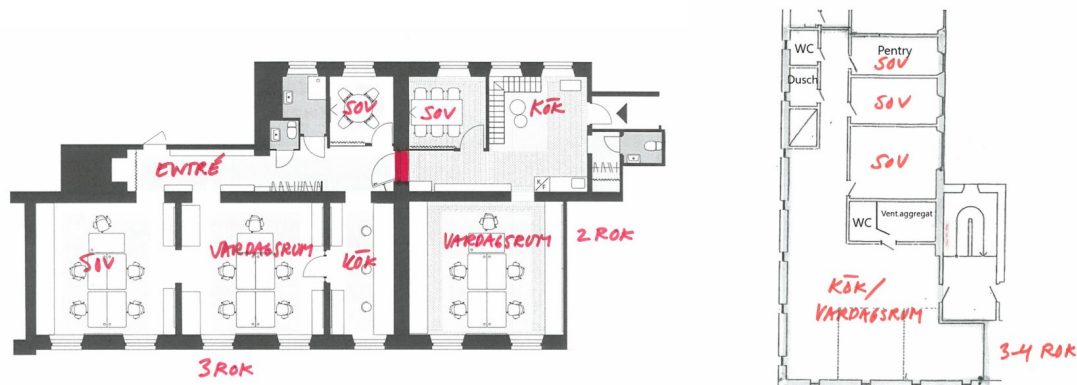


Figure 2. Some sketches of how office premises could be adapted or converted into housing.

In Figure 2 some sketches are shown of how premises could have been adapted or converted into housing. These sketches are just sketches and do not claim to meet all the requirements of a home. In order to investigate whether these adaptations are possible, a number of aspects would need to be investigated further, including the building's use in the current zoning plan accessibility (lift, level differences, sufficient dimensions in stairwells, entrances and dwellings), construction and load-bearing capacity, acoustics (inside and outside noise), plumbing (possibilities to find locations for water, sewage and adequate ventilation), daylight, possibility of storage inside and outside the dwelling (storage room), access to laundry room, fire and escape routes from residence, docking, parking for car and bicycle, cultural environment and conservation requirements, etc.

4. Conclusion and further work

The conclusions are that the four-step principle, which is an approach how to use existing buildings more efficiently, renovate and reuse buildings to adapt to future needs and to construct new flexible buildings designed for deconstruction, has to be implemented in order to reach the goals of decreased carbon footprint, increased robustness to climate change, reduce segregation and provide affordable housing and attractive living environments. As an example, results from a pre-study show that there is a huge potential for adaptive reuse of empty premises to housing, even though there are several challenges, both technical, financial, and legal to be solved in order to implement this on a large scale.

These and related issues will be further researched within the practice-based PhD school ASSURE - *Adaptation of urban space through sustainable regeneration* – which will develop new knowledge about sustainable renovation and conversion of buildings and neighbourhoods. RISE Research Institutes of Sweden together with Lund University/Faculty of Engineering, Malmö University and Uppsala University, Campus Gotland, has been granted funding by from the Swedish scientific council Formas to run the practice-based graduate school ASSURE. The PhD school runs from 2023 to 2027 and will fund eight doctoral projects that, in close collaboration with the construction and real estate industry, will develop practice-based knowledge about sustainable renovation and transformation of properties, neighborhoods and areas. The network of partners includes four real estate companies: the municipality owned housing group Framtiden, real estate companies Stena Fastigheter, Vasakronan and HSB Malmö, as well as Krook & Tjäder Architects and Structor Projektledning Malmö AB. Two authorities participate as partners in the network: National Board of Housing, Building and Planning and Swedish National Heritage Board. The network also includes the Eurac Research Institute for Renewable Energy as an international partner.

Two broad regional networks for the construction and real estate industry: the Centre for Management in the Construction Sector at Chalmers and the Centre for Real Estate Entrepreneurship at Malmö University are also linked to the graduate school. The networks will contribute with research questions and concrete challenges that can be linked to the doctoral students' research projects.

Acknowledgement:

The research presented in this paper is funded by BoLokal research project funded by E2B2 through the Swedish Energy Agency and the PhD research school ASSURE funded by Swedish Scientific Council Formas.

References

- [1] Johansson, F.; Tornberg, P.; Fernström, A. A function-oriented approach to transport planning in Sweden: Limits and possibilities from a policy perspective. *Transp. Policy* 2018, 63, 30–38.
- [2] European Parliament and Council. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on Waste and Repealing Certain Directives. 2008. Available online: <http://www.reach-compliance.eu/english/legislation/docs/launchers/waste/launch-2008-98-EC.html> (accessed on 8 June 2018).
- [3] Höjer, M and Mjörnell, K., Measures and Steps for More Efficient Use of Buildings. 2019. Sustainability, E-ISSN 2071-1050, Vol. 10, nr 6.
- [4] Francart, N., Höjer, M., Mjörnell, K., Sargon Orahim, A., von Platten, J. and Malmqvist, T. (2020). Sharing indoor space: stakeholders' perspectives and energy metrics. *Buildings and Cities*, 70–85.
- [5] Abdul Hamid, A.; von Platten, J.; Mjörnell, K.; Johansson, D.; Bagge, H. Determining the Impact of High Residential Density on Indoor Environment, Energy Use, and Moisture Loads in Swedish Apartments-and Measures for Mitigation. *Sustainability* 2021, 13, 5446. <https://doi.org/10.3390/su13105446>
- [6] Blakstad, S. A Strategic Approach to adaptability in office buildings. 2001, PhD Thesis, Department of Building Technology, Faculty of Architecture, Planning and Fine Arts at NTNU.
- [7] Küpfer, C, Bastien-Masse, M, Fivet, C., Reuse of concrete components in new construction projects: Critical review of 77 circular precedents, *Journal of Cleaner Production*, Volume 383, 2023, 135235, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135235>.
- [8] National Board of housing building and planning, Swedish Planning and Building Act.
- [9] Mjörnell, K. and Gunér, B. Husbyggaren, September 2023.
- [10] Statistics Sweden SCB, reconstructed apartments in recent years.

A1. Rakenteiden rakennusfysikaalinen suunnittelu ja toteutus

Monitoimiareenan yläpohjarakenne – Manchester, Bradford

Ilari Stenroos ja Andreas Linnell
Sweco Finland Oy

Tiivistelmä

Manchesterin Bradfordiin rakenteilla oleva Co-op Live monitoimiareena on valmistuessaan maan suurin sisäareena, jonka pääkäyttötarkoitus on live musiikkiesitykset ja erilaiset urheilutapahtumat. Korkeiden akustisten vaatimusten takia varsinaisen kattorakenteen alapuolelle tulee paksuja, paljon mineraalivillaa sisältäviä paneeleja. Akustiikkapaneelin ja varsinaisen kattorakenteen väliin jää suljettu ilmaväli, jonka olosuhteiden tulisi pysyä riittävän kuivina. Selvitystyössä pyrittiin lämpö- ja kosteusteknisiä simulointeja käyttäen löytämään ratkaisu, jolla rakenne toimisi passiivisesti eri käyttöolosuhteissa. Lopullinen rakenne saatiin simulointien perusteella toimimaan määritetyissä olosuhteissa hyvin vikasietoisuus huomioiden. Huomioimalla suunnittelussa myös työmaa-aikaiset haasteet kosteudenhallinnan suhteen, saatiin lisävarmuutta rakenteen kosteustekniseen toimivuuteen, mikäli esimerkiksi kosteudenhallinta ei ole toivotulla tasolla.

1. Johdanto

Co-op Live monitoimiareenan yläpohjarakennetta suunniteltaessa huomattiin siihen liittyvän mahdollisia lämpö- ja kosteusteknisiä riskejä, joiden vaikutuksia pyrittiin selvittämään rakennusfysikaalisilla simuloinneilla. Yläpohjarakenne koostuu varsinaisesta vesikattorakenteesta ja sen alapuolelle lisättävästä akustiikkarakenteesta, sekä näiden väliin jäävästä ilmavälistä. Lähtötilanteessa akustiikkarakenteen lämmönvastus oli selvästi ulomman vesikattorakenteen lämmönvastusta suurempi ja höyrynsulku oli puutteellinen. Lisähaasteita tuotti monitoimiareenalle suunniteltu käyttö myös jäähallina noin 13 000:lla katsojalla. Pääosin halli tulee kuitenkin olemaan käytössä musiikkiesityksiä varten, jolloin katsojia voi olla yli 20 000.

Sisäilman kosteuslisä määritettiin erillisin laskelmin tarkkojen lähtötietojen avulla. Rakenteen kuivumiskykyä ja vikasietoisuutta arvioitiin lisäksi laskettua korkeammalla sisäilman kosteudella ja tarkastelemalla tilannetta, jossa rakenteen sisään on jäänyt ylimääräistä kosteutta esimerkiksi työmaa-aikana. Simuloinneissa käytettiin apuna pääosin Wufi Pro 6:ta, minkä lisäksi hyödynnettiin Comsol Multiphysics 6.0 -ohjelmaa lämpötekniikan toimivuuden varmistuksessa.

2. Yläpohjarakenteen rakennusfysikaaliset tutkimukset

2.1 Olosuhdemäärittäykset

Sisä- ja ulkoilmaolosuhteiden määrittämisessä pyrittiin huomioimaan paikalliset ominaisuudet sekä monitoimiareenan käyttötarkoituksen vaihtelevuuden haasteet.

2.1.1 Ulkoilmaolosuhteet

Monitoimiareena sijaitsee Ison-Britannian saarella, Luoteis-Englannissa, missä ilman lämpötila pysyttelee keskimäärin yli 0 °C ympäri vuoden ja suhteellinen kosteus on jatkuvasti melko korkea sateisen ilmaston myötä. Ulkoilmaolosuhteet valittiin yleisessä käytössä olevasta

palvelusta Shiny weather data (ERA5 säädata) [1], mistä löytyy tarkat vuosittaiset alueelliset säätilastot. Sääpalvelussa vertailtiin edellisen vuosikymmenen tilastoja ja niistä valittiin olosuhteiltaan kriittisin vuosi. Rakenteen lämpö- ja kosteusteknisen toimivuuden kannalta kylmä ulkoilman lämpötila aiheuttaa suurimman riskin, joten testivuodeksi valittiin vuosi 2010, joka oli muita viileämpi. Tästä syystä ilmastolämpenemistä ei pidetty kovin suurena riskinä rakenteen toimivuuden kannalta, joten se jätettiin huomiotta.

2.1.2 Sisäilmaolosuhteet

Sisäilman olosuhdemääritykset aloitettiin eri käyttötarkoituksia tutkimalla. Jäähallikäytössä olosuhteiden jäärädalla tulee olla IIHF:n ohjeiden [2] mukaisesti 1,5 m korkeudella pääsääntöisesti +6 °C ja katsomossa +10...15 °C. Hallin huomattavan korkeuden takia lämpötila katon rajassa on siis arviolta > +15 °C paitsi jääradan kohdalla, missä noin -4 °C jään pinta jäähdyttää kattopintaa säteilyn vaikutuksesta. Suhteellisen kosteuden tulee pysyä jääradalla korkeintaan 70 % RH:ssa, jotta jään laatu pysyy hyvänä. Areenaa käytetään jäähallina vain talvikauden aikana ja hyvin lyhyinä jaksoina sisäilman kuivaustarpeen minimoimiseksi. Tämän myötä jäähalliolosuhteiden vaikutus kattorakenteeseen tarkistettiin vain lopulliselle rakenteelle ja vain yhdellä tapauksella; suoraan jääradan yllä.

Konserttikäytön sisäilmaolosuhteet määritettiin aluksi standardin ISO 13788:2012 liitteen A [3] taulukoiden perusteella. Standardin taulukossa on urheiluhallit sijoitettu luokkaan 4, jossa kosteuslisä on 8 g/m³, kun ulkoilman lämpötila on alle 0 °C ja 1 g/m³, kun ulkoilman lämpötila on yli 20 °C. Toisaalta taulukossa esitetty luokka 3, rakennukset tuntemattomalla henkilömäärällä, vastaa myös hyvin käyttötarkoitusta, missä henkilömäärät vaihtelevat huomattavan paljon. Luokassa 3 vastaavat sisäilman kosteuslisän arvot ovat 1...6 g/m³.

Konserttikäytössä sisäilmaolosuhteet ovat väenpaljouden takia riippuvaisia ilmanvaihdon tehokkuudesta, tapahtumien kestosta ja vuosittaisesta tapahtumien lukumäärästä. Standardin mukaan suunnittelussa voidaan käyttää myös erikseen laskennallisesti määritettyjä arvoja [3]. Sisäilman kosteuslisäksi saatiin laskennallisin keinoin 2,3...3,3 g/m³ (kesä-talvi), mikä tarkoittaisi tasaisella +21 °C sisälämpötilalla ja Manchesterin vuoden 2010 ulkoilmaolosuhteilla sisälle suhteellisen kosteuden vaihtelua välillä RH 40...75 %. Laskennalliset arvot olivat linjassa myös kohteen talotekniikkasuunnittelijan laskemien arvojen kanssa, joten niiden katsottiin olevan lähimpänä totuutta ja ne otettiin simulointeihin käyttöön ns. perustilanteen olosuhteina.

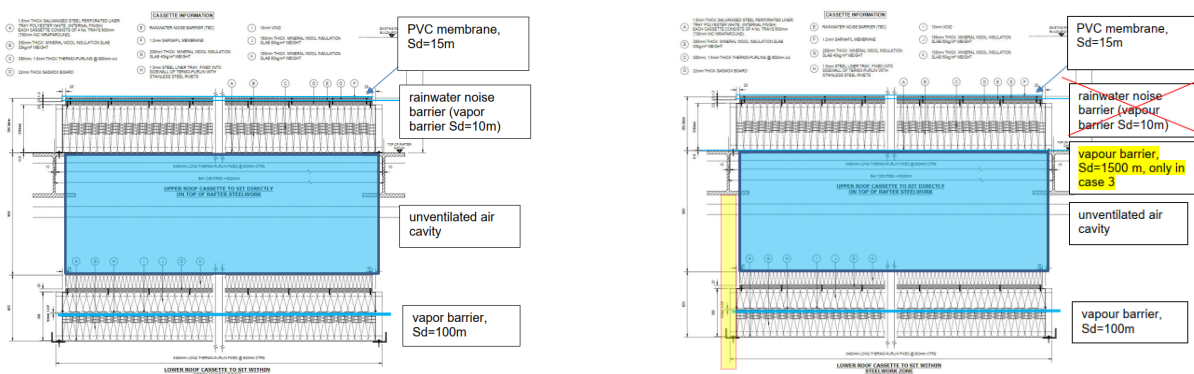
2.2 Rakennusfysikaaliset simuloinnit

Lähtötilanteessa rakenteita tutkittiin vain sisä- ja ulko-olosuhteiden vaikutuksessa ja kattorakenteeseen oletetulla ilmanvuotoluvulla 1 m³/m²h rakennuksen korkeuden perusteella lasketussa ylipaineessa. Lopullisen rakenteen tarkasteluissa simulointeihin lisättiin mm. erilaisia lisäkosteuden arvoja rakenteen vikasietoisuuden osoittamiseksi. Materiaaliominaisuudet pyrittiin valitsemaan siten, että ne vastaavat mahdollisimman hyvin suunnitelmassa esitettyjä materiaaleja. Betonirakenteiden osalta valittiin lujuusominaisuuksiltaan suunnitelmien mukainen materiaali, jolla on huomioitu diffuusiovastuksen ohella myös kapillaarinen kosteuden siirtyminen. Lämmöneristeiden kohdalla otettiin myös huomioon materiaalin lämmönjohtavuuden riippuvuus kosteuspitoisuudesta sekä lämpötilasta.

2.2.1 Lähtötilanteen rakenne

Rakennusfysiikalliset simuloinnit aloitettiin tutkimalla yläpohjarakenteesta tehtyä luonnosta. Rakenne koostui kahdesta osasta, jotka molemmat (vesikatto ja akustinen osa) rakennettaisiin termorei'itetyistä 350 mm korkeista teräsorsista kootuista elementeistä, joiden runkotila on täytetty mineraalivillalla. Tämän lisäksi akustiikkaosan päälle asennettaisiin 100 mm mineraalivillaa ilmavälin äänenvaimennusta varten. Rakenteessa oli siis huomattava määrä mineraalivillaa ja useita eri levykerroksia ja höyrynsulkuna toimisi akustiikkaosan teräsorsien väliin asennettavat peltilevyt. Höyrynsulun hankalan tiivistettävyyden takia haluttiin tutkia, miten rakenne toimisi, jos myös vesikatto-osan alapinnassa olisi höyrynsulku estämässä kosteuden kertymisen vesikatteen alapintaan. Lähtötilanteen rakennetta simuloitiin siten kahdella eri variaatiolla:

1. Höyrynsulku vain akustiikkaosassa
2. Heikompi höyrynsulku akustiikkaosassa ja tiiviimpi vesikattorakenteesta. Lisäksi vesikatteen vanerin alla oleva äänenvaimennusmatto poistettiin rakenteesta.



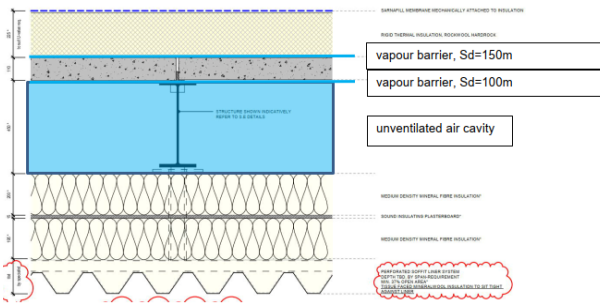
Kuva 1. Lähtötilanteen rakenne. Tapaus 1 (vas.) ja Tapaus 2 (oik.).

Molempien tapauksien simulointien tulokset osoittivat rakenteen heikon kosteusteknisen toimivuuden. Ensimmäisessä tapauksessa kosteutta tiivistyi vesikattorakenteen yläosiin ja toisessa tapauksessa kosteutta tiivistyi runsaasti kattorakenteen ilmaväliin, kun ulkoilman lämpötila laski talvilukemiin.

Lisäksi alkuperäisen rakenteen sisäpuolinen akustoiva rakenneosaa sisälsi huomattavan määrän vaikeasti tiivistettäviä teräsristikon sauvojen läpivientejä, mikä vaikuttaa rakenteen ilmatiivyyteen ja siten myös kosteuskonvektion määrään. Heikosti tuulettuvilla laajoilla yläpohjarakenteilla hyvä ilmatiivisyys on hyvin tärkeä ominaisuus, sillä paine-ero voi korkeassa hallissa olla suuri, jolloin ilmavuodon mukana kulkeutuva sisäilman kosteus voi aiheuttaa merkittävää kosteuden kertymistä rakenteen sisälle. Lisäksi tiivistyskorjausten tekeminen jälkepäin on todella haastavaa ja ilmanvaihdon tehostaminen katon tuuletusvälissä saattaa aiheuttaa vain suuremman kosteuskonvektion ja siten pahentaa tilannetta.

2.2.2 Kehitysvaiheen rakenteet

Lähtötilanteen rakenteen simuloinneista tehtyjen havaintojen perusteella rakennetta kehitettiin helpommin toteutettavaan muotoon huomioiden mm. rakenteiden helppo tiivistettävyyttä (kuva 2). Yläpuolinen vesikattorakenneosaa muutettiin liittolaattarakenteiseksi, minkä päälle tulisi höyrynsulku, kova mineraalivillaeiste ja PVC-kate. Alapuolinen akustoiva rakenne oli edelleen pitkälti samanlainen kuin lähtötilanteessa, mutta nyt vain pelkällä ilmansululla varustettuna. Ilmavälin lämpötila laski tulosten perusteella hyvin alhaiseksi, jolloin sisäilman kosteuden tiivistymisen riski olisi ollut suuri. Rakenne toimisi kuitenkin simuloinnin perusteella hyvin, mikäli ilmaväliä tuuletettaisiin tai lämmitettäisiin.

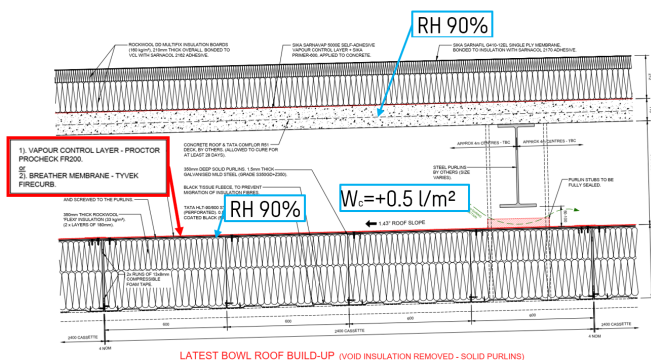


Kuva 2. Yksi kehitysvaiheen rakenteista.

Ilmavälin tuuletusta ja lämmitystä ei haluttu lähteä suunnitelmissa edistämään, vaan rakenne haluttiin saada toimivaksi passiivisin menetelmin. Jotta rakenne toimisi passiivisesti, tulisi rakenteeseen saada mahdollisimman lähelle sisä-/alapintaa riittävän vesihöyrytiivis höyrynsulkukalvo ja ilmaväliin ilmanvaihto tai ilmavälin lämpötila tulisi saada pidettyä mahdollisimman lähellä sisäilman lämpötilaa. Vesikatto-osan rakennetta kehitettiin vielä siten, että liittolaatan päälle tuleekin huomattavan korkean diffuusiovastuksen omaava höyrynsulku Sarnavap 5000E (sd=1800 m). Tällä ei kuitenkaan ollut luonnollisesti vaikutusta muuhun kuin vesikatto-osan lämmöneristetilän kosteustekniseen toimivuuteen.

2.2.3 Lopullinen rakenne

Lopullisen rakenteen poikkileikkaus on esitetty kuvassa 4. Kuvan 2 rakenteeseen verrattuna vesikatto-osan lämmöneristekerrosta on paksunnettu ja akustiikkaosan lämmönvastusta heikennetty vaihtamalla teräsraangat rei'ittämättömiin umpiprofiileihin. Muutoksilla pyrittiin pitämään ilmavälin lämpötila riittävän korkeana myös talviaikaan. Akustiikkaelementin päälle levitettävä kalvo toimii rakentamisen aikaisena sääsuojana sekä ilmansulkuna. Kalvon paikalla tutkittiin myös paloluokiteltua höyrynsulkua. Ilmaväliin oletettiin simuloinnin alkuun työmaa-aikana kertynyttä nestemäistä vettä $0,5 \text{ l/m}^2$, betonin ja akustiikkaelementin yläpinnan sementtikuitulevyn alkukosteudeksi oletettiin RH 90 % (muilla RH 80 %) ja osassa simulointeja huomioitiin ilmaväliin myös toistuva kosteuslisä 50 g/m^2 viitenä kuukautena vuodessa. Tämän avulla pyrittiin vertailemaan rakenteen vikasietoisuutta höyrynsulku- ja ilmansulkuvaihtoehtojen välillä.

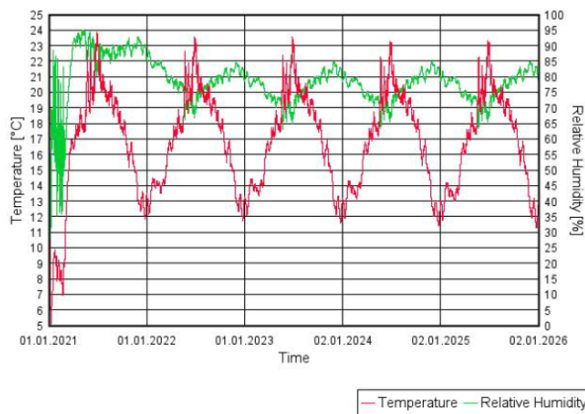


Kuva 3. Lopullisen rakenteen poikkileikkaus. Akustiikkaosan päälle esitettiin höyrynsulku- tai ilmansulkukalvoa, joka toimisi myös työnaikaisena sääsuojana.

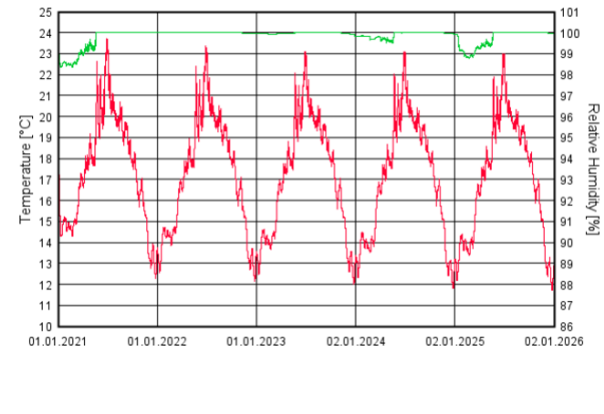
Kuvissa 4 ja 5 esitetyt vasemman puolen kuvaajat osoittavat, että höyrynsulullisessa rakenteessa laskennan alun tuuletusaika ei riitä kuivattamaan rakenteen sisään määritettyjä lisäkosteuksia, jotka on puolestaan esitetty kuvassa 3. Höyrynsulullisessa rakenteessa kun tuuletus loppuu (ilmaväli suljetaan), lämpötila alkaa nousta, mutta rakenteista yhä haihtuva kosteus ei pääse

ilmavälistä pois. Ilmansulkukalvolla varustetussa rakenteessa tuuletuksen loppuminen näkyy myös lämpötilan nousuna, mutta rakenteen kuivuminen jatkuu edelleen sisäänpäin ja kosteudet tasaantuvat nopeasti. Oikean puolen kuvaajista taas näkee, kuinka ilmaväliin viitenä kuukautena vuodessa tuleva kosteuslisä (esim. vuotovedet), jäävät höyrönsulullisessa rakenteessa rakenteen sisään. Ilmansulullisessa rakenteessa sama kosteuslisä aiheuttaa noin 2 %-yksikön nousun ilmavälin suhteellisessa kosteudessa. Tulosten perusteella voidaan siten ilmansulkukalvolla varustetun rakenteen todeta olevan vikasietoisempi ja rakennusfysiikallisesti paremmin toimiva.

Ilmavälin T ja RH - Ilman kuukausittain (5/12) toistuvaa kosteuslisää

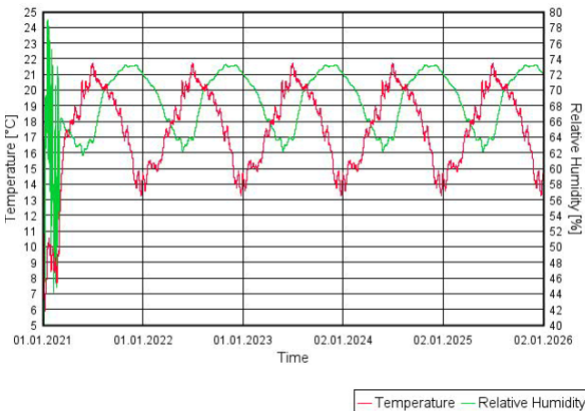


Ilmavälin T ja RH - Kuukausittain (5/12) toistuva kosteuslisä 50 g/m²

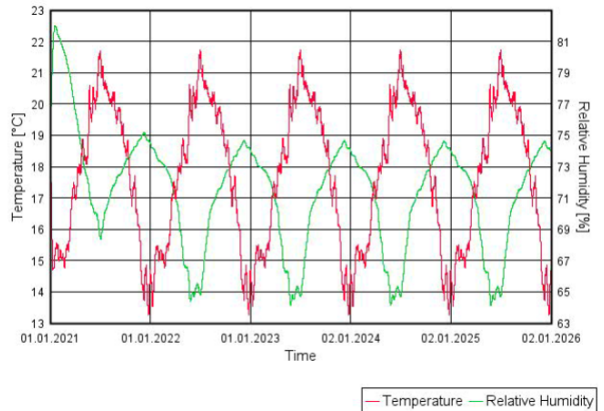


Kuva 4. Höyrönsulkukalvolla varustettu rakenne. Sisäilman kosteuslisä 2,2...3,3 g/m³. Tarkastelupiste liittolaatan alapinnassa (ilmavälissä).

Ilmavälin T ja RH - Ilman kuukausittain (5/12) toistuvaa kosteuslisää



Ilmavälin T ja RH - Kuukausittain (5/12) toistuva kosteuslisä 50 g/m²

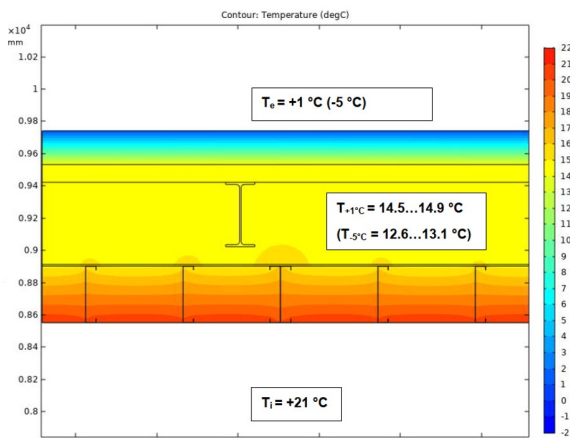


Kuva 5. Ilmansulkukalvolla varustettu rakenne. Sisäilman kosteuslisä 2,2...3,3 g/m³. Tarkastelupiste liittolaatan alapinnassa (ilmavälissä).

Standardin ISO 13788 mukaisella luokan 4 sisäilman kosteuslisällä 1...8 g/m³, nousee ilmavälin suhteellinen kosteus talvella yli kriittisen RH 85 % rajan. Tulosten perusteella rakenne kuitenkin kestäisi vielä luokan 3 mukaisen kosteuslisän 1...6 g/m³, kun kaikki ilmavälissä olevat rakenteet ovat hyvin kosteutta kestäviä (vähintään HHL3). Tulosten perusteella asetettiin ilmanvaihdolle edellytys, että sisäilman kosteuslisä ei saa ylittää 6 g/m³, mikä tarkoittaisi, että talviaikaan sisäilman suhteellinen kosteus saa nousta vain hetkellisesti korkeintaan RH 52...60 % paikkeille.

Rakenteen toimivuus perustuu siihen, että akustiikkaelementtien rei'ittämättömät teräsorret johtavat lämpöä ilmaväliin ja suurimman lämmönvastuksen omaava kerros on liittolaattarakenteen yläpuolella oleva kova mineraalivilla. Wufi Pro 6:lla tehtyä yksiulotteista lämpö- ja kosteusteknistä simulointia varten laskettiin käsin mineraalivillan ja teräsorsien ekvivalentti lämmönvastus. Lämmön siirtymistä teräsorsia pitkin tutkittiin kuitenkin vielä erikseen Comsol

Multiphysicsilla suoritetulla 2D laskelmalla (kuva 6). Laskennan mukaan ilmavälin lämpötila vastasi tarkasti Wufi Pro 6:lla saatuja talviajan lämpötiloja, joten laskelmien mukaisen lämpövirran vaikutuksen todettiin olevan riittävän todenmukainen.



Kuva 6. Lämmön siirtymistä umpiteräsorsia pitkin tutkittiin 2D lämpötilamallinnuksella.

3. Yhteenveto

Co-op Live monitoimiareenan akustisesti haastava yläpohjarakenne herätti kerroksellisuutensa takia epäilyjä sen lämpö- ja kosteusteknisestä toimivuudesta. Rakennusfysikaaliset simuloinnit osoittivat, että alkuperäisten suunnitelmien mukaisella rakenteella olisi ollut riskinä sisäilman kosteuden tiivistyminen rakenteen keskellä olevaan tuulettumattoman ilmaväliin. Myös alemman rakenneosan saaminen ilmatiiviiksi olisi ollut erityisen haastavaa lukuisten teräsristikon sauvojen läpivientien takia. Lisäksi rakennuksen ajoittainen käyttö jäähallina asetti omat vaatimuksensa rakenteen toimivuudelle, mutta jäähallikäytön ajoittuminen talviaikaan ja hyvin lyhyet, muutaman viikon mittaiset käyttöjaksot eivät osoittautuneet kriittisiksi yläpohjan lämpö- ja kosteusteknisestä toimivuuden kannalta.

Akustiikkapaneelit asennetaan kattoristikoiden päälle ensimmäisenä ja niiden päälle levitetään diffuusioavoin sääsuojakalvo. Akustiikkapaneeleja lävistää teräsristikoiden päälle tulevat teräspukit ja palkisto, joiden päälle rakennetaan varsinainen liittolaattarunkoinen vesikattorakenne. Rakenteen toiminta perustuu siihen, että paljon mineraalivillaa sisältävien akustiikkapaneelien teräsorret ovat rei'ittämättömiä umpiprofiileja, jotta niiden kautta johtuisi lämpöenergiaa akustiikkapaneelien yläpuoliseen ilmaväliin. Akustiikkapaneelit pyritään saamaan hyvin ilmatiiviiksi ilmavuotojen estämiseksi, mutta samalla rakenteen vesihöyrynvastuksen tulee olla riittävän alhainen, jotta ilmaväliin esimerkiksi työmaa-aikana jäävä kosteus pääsee kuivumaan sisään päin. Haastavan kehitystyön lopputuloksena saavutettiin passiivisesti toimiva rakenne, joka toimii ilman riskiä sisäilman kosteuden tiivistymisestä, kun talviaikana suurin sallittu sisäilman kosteuslisä rajattiin arvoon 6 g/m³.

Lähdeluettelo

- [1] Shiny weather data -sääpalvelu, Manchester (53.5°, -2.25°, 143 m, 0.35 m) vuosi 2010, Saatavilla: <https://shinyweatherdata.com/>
- [2] Bogomoloff Harry & al. 2016. IIHF Ice Rink Guide. International Ice Hockey Federation.
- [3] SFS-EN ISO 13788:2012 Hygrothermal performance of building components and building elements. Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation. Calculation methods. 2013. Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

Finlandia-talon julkisivumateriaalin valintaprosessi ja valintaan vaikuttaneet tekijät

Jyrki Jalli
IdeaStructura Oy

Tiivistelmä

Helsingin kaupunki teetti 2016–2019 uuden julkisivumateriaalin löytämiseksi monivaiheisen selvityksen, jonka tulosten perusteella julkisivumateriaaliksi valittiin marmori, tällä kertaa Pohjois-Italiasta Lasan laaksosta. Valintaprosessin käynnistyessä kaikki materiaaliveitohdot pidettiin pöydällä. Monialaisen työryhmän työn perusteella jatkoselvitykseen valittiin neljä eri materiaaliveitohdtoa: marmori, graniitti, sintrattu kivi ja valkobetoni. Materiaalien käyttöikäominaisuuksia tutkittiin teoriaselvitysten, kenttä- ja laboratoriokokeiden, kiihdytettyjen rasituskokeiden sekä Finlandia-talon katolle asennetun koeseinän avulla. Käyttöikäselvitysten perusteella voitiin todeta, että kaikki testatut materiaalit täyttivät asetetun 50 vuoden käyttöikävaatimuksen. Siten lopullinen valinta voitiin tehdä rakennussuojelullisten ja arkkitehtonisten argumenttien perusteella. Tätä esteettistä valintaprosessia varten laadittiin oma prosessi, jolla edellä mainittuja, ei teknisiä, arviointikriteereitä arvioitiin.

1. Johdanto

Julkisivumateriaalin valintaprosessi jakaantui kahteen osaan: tekniseen ja esteettiseen. Tämä esitys käsittelee teknistä valintaprosessia, jonka tarkoituksena oli varmistaa, että materiaaliveitohdot, joita voidaan harkita käytettäväksi julkisivun uusimiseen, täyttävät Helsingin kaupungin asettaman 50 vuoden käyttöikävaatimuksen. Pääsuunnittelijan johtamassa esteettisessä valintaprosessissa luotiin ensin arviointikriteerit, ja kriteerien painoarvot. Kaikki materiaalit pisteytettiin arviointikriteerien perusteella ja näin päästiin vertaamaan materiaaleja numeraalisesti myös esteettisten ominaisuuksien osalta.

Julkisivuhankkeen selvitystyöryhmä oli monialainen ja asiaan perehtynyt. Helsingin kaupungilta hanketta veti arkkitehti Merja Ikonen, pääsuunnittelijana toimi arkkitehti Teemu Tuomi Arkkitehdit NRT Oy:ltä ja tutkimuskoordinaattorina DI Jyrki Jalli Ideastructura Oy:stä. Lisäksi mukana oli lukuisia asiantuntijoita niin rakennussuojelun ja arkkitehtuurin historian kuin materiaalien kestävyystutkimuksen ja materiaaliteknologian aloilta.

2. Tekninen valintaprosessi

2.1 Kaikki materiaaliveitohdot olivat avoinna

Julkisivumateriaalin uusimisessa selvitettiin vaihtoehtoja perusteellisesti ja laaja-alaisesti antamatta eri osapuolten ennakkokäsitysten rajata pois mitään vaihtoehtoa. Materiaaliselvityksissä oli alusta lähtien kaksi erillistä tutkimuslinjaa – marmorit ja vaihtoehtoiset materiaalit. Vaikka Finlandia-talo on verhoiltu marmorilla jo kahdesti ja molemmilla kerroilla marmorin elinkaari on ollut toivottua lyhyempi, oli selvitettävä, löytyisikö uuden tutkimustiedon valossa kestävämpää marmorilaatua. Myös vaihtoehtoisista materiaaleista etsittiin sellaista, joka voisi täyttää suojelupäätöksen reunaehdot ja olla teknisiltä ominaisuuksiltaan vaatimukset

täyttävä. Koska vaihtoehtoisia materiaaleja on lukemattomia, määriteltiin valintakriteerit, joilla soveltuvien materiaalien määrää voitiin perustellusti rajata.

2.2 Valinta tarkempiin tutkimuksiin

Ensimmäisen vaiheen jälkeen karsittiin ne materiaalit, jotka eivät kaupunkikuvallisten, arkkitehtonisten tai teknisten ominaisuuksien vuoksi tulleet kyseeseen. Näitä materiaaleja olivat esimerkiksi lasi, pelti ja puu. Myös alkaliaktivoituviin sideaineisiin perustuvia materiaaleja selvitettiin, mutta todettiin, ettei niiden kaupallinen kehitysaste ollut vielä siinä vaiheessa, että niitä voitaisiin soveltaa Finlandia-talon kokoluokan hankkeeseen.

Tarkempiin tutkimuksiin valittiin marmori, vaalea graniitti, valkobetoni sekä sintrattu kivi. Jo vuonna 2018, siis neljä vuotta ennen korjaushankkeen käynnistymistä, rakennettiin Finlandia-talon katolle koeseinä todellisuutta vastaaviin olosuhteisiin. Tarkoituksena oli tarkkailla koelaattojen mahdollisia ulkonäön tai muodon muutoksia pitemmällä aikavälillä. Erityinen huomio kiinnitettiin marmorisiin ja betoniin, koska niissä ikääntymisen merkkejä saattaa alkaa ilmetä jo ensimmäisinä vuosina. Marmorilaatathan alkoivat edellisen korjaushankkeen osalta käyristyä silmin nähden jo ensimmäisen seinälläolovuoden aikana.

2.2.1 Betonia varten kehitettiin oma resepti

Markkinoilla on ollut jo jonkin aikaa valkobetonelementeistä valmistettuja ohuita julkisivutuotteita. Sellaista vaihtoehtoa, jossa tilaaja voisi vaikuttaa laattojen ulkonäköön ei kuitenkaan löytynyt, kuten ei myöskään vaihtoehtoa, joka olisi jo sellaisenaan täyttänyt asetetut ulkonäkövaatimukset. Tämän vuoksi tilaaja päätti selvittää, voitaisiinko Finlandia-taloon varten kehittää oma betoniresepti, jonka avulla julkisivulaatat voitaisiin suhteuttaa sekä ulkonäöltään että teknisiltä ominaisuuksiltaan Finlandia-taloon soveltuviksi.

Reseptiä kehittämään ryhtyivät betonitaiteilija Pertti Kukkonen sekä betonitekniikan tohtori Risto Mannonen. Koeseinälaattojen valmistuksen yhteydessä käynnistettiin diplomityö [1], jonka avulla pyrittiin varmistamaan kehitetyn reseptin mukaisesti valmistettujen laattojen pitkäaikaiskestävyys.

Kehitystyön tuloksena, monien koe-erien jälkeen löydettiin vaihtoehto, joka vastasi ulkonäöltään tavoitteita. Vuonna 2018 valmistettiin ensimmäiset täysimittaiset laatat Finlandia-talon katolle rakennettavaan koeseinään. Seuraavassa vaiheessa ulkonäkövaatimuksia tarkennettiin ja valmistettiin seuraavat täysimittaiset laatat. Kyseiset laatat vietiin kiihdytettyihin rasituskokeisiin. Rasitetuille laatoille suoritettiin betonille tyypillisiä laboratoriokokeita.

2.2.2 Sintrattu kivi

Sintrattu kivi on luonnonmineraaleista synteettisesti valmistettu materiaali. Markkinoilla on useita samoilla tekniikoilla valmistettuja tuotteita, joilla on CE-merkki ja joiden ominaisuudet ovat lähtökohtaisesti tutkittuja ja dokumentoituja. Tuotannon laatua varmistetaan jatkuvasti. Näin ollen todettiin, ettei sintratulle kivelle ole syytä tehdä tutkimuksia, koska tuloksia oli jo riittävästi olemassa ja käytettävissä. Kuitenkin myös sintratun kiven osalta valmistettiin laatat, jotka asennettiin koeseinään tutkittavaksi. Koeseinällä tehdyt mittaukset myös vahvistivat näkemyksen, jonka mukaan sintrattu kivi sopii teknisten ominaisuuksien puolesta julkisivuilla käytettäväksi. Sintrattujen kivien isoimpana haasteena oli täyttää esteettiset kriteerit.

2.2.3 Graniitti

Graniitin ominaisuudet tunnetaan Suomessa hyvin ja käyttökokemuksia on laajasti. Graniitti tiedetään lujaksi ja hyvin sääolosuhteita sietäväksi materiaaliksi. Siten graniitin ominaisuuksia ei lähdetty tutkimaan yksityiskohtaisemmin. Ulkonäkönsä puolesta soveltuvia graniitteja kartoitettiin ja koeseinään valittiin Bethel White, jota louhitaan ja jalostetaan Pohjois-Amerikassa. Pintakäsittely vaikuttaa paljon vaalean graniitin ulkonäköön ja vaaleuteen. Tavoitteena oli löytää mahdollisimman vaalea vaikutelma ja se saavutettiin rikkomalla pinta mekaanisesti ristipäähakkauksella.

2.2.4 Marmori

Laajimmat ja kattavimmat tutkimukset ja selvitykset tehtiin marmorille [2]. Hankkeeseen kiinnitettiin asiantuntijat Björn Schouenborg, RISE, Ruotsi sekä Bent Grelg, Ramboll, Tanska. Molemmat ovat maailman laajuisesti tunnustettuja marmoriasiantuntijoita.

Potentiaalisten marmorivaihtojen kartoitus kohdistettiin pääasiassa Italian alueelle tiedostaen, että marmoria tuotetaan myös muissa maissa. Ensimmäisessä listassa vaihtoehtoja oli kymmeniä. Marmoriasiantuntijoiden aikaisempien tutkimusten ja kokemusten valossa tarkempiin selvityksiin valittiin viisi marmoria, neljä Italiasta ja yksi Portugalista Estremozista.

Kustakin valitusta laadusta tehtiin koekappaleet, jotka asennettiin koeseinälle. Marmoreille tehtiin myös laajat laboratoriokokeet. Erityistä huomiota kiinnitettiin laadun varmistukseen eli siihen, kuinka toimittajat analysoivat ja seuraavat marmorin laatua louhokselta eri valmistusvaiheiden jälkeen asennuspaikalle.

2.3 Tutkimukset

2.3.1 Koeseinä



Kuva 1. Finlandia-talon katolle asennettu koeseinä, johon tutkittavat materiaaliveitohdot on asennettu.

Finlandia-talon katolle tehtiin kaikille materiaaleille yhteinen koeseinä, johon asennettiin neljä laattaa kustakin potentiaalisesta materiaaliveitohdosta: viidestä erityyppisestä marmorista, valkobetonista, sintratusta kivistä sekä graniitista. Koeseinän avulla

oli tarkoitus tutkia materiaalin ulkonäköä ja niiden soveltuvuutta julkisivuun. Kestävyysmielessä tavoitteena oli selvittää, käynnistyykö koelaatoissa vaurioitumisprosesseja. Koeseinä on pystytetty kesäkuussa 2018.

Silmämääräisen tarkastelun lisäksi on mitattu koelaattojen käyritystä, värimuutosta sekä ultraäänennopeuden muutosta. Viimeksi mainittu korreloi materiaalin lujuuden kanssa ja sitä voidaan hyödyntää lujuuden muutosten havaitsemisessa. Koeseinän seuranta jatketaan siihen asti, kunnes koeseinä joudutaan purkamaan tulevan peruskorjaushankkeen myötä.

2.3.2 Laboratoriotutkimukset

Laboratoriotutkimuksia tehtiin betonin ja marmorin osalta Vahanen Oy:n (nyk. Afry Oyj) materiaalilaboratoriossa. Marmorien esikarsinta sekä standardien mukaiset laboratoriotestit suoritettiin Ruotsin valtiollisessa tutkimuskeskuksessa RISE:ssä sekä Kööpenhaminan yliopiston laboratoriossa.

2.4 Materiaalien tekninen soveltuvuus

Tilaja oli asettanut käyttöikätaavoitteeksi 50 vuotta. Käyttöiän aikana julkisivussa ei saa esiintyä merkittäviä ulkonäkömuutoksia, merkittävää vaurioitumista tai silminnähtävää muodonmuutoksia.

2.4.1 Sintrattu kivi

Selvitysten perusteella voitiin todeta, että sintrattu kivi suurella todennäköisyydellä kestää asetetun 50 vuoden käyttöiän. Materiaalin vedenimukyky on erittäin pieni ja siten myös kosteuden aiheuttamat ikääntymis- tai vaurioitumisilmiöt epätodennäköisiä tai merkityksettömän hitaita. Materiaali on luonteeltaan erittäin lujaa ja samalla haurasta. Mekaanisen kuormituksen ja/tai laattoihin kohdistuvien pakkovoimien aiheuttamat murtumat nähtiinkin riskinä, mutta kuitenkin niin vähäisenä, ettei niitä lähdetty tarkemmin selvittämään tutkimusvaiheessa. Mikäli sintrattu kivi olisi tullut valituksi, olisi nämäkin ominaisuudet tulleet selvitettäväksi tarkemmin. Sintrattujen kivien suurimpana haasteena on valmistusprosessista aiheutuva teollinen ulkoasu. Valmistajan toimesta pääsuunnittelijan ohjauksessa selvitettiin mahdollisuuksia saada aikaan epäyhtenäistä pintakuviointia. Esteettistä vaikutelmaa haettiin koelaattojen avulla ja siten päästiinkin hyvään lopputulokseen.

2.4.2 Graniitti

Tehdyn arvioinnin perusteella voitiin myös graniitille todeta yli 50 vuoden käyttöikä. Graniitista ja muistakin kivilaaduista on tehty ohuita julkisivurakenteita, joista on kokemusta jo kymmenien vuosien ajalta, eikä merkittävää vaurioitumista tai käyritystä kentällä ole havaittu. Graniitin lujuus on korkea ja vedenimukyky suhteellisen pieni. Suurin uhka graniitin kestävyydelle on pakkasrapautuminen, mutta vaikka materiaali on rakenteeltaan huokoinen, on siihen imeytyvän veden määrä pieni ja näin voitiin päätellä, että rapautumisriski on merkityksettömän pieni. Matala vedenimukyky johtaa siihen, että vesirasitus kohdistuu ulompaan pintakerrokseen, joka voi menettää rakennettaan eroosiosta seurauksena. Tällä saattaa olla pitkällä aikajänteellä vaikutusta rakenteen pinnan ulkonäköön löyhtyneen pintarakenteen kerätessä ehjää pintaa helpommin ilman epäpuhtauksia. Koeseinän avulla voitiin todeta, että kastuessaan graniitti tummuu. Tämän ominaisuuden seurauksena graniitti menetti pisteitä esteettisessä vertailussa.

2.4.3 Betoni

Betonia pidettiin potentiaalisena vaihtoehtona sekä ulkonäön että teknisten ominaisuuksien osalta. Suurimpina käyttöikää uhkaavina tekijöinä pidettiin pakkasenkestävyyttä, käyritymistä sekä vaurioitumista asennuksen aikana. Laatat tehtiin raudoittamattomina ja siten kovettumisen aikaiset muodonmuutokset olivat mahdollisia.

Laboratoriotutkimusten perusteella voitiin todeta, että betonin lujuus asettui alueelle 50–60 MPa (28 vrk 150x150x150 mittaustulos oli 58 MPa), kuivumiskutistuman suuruus vaihteli 0,4-0,6 mm/m välillä, kovettumisvaiheen käyritymä oli pientä ja sallituissa rajoissa. Koeseinällä muutokset olivat hyvin pieniä. Koeseinäasennusten perusteella voitiin todeta, että laatat kestävät hyvin muottien purun, varastoinnin, kuljetuksen ja asennuksen aiheuttamat rasitukset.

2.4.4 Marmori

Lämpötila ja kosteusvaihtelut ovat pääasiallinen syy marmorin lujuuden menetykseen ja ohuiden marmorilevyjen käyritymiseen. Selvitykset ja tutkimukset kohdistuivat juuri näihin asioihin. Taustatietona hyödynnettiin laajaa yleiseurooppalaista TEAM-hanketta, jossa marmorin ominaisuuksia on tutkittu kentällä, laboratoriossa sekä teoreettisesti. Hankkeessa hyödynnettiin suhteellisen tuoretta (2013) standardia EN16306, jossa kuvataan marmorin pitkäaikaiskestävyyden varmistamiseen liittyvät tutkimusmenetelmät. Standardia tarkennettiin hankkeen yhteydessä.

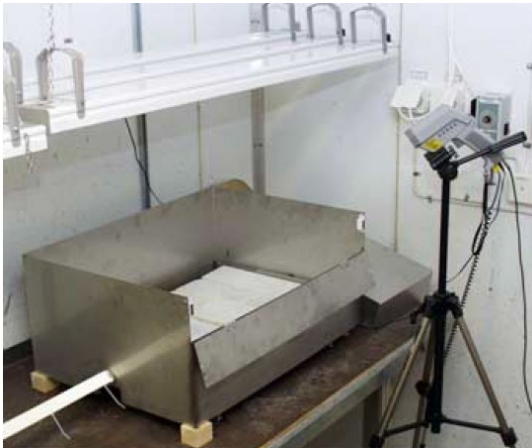
Koeseinällä mitattiin marmorilevyjen käyrityksiä. Laattoja asennettiin keväästä syksyyn vuonna 2018. Ensimmäiset mittaukset suoritettiin heti laattojen asennusten jälkeen ja testit jatkuivat aina tammikuuhun 2023 asti, kun koeseinä purettiin väliaikaisesti rakentamisen tieltä. Koeseinä tullaan asentamaan takaisin tulevaisuuden vertailuja varten. Neljässä marmorilaadussa ei havaittu käyrityksiä. Yhden marmorilaadun osalta käyrityksiä kuitenkin esiintyi jo suhteellisen lyhyen käyttöikäjakson jälkeen, mikä johti tämän marmorin hylkäämiseen jatkotutkimuksista.

Laboratoriossa tutkimukset tehtiin noudattaen standardia EN16306, jonka mukaan marmorista tutkitaan vedenimukyky, taivutusvetolujuus, AGA-arvo sekä taivutusvetolujuus kiihdytetyn rasituskokeen jälkeen. Viimeksi mainittu on oleellinen käyritysmistaipumusta arvioitaessa. Rasituskokeessa koekappaleisiin kohdistetaan toispuoleinen kosteusrasitus sekä lämpötilarasitus, joita toistetaan syklisesti 50 kertaa. Koejärjestelyn tarkoituksena on varmistaa, että muodonmuutokset ovat pieniä ja pysähtyvät kokeen edetessä. Jos muodonmuutokset eivät pysähdy 50 syklin aikana, syklisiä rasitusta jatketaan. Koekappaleet täyttävät standardin vaatimukset, jos käyritymä jää kokeen jälkeen pienemmäksi kuin 0,4 mm/1000 mm.

Taulukko 1. Laboratoriokokeiden ohjelma marmorin laadun varmistamiseksi.

No	Ominaisuus	Standardi	Laboratorio
1	Taivutusvetolujuus (50*50*300 mm ³)	EN 12372	Rise
2	Murtumakuorma kiinnikkeiden kohdalla	EN 13364	Rise
3	Tiheys	Lisätty EN 13755	Rise
4	Vedenimu ilmakehän paineessa	EN 13755	Rise
5	Taipumus värjäytymiselle	EN 16140	Rise
6	Petrograafinen analyysi sisältäen AGA:n (Mikrorakenteen määrittäminen)	EN 12407 ja EN 16306 Liite	Rise
7	Lämpö- ja kosteusliikkeiden vastustuskyky	EN 16306	Rise
8	Sama kuin yllä mutta nopea tarkastelu	(EN 16306)	Ramboll/DK
9	Lämpölaajenemiskerroin	Draft EN TC246/WG2 N688	Ramboll/DK

Koeseinän laatoista mitattiin myös ultraäänipulssin nopeus EN 14579-standardin mukaisesti.



Kuva 2. Sääräsituskokeen järjestely, EN 16306 mukainen koejärjestely. Marmorit ovat kontaktissa veteen alapinnastaan ja yläpuolelta kappaleita lämmitetään. Lämpötilaa hallitaan mustan referenssikappaleen avulla.

On tyypillistä, että marmorin ja muidenkin kivilajien toimitusketju on moniportainen. Ketju voi koostua esimerkiksi seuraavista peräkkäisistä toimijoista: louhintayritys, raakasahauksen tekevä yritys, viimeistelijäyritys, tukkuri, maahantuojaja, urakoitsija. Tässä ketjussa kivien jäljitettävyyden on huono. Tämä lienee yksi juurisyy lukuisiin epäonnistumisiin maailmalla ja meilläkin. Finlandia-talon osalta jäljitettävyyden merkitys korostui kahdessa suhteessa: toimitusketjun luotettavuus sekä mahdollisuus tutustua marmoreiden referenssikohteisiin. Tässä suhteessa valittu marmorilaatu erottui muista marmoreista. Toimittaja pystyi nimeämään referenssikohteet, joista vanhimmat olivat kymmenien vuosien takaa, ja selvitysryhmä pääsi tutustumaan niihin.

3. Yhteenveto

Finlandia-talon marmorin valinta oli monivaiheinen ja tarkentuva prosessi. Tutkimuksessa oli kaksi selvää päälinjaa: marmori ja muut materiaalit. Perusteellisten tutkimusten perusteella voitiin todeta, että 50 vuoden käyttöikä oli saavutettavissa kaikilla tarkemmin tutkituilla materiaaleilla: marmorilla, graniitilla, betonilla ja sintratulla kivellä. Tutkimuksessa näitä ei asetettu käyttöikänsä mukaiseen järjestykseen. Marmorin käyttöikä varmistettiin laboratoriotutkimusten, laajan referenssiaineiston, kiihdytetyn rasituskokeen sekä koeseinällä tehtyjen havaintojen avulla. Teknisen arviointiprosessin tulosten perusteella lopullinen valinta voitiin tehdä esteettisiin ja rakennushistoriallisiin kriteereihin perustuen.

Lähdeluettelo

- [1] Parkkila, J. Ohuet valkobetoni valmistetut julkisivut ja niiden käyristyminen. Diplomityö, Tampereen yliopisto. 69 s.
- [2] Schouenborg, B ja Grelg, B, Report-Quality Assurance Program for Finlandia Halls Façade, 28.2.2020. 49 s.
- [3] B. Schouenborg, Grelk B., Malaga K., Testing and Assessment of Marble and Limestone (TEAM) Important Results from a Large European Research Project on Cladding Panels. Journal of ASTM International, Vol. 4, No5. 14 s.

Kalsiumsilikaattilevyjen kosteusteknisen toimivuuden vertailu sisäpuolelta lisälämmöneristetyissä suojelluissa rakennuksissa

Teemu Jokela
Sweco Finland Oy

Tiivistelmä

Suojeltujen rakennusten korjausten yhteydessä halutaan monesti parantaa rakennuksen energiatehokkuutta, mutta julkisivun suojeleminen tuo reunaehtoja lisäeristämisen valintaan. Tällaisissa tapauksissa tulee monesti ratkaisuksi sisäpuolinen lisälämmöneristäminen, joka on rakenteen kosteusteknisen toimivuuden kannalta kriittinen asia. Kalsiumsilikaattilevyjä on usein käytetty sisäpuoliseen lisälämmöneristämiseen niiden tarkoitukseen sopivien suotuisten lämpö- ja kosteusteknisten ominaisuuksien takia. Lämmönvastus ei saa olla liian suuri, jotta olemassa oleva rakenne ei viilene liikaa, ja kosteudensiirtokyky on oltava riittävä, jotta sisäänpäin kuivuminen olisi riittävän nopeaa. Tässä case-tutkimuksessa suunniteltiin kahden suojellun rakennuksen ulkoseinään sisäpuolista lämmöneristystä, jota varten vertailtiin eri kalsiumsilikaattilevyjen toimivuutta laskennallisilla simulointitarkasteluilla. Vanhat, olemassa olevat seinät olivat tiili- ja betonitiilimuurattuja. Eri kalsiumsilikaattilevytuotteilla on eroavia kosteusteknisiä ominaisuuksia, ja kosteusteknisesti parhaiten toimivat ne, joilla oli eniten kosteudensiirtokykyä. Kalsiumsilikaattilevyeristystä valittaessa onkin kiinnitettävä erityistä huomiota tähän ominaisuuteen, jotta lisäeristetty rakenne olisi kosteusteknisesti toimiva ja vikasietoinen muuttuvissa tulevaisuuden ilmasto-olosuhteissa.

1. Johdanto

Rakennusperintölaki turvaa kulttuuriympäristölle ajallista ja alueellista monimuotoisuutta ja vaalii sen ominaisluonnetta ja erityispiirteitä. Lain nojalla voidaan suojella mm. rakennuksia, joilla on merkitystä rakennushistorian, rakennustaiteen, rakennustekniikan, erityisten ympäristöarvojen tai rakennuksen käytön kannalta. ELY-keskukset ja Museovirasto edistävät ja valvovat tätä rakennusperinnön säilyttämistä rakennusperintölain nojalla.

Suojelumääräyksiä voi olla monenlaisia, mutta yleinen korjausrakentamisessa vastaantuleva on julkisivun säilyttäminen alkuperäisenä. Korjaustoimenpiteiden seurauksena halutaan monesti samalla parantaa rakennuksen energiatehokkuutta, ja siihen voi olla myös syynä esimerkiksi rakennuksen käyttötarkoituksen muutos.

Vaatus julkisivun pysymisestä alkuperäisenä ja koskemattomana vaatii rakennuksen energiatehokkuuden parantaminen monesti olemassa olevan rakenteen sisäpuolista lisälämmöneristystä. Tällöin olemassa oleva rakenne viilenee, ja siten kosteus voi lisääntyä ja pysyä rakenteessa pidempään, joka voi aiheuttaa rakenteen kosteusteknisen toimivuuden heikkenemisen. Siten rakennuksen terveellinen käyttö voi vaarantua, jos rakenteissa alkaa syntyä esimerkiksi mikrobivaurioita.

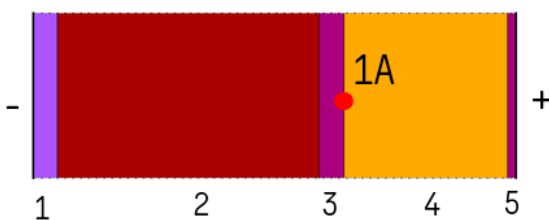
Tässä case-tutkimuksessa tutkittiin laskennallisin simulointitarkasteluin kahden olemassa olevan suojellun rakennuksen lisälämmöneristämistä kalsiumsilikaattilevyillä. Vertailtavana oli eri tuotteita, joille oli saatavissa riittävät lämpö- ja kosteustekniset materiaaliominaisuudet, joita

voitiin käyttää simulointitarkasteluissa. Tutkittavat alkuperäiset rakenteet olivat tiilimuurattu ja betonitiilimuurattu ulkoseinärakenne.

Tässä tutkimuksessa saadut tulokset koskevat vain tarkasteltuja rakenteita ja tässä tutkimuksessa valittuja olosuhteita, joten muissa rakenteissa ja olosuhteissa kosteustekninen toiminta on tarkastettava erikseen.

2. Lähtötiedot ja menetelmät

Tarkastellut seinärakenteet ja niistä tehdyt 1D-/2D-laskentamallit on esitetty kuvissa 1 ja 2. Rakenteen lämpö- ja kosteustekniset simuloinnit tehtiin Delphin 6.1.5 -ohjelmalla, jolla voidaan numeerisesti ratkaista lämmön ja kosteuden siirtymistä muuttuvissa ulko- ja sisäilman olosuhteissa. Rakenteen toimivuuden arviointi perustui Suomalaiseen homemallin, jossa kriittisenä raja-arvoja käytettiin homeindeksin maksimiarvoa $M_{\max} < 1$.



Kuva 1. Rakenteen 1 laskentamalli. Tarkastelukohta on esitetty punaisella. Rakennekerrokset: 1 Rappaus 15 mm, 2 Tiilimuraus 160 mm, 3 Tasoite 15 mm, 4 Kalsiumsilikaattieriste 100 mm ja 5 Tasoite 5 mm ($sd=0,05$ m).



Kuva 2. Rakenteen 2 laskentamalli. Tarkastelukohtat on esitetty punaisella. Rakennekerrokset: 1 Kuultorappaus 3 mm, 2 Betonitiilimuraus 250 mm (x 30 mm), 3 Muurauslaasti 150 mm (x 10 mm), 4 Oikaisulaasti 10 mm, 5 Kalsiumsilikaattilevy 100 mm ja 6 Tasoite 5 mm ($sd=0,05$ m).

Tutkittavien kalsiumsilikaattilevytuotteiden lämpö- ja kosteustekniset materiaaliominaisuudet saatiin Tampereen yliopistolla tehdystä tutkimuksesta [1]. Lämmönjohtavuuden arvoina kuivalle materiaalille käytettiin kuitenkin valmistajien ilmoittamia arvoja, jos ne oli ilmoitettu tavanomaiselle käyttölämpötilalle. Tässä tutkimuksessa käytetyt kuivan materiaalin lämmönjohtavuudet on esitetty taulukossa 1. Lämmönjohtavuudet kosteuspitoisuuden mukaan otettiin huomioon laskentaohjelman oletusasetusten mukaisesti. Muut mittaustulokset on esitetty taulukossa 2. Taulukossa 3 on esitetty kalsiumsilikaattilevyjen tasapainokosteudet adsorptiossa ja desorptiossa huonelämpötilassa. Laskentaohjelmassa käytettiin keskiarvoja näistä tasapainokosteuksista. Myös kapillaarisen alueen tasapainokosteudet määritettiin lähteestä [1].

Taulukko 1. Kuivan materiaalin lämmönjohtavuudet, joita on käytetty tässä tutkimuksessa.

Materiaali	Lämmönjohtavuus [W/(mK)]
Kasil E	0,063
Promasil 1000	0,071 [1]
Epatherm	0,067
Skamotec 225	0,072 [1]
Kasil Pura	0,042

Taulukko 2. Kalsiumsilikaattilevyjen lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet. [1]

Lämmönjohtavuuden arvoina (kuivalle materiaalille) käytettiin kuitenkin materiaalivalmistajien ilmoittamia arvoja, jos niille oli ilmoitettu arvo normaalissa käyttölämpötilassa. Muutoin käytettiin taulukon arvoja.

Materiaali	h [mm]	ρ_{dry} [kg/m ³]	$\delta_v \cdot 10^{-6}$ [m ² /s]	A_w [kg/m ² s ^{0,5}]	W_{cap} [kg(m ³)]	λ [W/mK]	c_p [J/kgK]
Kasil E	25	253	8,14	1,182	832	0,076	860
Promasil 1000	25	232	7,98	1,199	839	0,071	790
Epatherm	30	236	9,32	1,288	837	0,070	830
Skamotec 225	50	227	10,8	0,643	700	0,072	820
Kasil Pura	50	133	11,7	0,137	347	0,053	910

Taulukko 3. Kalsiumsilikaattilevyjen tasapainokosteudet huoneenlämmössä adsorptiossa ja desorptiossa (sitoutunut kosteus tilavuutta kohden, kg/m³). [1]

RH %	Adsorption						Desorption				
	33	57	75	85	93	97	93	85	75	57	33
Kasil E	3,2	4,1	5,3	6,5	10,7	34,1	18,5	14,6	13,4	12,0	11,2
Promasil 1000	3,2	4,1	5,5	7,1	12,7	36,2	20,8	16,7	15,4	14,1	13,2
Epatherm	3,5	4,2	5,2	6,3	10,1	26,4	16,5	13,6	12,6	11,5	10,9
Skamotec 225	2,7	3,8	5,8	8,2	15,0	38,5	23,3	16,5	14,9	13,3	12,3
Kasil Pura	4,0	4,8	6,2	8,0	14,6	32,3	21,9	12,4	10,8	9,8	8,8

Ulkoilman olosuhteina käytettiin RAMI-hankkeessa [2] määritettyjä rakennusfysikaalisia mitoitusvuosia Jokioinen 2011, Jokioinen 2017 ja Vantaa 2017 tulevaisuuden ilmastoskenaariossa RCP8.5 2080 etelä- ja pohjoisessa. Sisäilman kosteuslisänä käytettiin RIL 107-2022 mukaista kosteusluokkaa 2, mutta sisäilman suurin suhteellinen kosteus katkaistiin enintään arvoon 70 % RH, sillä rakennuksen sisäilman suhteellista kosteutta oli mahdollista hallita tältä osin.

Simulointi tehtiin viiden vuoden mittaiselle jaksolle, jolloin olosuhteiden katsottiin jo olleen tasaantuneet vuosittaiselle sykliselle vaihtelulle. Alkukosteutena käytettiin suhteellisen kosteuden osalta 85 % RH ja lämpötilalle 10 °C. Alkuolosuhteiden ollessa lähellä todenmukaisia, niiden valinnalla ei ole vaikutusta lopputulokseen tässä tapauksessa. Homeindeksin maksimiarvot laskettiin kahdella tapaa viimeiseltä simulointivuodelta. Ensimmäisessä tavassa M_{max} laskettiin viimeiseltä kalenterivuodelta, ja toisessa tavassa viimeiseltä vuodelta jaksolla 1. heinäkuuta–30. kesäkuuta. Näistä kahdesta arvosta tuloksissa on taulukoituna suurempi arvo.

Laskennassa otettiin huomioon viistosade. Tarkasteltavat rakennukset olivat maastoluokan III mukaisessa ympäristössä standardin SFS-EN 15927-3 [3] mukaan, joten laskentaohjelmassa viistosateen määrää muokattiin laskentaohjelman viistosadekertoimilla vastaamaan standardin mukaista maastoluokkaa. Myös auringon säteily ja pitkäaaltoinen säteily otettiin laskennassa huomioon.

3. Tulokset

Taulukoissa 4 ja 5 on esitetty rakenteista lasketut tulokset homeindeksin maksimi-arvojen osalta. Tarkastelukohdissa materiaalien homeutumisherkkyysluokat ovat luokkaa HHL 3. Rakenteen 2 osalta tarkastelupisteiden 1A ja 1B tulokset olivat hyvin lähellä toisiaan, joten taulukkoon on kerätty molemmista pisteistä laskettu suurempi arvo.

Taulukko 4. Rakenteen 1 homeindeksin maksimi-arvot.

Rakenne 1		Homeindeksin maksimi-arvo, Mmax, HHL 3				
RCP8.5 2080		Epatherm	Kasil E	Kasil Pura	Promasil 1000	Skamotec 225
Jokioinen 2011	etelä	0.704	0.663	1.096	0.501	0.949
	pohjoinen	0.587	0.527	1.009	0.364	0.823
Jokioinen 2017	etelä	0.927	0.882	2.006	0.682	1.519
	pohjoinen	0.758	0.693	1.764	0.514	1.187
Vantaa 2017	etelä	0.814	0.766	1.39	0.598	1.083
	pohjoinen	0.686	0.629	1.295	0.468	0.964

Taulukko 5. Rakenteen 2 homeindeksin maksimi-arvot.

Rakenne 2		Homeindeksin maksimi-arvo, Mmax, HHL 3				
RCP8.5 2080		Epatherm	Kasil E	Kasil Pura	Promasil 1000	Skamotec 225
Jokioinen 2011	etelä	0.796	0.748	1.138	0.596	1.146
	pohjoinen	0.663	0.583	1.189	0.417	1.013
Jokioinen 2017	etelä	0.898	0.847	1.362	0.684	1.588
	pohjoinen	0.852	0.774	1.504	0.584	1.595
Vantaa 2017	etelä	0.871	0.824	1.297	0.679	1.276
	pohjoinen	0.841	0.772	1.416	0.606	1.327

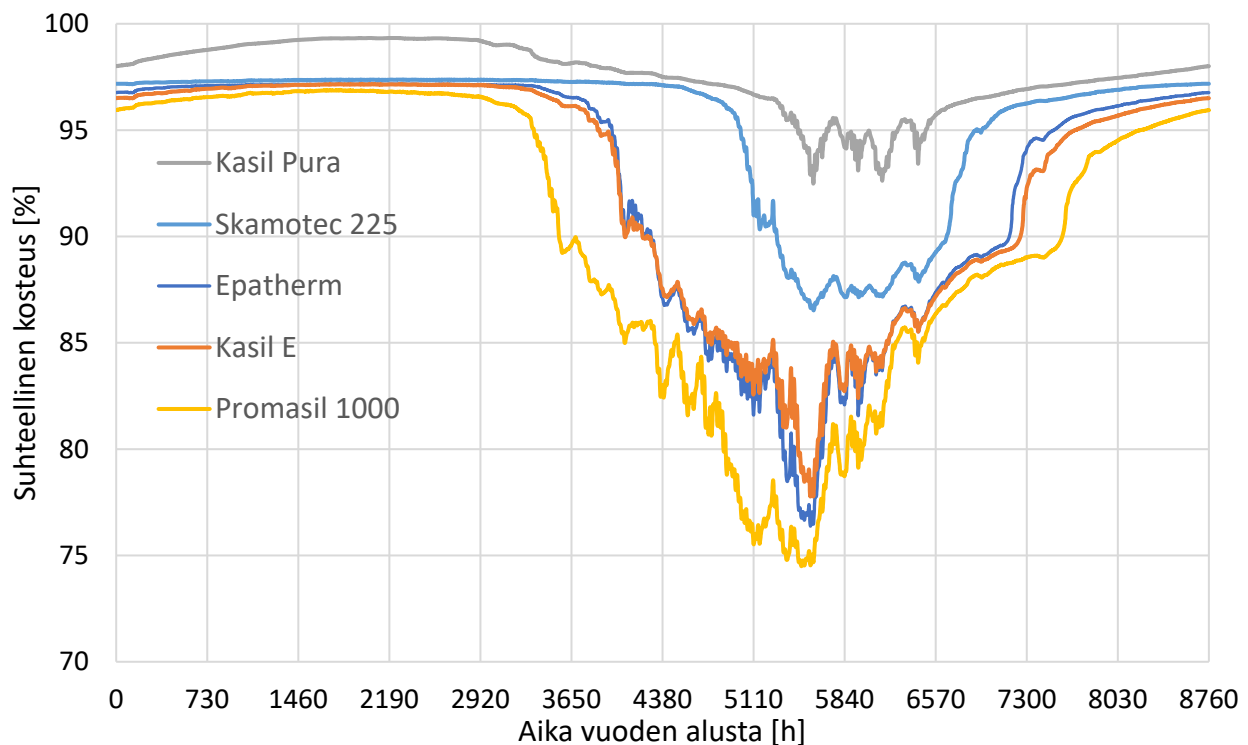
Homeindeksien maksimi-arvojen perusteella kriittisin mitoitusvuosi oli Jokioinen 2017. Rakenteella 1 eteläseinä olisi kriittisin ja rakenteella 2 seinän ilmansuunnan kriittisyys vaihteli.

Tulosten perusteella toimivia kalsiumsilikaattituotteita tutkittavissa rakenteissa olivat Epatherm, Kasil E ja Promasil 1000, joiden homeindeksien maksimi-arvot jäivät alle yhden. Yhteistä näille tuotteille oli se, että niiden kapillaarisen kosteuden imeytymiskerroin, A_w , oli noin luokkaa 1,2-1,3 kg/(m²s^{0.5}). Tässä tutkimuksessa toimintakriteerin ($M_{max} < 1$) alittavilla tuotteilla tämä arvo oli sen sijaan luokkaa 0,1-0,6 kg/(m²s^{0.5}), joten tällä on osaltaan merkitystä kalsiumsilikaattilevyn riittävään kosteustekniseen toimintakykyyn tutkituissa rakenteissa.

Kalsiumsilikaattilevyn lämmönvastuksella on myös jonkin verran vaikutusta koko rakenteen kosteustekniseen toimintaan, sillä pienemmällä lämmönjohtavuudella samalla eristekerrospaksuudella on suurempi lämmönvastus, jolloin eristeen ja rakenteen välinen pinta viilenee enemmän, joka suurentaa suhteellista kosteutta. Näistä tutkittavista tuotteista Kasil Pura:lla homeindeksien maksimi-arvot olivat suurimpia, mutta samalla tämän tuotteen

lämmönjohtavuus oli alhaisin, mikä tarkoittaa suurinta lämmönvastusta samalla eristepaksuudella. Tämän vuoksi tehtiin vielä vertailulaskenta, jossa Kasil Puran eristepaksuutta pienennettiin paksuudesta 100 mm paksuuteen 66 mm, jolloin lämmönvastus vastasi Kasil E:n lämmönvastusta 100 mm paksuisena. Tällöin homeindeksin maksimiarvo mitoittavassa laskentatapauksessa (eteläseinä, Jokioinen 2017) laski arvosta 2,006 arvoon 1,615. Tämä tarkoittaa sitä, että samalla lämmönvastuksella tämän tuotteen kosteustekninen toimivuus ei yltänyt hyväksyttävälle tasolle.

Kuvassa 3 on esitetty eri kalsiumsilikaattilevytuotteiden suhteelliset kosteudet tarkastelupisteessä rakenteessa 1. Suhteelliset kosteudet on esitetty mitoittavalta mitoitusvuodelta Jokioinen 2017 eteläseinältä.



Kuva 3. Rakenteen 1 suhteelliset kosteudet tarkastelupisteessä eri kalsiumsilikaattilevytuotteilla. Mitoitusvuosi on Jokioinen 2017 ja eteläseinä.

Kosteusteknisesti parhaiten toimivat tuotteet mahdollistavat rakenteen kuivumisen paremmin kesäaikana, kun taas huonoimmin toimivilla suhteellinen kosteus pysyi alhaisimmillaan jopa 93...95 % RH tuntumassa läpi vuoden. Tällaisten rakenteiden vikasietoisuus ei ole kovin hyvä, joten kuivumisen olisi oltava mahdollista kuivumiskaudella. Sen sijaan parhaiten toimivissa tuotteissa Epatherm, Kasil E ja Promasil 1000 suhteelliset kosteudet laskivat noin lukemiin 75...78 % RH alhaisimmillaan.

4. Yhteenveto

Kokonaisuudessaan arvioiden Epatherm, Kasil E ja Promasil 1000 toimivat näissä tutkittavissa rakenteissa parhaiten. Kalsiumsilikaattilevyn valinnassa on kiinnitettävä erityistä huomiota tuotteen kosteusteknisiin ominaisuuksiin. Tässä tutkimuksessa havaittiin, että kaikki kalsiumsilikaattilevyt eivät toimi kosteusteknisesti yhtä hyvin. Etenkin tuotteen kapillaariseen kosteudensiirtokykyyn on kiinnitettävä erityistä huomiota. Riittävä kosteudensiirtokyky mahdollistaa rakenteen tehokkaan kuivumisen myös sisälle päin, jolloin eristeen ja muun

rakenteen rajapinta pysyy riittävän kuivana. Kuivumiskyvyn puute pitää rakenteen kosteampana, jolloin homeen kasvu eristeen ja rakenteen rajapinnassa on mahdollista. Lisäksi vanhassa rakenteessa voi tapahtua muitakin kosteudesta aiheutuvien vaurioiden lisääntymistä.

Lähdeluettelo

- [1] Tuominen, O., Tuominen, E., Vainio, M., Ruuska, T., & Vinha, J. (2019). Thermal and moisture properties of calcium silicate insulation boards. In MATEC Web of Conferences (Vol. 282, p. 02065). EDP Sciences.
- [2] Laukkarinen, A., Jokela, T., Vinha, J., Pakkala, T., Lahdensivu, J., Lestinen, S., ... & Jylhä, K. (2022). Vaipparakenteiden rakennusfysikaalisen toimivuuden ja huonetilojen kesäaikaisen jäähdytystehontarpeen mitoitusolosuhteet: RAMI-hankkeen loppuraportti.
- [3] SFS-EN ISO 15927-3. 2009. Hygrothermal performance of buildings. Calculation and presentation of climatic data. Part 3: Calculation of a driving rain index for vertical surfaces from hourly wind and rain data. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 21 s.

Palikka® Original – 50 vuotta parempaa rakentamista ja asumista

Birger Wasenius
Palikka Oy

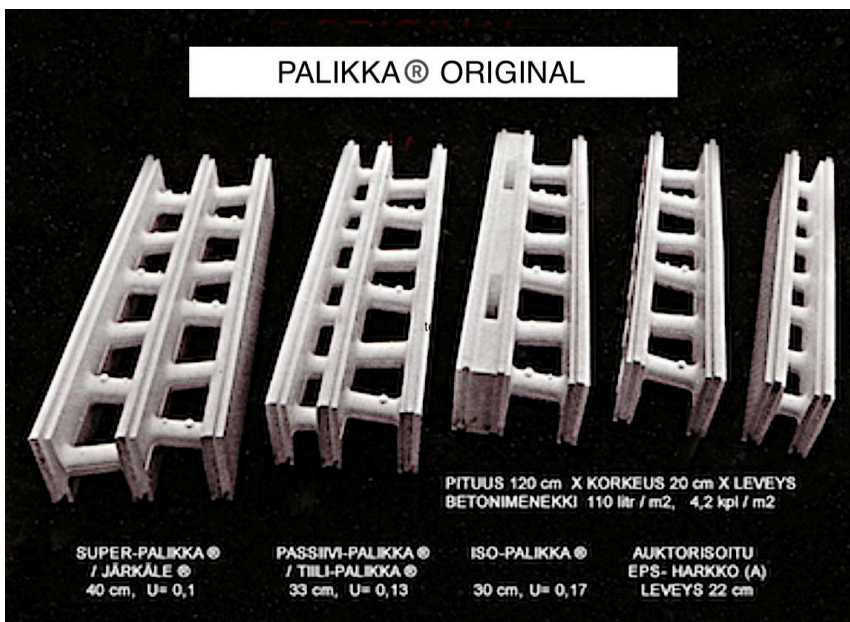
Tiivistelmä

PALIKKA esittää täydellisen rakennusmenetelmän, jolla toteutetaan kevyesti kaikenlaiset rakennuskohteet energiatehokkaasti, ekologisesti ja turvallisesti. Palikka on todellinen energian säästön edelläkävijä jo 50 vuoden kokemuksella. Palikka-rakentamisessa hyödynnetään tehokkaasti muovin parhaat ominaisuudet eli keveys, kosteudenkestävyys ja helppo muovailtavuus. Palikka on sisäänrakennetusti tuulettuva ratkaisu.

1. Johdanto

Tänä juhlavuonna 2023 Palikka Original -muottielementti täyttää 50 vuotta ja kansainvälisesti palkittu yli 20 ekologisen Palikkatalon Säästökylä 40 vuotta. Lisäksi Palikan keksijä, DI, Eur. Ins. Birger "Wasse" Wasenius täyttää 80 vuotta.

1970-luvun alussa, kun muoviraaka-aineiden tuotanto oli juuri alkanut Suomessa, nuori muovinsinööri Birger Wasenius pohti muovien käyttöä talonrakennusmateriaalina. Tuloksena syntyi Palikka -muottielementti. Palikka on vahvasta EPS-solupolystyreenistä valmistettu, kolminkertaisesti ympäripontattu valumuotti (kuva 1), joka valun jälkeen jää pinnoitusvalmiiksi eristeeksi seinään. Vuonna 1973 ensimmäinen Palikkatalo oli ainakin 50 vuotta aikaansa edellä, joten Palikka täyttää vielä tänään ja pitkään tulevaisuudessa uusimmatkin viranomaisvaatimukset.



Kuva 1. Alkuperäiset Palikka® Original -muottielementit sopivat keskenään yhteen ja soveltuvat kaikkeen rakentamiseen.

Muovit valmistetaan öljystä, joka on muodostunut vuosimiljoona sitten kasvaneesta puusta. Kertakäyttöenergiana polttamisen sijasta Palikkataloon on kiteytetty luonnon öljy kiinteäksi kestoenergiaksi erinomaisena lämmöneristyksenä, siten säästään lämmityskuluja ja luontoa.

Ympäristöystävällinen kestopuote Palikka on monoliittinen yhdestä aineesta valmistettu rakennuselementti ilman sekamuoveja, joten se voidaan käytön jälkeen helposti kierrättää uusiksi ekotuotteiksi.

2. Parempien Palikkatalojen rakennusfysikaalisia ominaisuuksia

Rakentaja voi valita Palikka-seinän eristyksen $U = 0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ saakka. Normaalisti riittää ISO-PALIKKA-elementin $U = 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, huomioiden, että seinän lämpöhukka on vain n. 10 % koko talon energian kulutuksesta (ks. kuva 1). Enemmän pitäisi kiinnittää huomiota talon muuhun 90 % kulutukseen eli kattoon, lattiaan, ikkunoihin ja lämmitysmuotoihin sekä ilmanvaihtoon. [1–7], [9], [14–17]

2.1 Turvallinen ja terve

Palikka-muottielementti on valmistettu puhtaan valkoisesta elintarvikelaatuisesta EPS-muovista, ilman haitallisia tai myrkyllisiä lisäaineita. Palikka ei eritä pölyä, kaasuja eikä kuituja, eikä siinä ole raskasmetallijäänteitä. Siihen ei ole koskaan lisätty myöskään grafiittia.

Muovitalo on siten ekologisesti myös kestävä eikä sen tekoon tarvitse kaataa hiilinieluna toimivaa metsää, kuten puutaloa tehtäessä.

Palikka sopii kaikkeen rakentamiseen: lämpösokkeleihin, kuiviin maanalaisiin kellareihin ja terveisiin energiansäästötaloihin, kuten passiivi- ja nollaenergiataloihin jne. Rakentaa voi uima-altaita, maakellareita, tukimuureja jne. Niistä on rakennettu kaksi kerrosta maan alle ja viisi kerrosta maan päälle.

2.2 Radonturvallinen ja hyvä sisäilma

Palikkatalossa on radonturvallinen, tiivis betonirakenne. Ulkoseinässä on kantavan betonirakenteen ulkopuolella pääosa lämmöneristeestä ja tuuletusraot. Alapohja voidaan toteuttaa vaihtoehtoisesti tuulettuvalla alapohjalla, maanvaraisella, Palikoilla reunavahvistetulla kantavalla laattalla ilman anturaa tai uivalla lattialaattalla ja RADONIX-radonturvaprofiililla (kuva 2). [4–7], [9,13]



Kuva 2. RADONIX-profiili asennetaan helposti ennen valua.

Palikka kestää radioaktiivista säteilyä. Palikan eristävänä kaasuna on vain puhdas ilma. Pinnoituksiin käytetään vain turvallisia materiaaleja. Sisäilman laatu täyttää tutkitusti M1-luokan vaatimukset.

2.3 Hyvä ääneneristys ja akustiikka

Muotoilunsa ja rakenteensa ansiosta Palikka-betoniseinällä on hyvä ääneneristys ja kaiuton akustiikka, jota on hyödynnetty mm elokuvateattereissa ja kokoustiloissa. Myös lento- ja liikennemelualueilla Palikka toimii hyvin, esim. Säästökylä Helsingin Heikinlaaksossa.

PALIKKA®-rakenteen mitattu hyvä ääneneristys (taulukko 1) johtuu PALIKKA-seinän muista harkoista poikkeavasta ontelomaisesta rakenteesta ja muita pienempien välitukien muotoilusta sekä poikkeavasta sisäpinnoituksesta. [5–7], [9,10,15]

Taulukko 1. Palikkatalon ulkoseinien ääneneristysarvoja tiiliverhotussa ja rapatussa talossa sekä vertailu joihinkin muihin menetelmiin. Kohteessa A on tiiliverhous ja kohteessa C rapattu seinä.

Tuote	R _w (dB)	R _{w+c} (dB)	R _{w+ctr} (dB)	Huom.
Kohde A	55	n. 53	n. 51	Palikka-elementin viistot välituet ovat <10 % seinästä / tiiliverhous
Kohde C	58	n. 56	n. 53	Rappaus + kipsilevyt tehty eri tavalla
K1	43	40	38	Betonissa on reikiä vajaat 20 %
K2	47	45	42	Betonissa on inserttejä
K3	53	52	49	Betonissa reikiä (styroksia) lähes 30 %

2.4 Paloturvallisuus

Palikka-rakenteiden palo-ominaisuuksia on täysmittakaavaisesti testattu mm Suomessa, Ruotsissa ja Australiassa (taulukko 2).

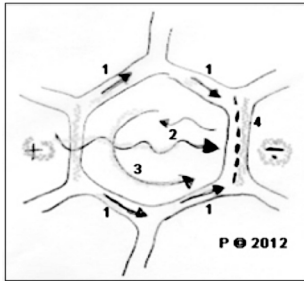
Palikalla on korkeampi syttymispiste kuin puulla ja palokuorma on vain kymmenesosa puusta. Paloturvallisen rakenteen ulkopintaan riittää vähintään 10 mm rappaus ja sisäpintaan 9 mm kipsilevy. [1–7], [9,11,12,15]

Taulukko 2. Palikka-rakenne on saavuttanut REI60 paloluokan palokokeessa.

The specimen achieved the following performance when tested in general accordance with the failure criteria of AS 1530.4-2005, Sections 2 & 3. The test was not conducted in full accordance with the standard refer to the variations listed in section 3 of this report.	
Criteria	Result
Structural adequacy	No failure at 63 minutes. Applied Load 18 kN/m
Integrity	No failure at 63 minutes.
Insulation	No failure at 63 minutes.
FRL	Not possible to assign

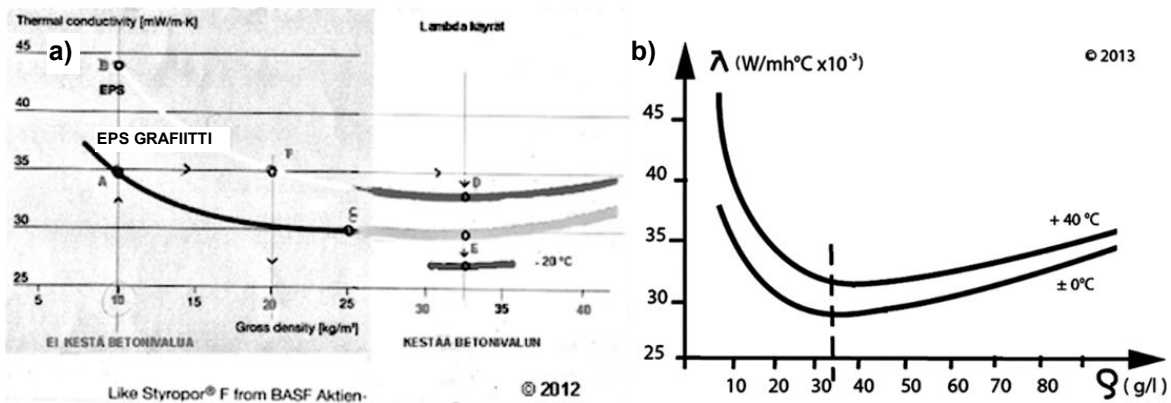
2.5 Erinomainen lämmöneristys

EPS koostuu suljetuista ilmakuplista, joissa lämmön siirtyminen eli eristeen lämmöneristyskyky riippuu kolmesta tekijästä: lämmön johtumisesta seinämien kautta, konvektiosta kaasumolekyylien liikkeessä kuplan sisällä sekä säteilystä (kuva 3).



Kuva 3. Lämmön siirtymistavat EPS-polystyreenissä.

Lisäämällä EPS-eristeeseen säteilyä heijastavia peilejä grafiittihiukkasten muodossa paranee lämmöneristys merkittävästi vain pienemmällä tiheyksillä, kuten 10 kg/m^3 . Tätä tiheyttä ei voida kuitenkaan käyttää elementtien eristeissä, koska se ei kestä betonivalua. Palikka-rakennuselementtien eristetiheyksillä $30\text{--}40 \text{ kg/m}^3$ grafiitilla ei ole suurta vaikutusta eristyskykyyn, ja se on myös kalliimpi ratkaisu. (kuva 4a ja 4b)



Kuva 4. a) Palikka-elementin lämmöneristeellä (D) on pienempi lämmönjohtavuus ja siten parempi U-arvo kuin 10 kg/m^3 EPS-grafiittieristeellä (A), joka on puolestaan 25 % parempi kuin tavallinen EPS-eriste (B) samassa tiheydessä. Näistä eristeistä kumpikaan ei kestä kuitenkaan betonivalua. Alin käyrä (E) osoittaa Palikka-eristeen lämmönjohtavuuden alenevan entisestään -20 °C :ssa. b) Palikka-elementin lämmöneristeen lämmönjohtavuus eristetiheyksillä $30\text{--}40 \text{ kg/m}^3$.

Ulkoseinän lämmöneristystä suunniteltaessa tulee myös huomata, että ulkoseinät vastaavat vain n. 10 % koko talon energiankulutuksesta. Kun seinän U-arvoa parannetaan esim. 20 %, paranee koko talon U-arvo kuitenkin vain 2 %. On siis syytä harkita paljonko 2 % lisäeristyksestä kannattaa maksaa lisähintaa ulkoseinässä.

Palikkatalo on kesällä viileä ja talvella lämmin. Palikan sisäpuolella oleva massiivinen betonirunko varaa taloon lämpöä/ viileyttä ja ulkopuolen paksumpi eristekerros pitää kylmän/ lämmön ulkona.

Näistä ominaisuuksista hyötyy myös Palikka-talvi-rakentaja: betoni ei jäädy lämpimän muotin sisällä. Palikka-taloja onkin rakennettu jopa -25 °C :ssa. [1–9], [13,15]

2.6 Ilmatiiviyys

Kolminkertaisesti pontattu, saumaton PALIKKA®-rakenne oli merkittävän ilmatiivis jo 1970-luvulla, ilman energianhukkareikiä ja kylmäsiltoja (kuva 5). Silloin ei kiinnitetty huomiota rakennuksen hyvään ilmatiivyyteen ja saatettiin jopa paheksua niin tiivistä taloa. PALIKKA oli kuitenkin jälleen edelläkävijä, 50 vuotta aikaansa edellä: nyt hyvää ilmatiiviyttä korostetaan

viranomaisohjeissa ja pyritään kohti Palikan 1970-luvun laatutasoa, jollaista muilla rakenneratkaisuilla on vaikeuksia toteuttaa.

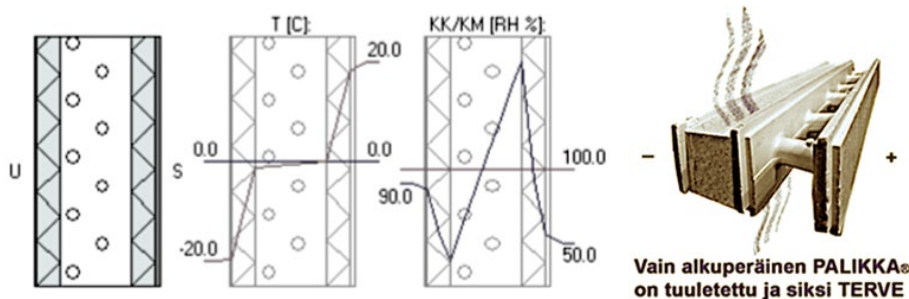


Kuva 5. Esimerkki Palikka-elementeillä toteutetun talon ilmatiiviydsmittauksesta, jossa ilmanvuotoluokaksi q₅₀ on saatu 0,2 m³/(m²h). Arvo alittaa selvästi mm passiivitalolta vaaditun arvon 0,6 m³/(m²h).

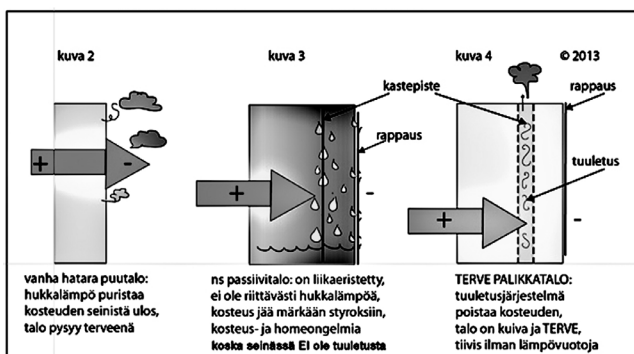
2.7 Vesi- ja kosteusturvallisuus

Ulkoseinärakenteisiin voi tiivistyä kosteutta, kun sisäilmasta siirtyy vesihöyryä diffuusiolla rakenteen läpi. Näin tapahtuu, jos rakenteeseen muodostuu sellaiset lämpötila- ja kosteusolosuhteet, jotka saavat aikaan kastepisteen rakenteen sisälle (kuva 6). Tämä voidaan välttää, kun rakenteen ulko-osassa on hyvin lämpöä eristävää materiaalia ja kunnollinen tuuletusjärjestelmä, kuten Palikka-elementissä (kuva 7).

Palikka-rakenteen uloimpien lamellien välissä on sisäänrakennettuna tuuletusjärjestelmä, joka poistaa sekä rakennusaikaista (betonin) että muuta kosteutta seinästä. Rakennekerrosten oikea sijoittelu ja mitoitus tällaisessa eriste-betoni-eriste-rakenteessa on siksi tärkeää (Kuva 6b) Kova Palikka-eriste itsessään ei ime vettä. Kaikissa muiden valmistajien samantapaisissa tuotteissa tähän ei ole osattu kiinnittää riittävästi huomiota (Kuva 6a)

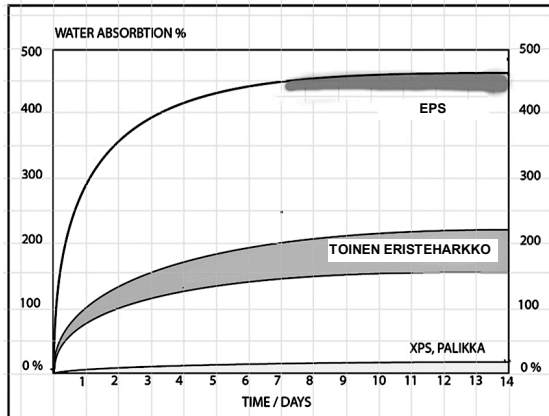


Kuva 6a-b. Vasemmalla kosteutta ylläpitäviä ratkaisuja. Oikealla tuuletettu, kuiva Palikka-rakenne.



Kuva 7. Hyvin suunnitellussa ja oikein toteutetussa Palikka-rakenteessa ei esiinny kosteusongelmia. Kuiva Palikka ei jäädy, lahoa eikä homehdu. Raudoitus on sisäpuolella olevan kuivan betonin sisällä. EPS-eristeessä paikallaan oleva ilma on erinomainen lämmöneriste.

Lämmöneristeiden vedenimeytymisvertailussa tutkittiin tavallinen EPS-eriste, toisen valmistajan diffuusioavoin eristeharkko, alkuperäinen Palikka Original -elementti sekä XPS-eriste. Näytteet oli kerätty eri rakennustyömailta eikä niitä valikoitu ennalta tavoitellun tutkimustuloksen aikaansaamiseksi (kuva 8). Tärkeää on huomata, ettei rakennuksen eriste saa imeä eikä säilyttää kosteutta.



Kuva 8. Tavallinen EPS-eriste voi imeä vettä jopa 500 % (ylin käyrä), toisen valmistajan harkkoeristeeseen mahtuu vettä 200 % (keskimmäinen käyrä). Tiivis ja kova Palikka-eriste sekä XPS-eriste eivät juuri vettä ime (alin käyrä). [1–7], [9,15]

2.8 Tuulettuva PALIKKA on homeongelman ratkaisu

Palikan edut ja hyvät ominaisuudet ovat kovaa pintaa syvemmillä. Ainoastaan alkuperäisissä Palikka Original -muottielementeissä on valmiiksi sisäänrakennettu ainutlaatuinen tuuletusjärjestelmä (ks. kuva 1), joka luonnollisella tavalla tehokkaasti kuivattaa seinärakenteet. Ulkoseinärakenteessa ei esiinny kosteusongelmia Palikan toimivan tuuletusjärjestelmän ja tiiviin betonirakenteen ansiosta.

Palikka-elementin tuuletusjärjestelmää voidaan käyttää myös tuloilman jäähdyttämiseen lämpimänä vuodenaikana ja esilämmitykseen talvella maahan varastoitua energiaa hyödyntäen ilman lisäkustannuksia (kuva 9). [2–7], [9,13], [15–17]

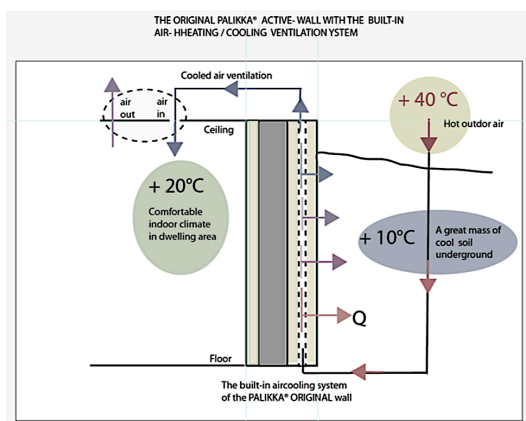


Fig 10. Schematic function of the Palikka cooling system. The Ventilation System functioning as a heat exchanger, cooling the warm outdoor air using the much lower temperature of the mass of the ground.

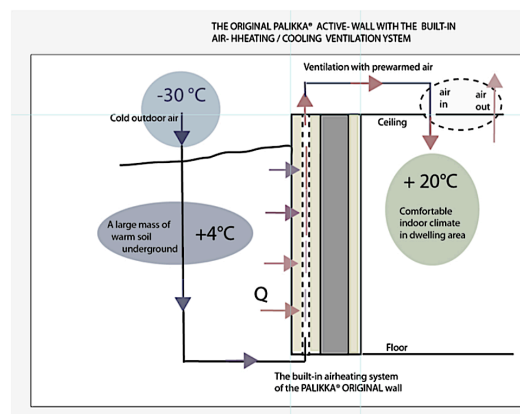


Fig 11. Principle of the Palikka warming system. Cold outdoor air is led into the Ventilation System, where it is warmed by the heat exchanger taking energy from the warmer practically infinite mass of the ground.

Kuva 9. Palikan tuuletusjärjestelmän käyttö tuloilman jäähdyttämiseen kesällä (vasen kuva) sekä esilämmitykseen talvella (oikea kuva).



Kuva 11. Palikka-elementti on muotoiltu siten, että teräksien ympärillä on vaadittu suojabetonipaksuus.

3. Yhteenveto

Palikka on rakentamisen helppouden ja yksinkertaisuuden, optimoidun lämmöneristyksen, ilmatiiviyyden ja kosteusteknisten ominaisuuksiensa vuoksi merkittävä kotimainen innovaatio.

Tämä kirjoitus on lyhennelmä. Koko artikkeli on luettavissa palikka.fi-sivustolla.

Lähdeluettelo

- [1] Wasenius, B. Rakennustaito 1975. Suomi. Solupolystyreenin ominaisuudet, ss 13–15
- [2] RT-datarcard G(22)-30705. 1981. Rakennustietosäätiö
- [3] RT-datarcard E 33504. 1990. Rakennustietosäätiö
- [4] Wasenius, B. 1986. RIL-127. ISBN: 951-758-046-0. Muovit rakentamisessa.
- [5] Wasenius, B. 1992. Byggnadskalendern1992, pp 1037 -1053.
- [6] PALIKKA Oy. PROFI-datarcards, continually updated -2023.
- [7] PALIKKA product brochures. 1970-2023.
- [8] Weckström, H. TM Rakennusmaailma 4/2015, pp 38-41.
- [9] Hundreds of articles in Rakennusanomat and other building magazines during 1972-2023
- [10] Palikka soundinsulation measurements and reports, Raportti: IMM - 1745 / 05.11.13
- [11] Palikka firetest reports
- [12] VTT. PUR polttokoe. Raportti.
- [13] SAMUELSSON INGEMAR, professor, Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, Energiteknik, Box 857, 501 15 Borås. Olika rapporter och forskningar.
- [14] CE-conformity statement
- [15] Wasenius, B. Rak fys etuja käyttäjien kannalta 19.5.23.rtf.
- [16] PALIKKA - terveitä passiivitaloja jo 40 vuotta.Branschaktuell. 2013. Saatavilla (viitattu 16.10.2023): <https://branschaktuell.se/passivhus/2328-palikka-sunda-passivhus-i-redan-40-ar>
- [17] Wasenius B. The Ventilated Building System. 12th Nordic Symposium on Building Physics. 2020. E3S Web of Conferences 172, 19011. <http://doi.org/10.1051/e3sconf/202017219011>

Suomalainen ristikkotalo

Kari Ojala
Etukeno Oy

Tiivistelmä

Omakotirakentamisen ratkaisut polkevat Suomessa paikallaan, eikä rakentamisen tuottavuus ole parantunut koko itsenäisyyden aikana. Uusia, taloudellisia rakennusmenetelmiä ei ole keksitty. Edes kaikkia perinteisiä, hyväksi tiedettyjä rakenneratkaisuja ei ole otettu käyttöön. Ristikkotalo (timber frame, Fachwerk) on Suomessa lähes tuntematon, Keski-Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa suosittu pitkäikäisten puutalojen rakennusmenetelmä. Nykyisillä materiaalin ja työn hinnoilla ristikkotalo on meilläkin nyt varteenotettava ratkaisu. Siksi kirjoittaja suunnitteli ja rakennutti nykyaikaisen ristikkotalon prototyypin Loviisan Valkoon. Hankkeesta on ilmestynyt myös kirja. Koetalo on 50 m²:n suuruinen omakotitalo, jonka runko koostuu liimapuupalkeista, joiden väliset ruudut on eristetty selluvillalla. Liitokset on toteutettu ruuvein, ja vinokuormia ottavat vastaan rakenteen sisäiset vinotuet. Talon rakenteet ovat perinteellisen puurakentamisen mukaisia ja kosteutta läpäiseviä. Monin osin on kuitenkin kehitetty yksityiskohtia ja työtapoja yksinkertaisemmiksi. Kun erikoisammattilaisia tai kalliita materiaaleja ei tarvita, talon hinta jää selvästi teollisen omakotitalon hintaa halvemmaksi.

1. Johdanto

Omakotitalo on monelle perheelliselle ihanteellisin asumismuoto, mutta uuden talon rakentaminen tulee kalliiksi – vanhassa taas on remonttihuolensa. Taloksi markkinoidaan teollisia unelmataloja, joiden hinta epärationaalisten rakenneratkaisujen, kalliiden pintamateriaalien ja lukuisien välikäsien vuoksi kohoaa monille tavoittamattomaksi. Eikö tällaiselle rakentamisen ”asuntomessuistumiselle” todella ole vaihtoehtoa?

2. Talojen rakenteet

2.1 Teollisen puurakentamisen maa

Suomessa pientalon luonteva rakennusmateriaali on puu. Sitä on hyvin saatavissa ja hinta on sopiva – jos pitäytyy kuusessa tai männysssä. Vähänkin erilaisempien puumateriaalien saatavuus on huono ja hinta kova; markkinat ovat pienet ja kehittymättömät. Peruspuutavara on kuitenkin edullista, helposti työstettävää, uusiutuvaa ja rakennuskosteutta läpäisevää, ja on lämmintä koskettaa. Ei ihme, että Suomen pientaloista noin 90 % tehdään puusta.

Pientalorakentaminen on voimakkaasti teollistunutta, noin 70 % pientaloista tehdään enemmän tai vähemmän valmiiksi talotehtaiden toimesta. Tämä ei ole mitenkään parantanut rakentamisen tuottavuutta: käsityönä paikalla yksilöllisesti tehty talo maksaa saman tai vähemmän kuin tehtaan valmistalo.

Talojen rakenteisiin rakentamisen teollistuminen on vaikuttanut kahta kautta:

1. Rakentaminen pääomavaltaistuu ja standardisoituu. Nämä kulkevat käsi kädessä: Talotehtaat pyrkivät vakiorakenteisiin, joita voi rakentaa sarjatyönä. Tämä vaatii

investointeja konekantaan, ja investoinnit lisäävät samojen osarakenteiden myyntiä. Rakentaminen jämähtää saman toistoksi, eikä yksilöllisille ratkaisuille tai kehitykselle jää tilaa.

2. Älykkäisiin talojen rungon ratkaisuihin ei juuri ole kiinnitetty huomiota, koska talotehdas saa rahansa pois pienemmällä vaivalla myymällä kalliita pintoja. Rakenteista ei tehdä elegantteja sellaisenaan, vaan ne kuorrutetaan kulloinkin muodikkailla materiaaleilla – rakennetaan toiseen kertaan.

2.2 Yleisimmät runkorakenteet

Hirsirunko on Suomessa perinteinen, pitkäikäinen talon perusrakenne. Puuta on ollut aina saatavissa, jopa rakennuspaikan lähellä. Siksi ei puuta säästävämpi ristikkotalokaan liene yleistynyt.

Kokopuinen rakennusrunko tulee kalliiksi, eikä sen eristyskyky ole kummoinen ilman lisäeristystä. Aidon, käsin veistettävän talon tekijät ovat meillä harvassa, ja ”hirsitalot” tehdäänkin nykyisin yleensä liimapuusta.

Hirsirakenteen on pitkälti korvannut lautatavarasta ristiin koolaamalla koottu ”himmeli”, lautarakenteinen rankatalo. Se lienee yleisimmin käytetyistä rakenteista edullisin. ”Pitkästä tavarasta” rakentamiseen pystyvät rakennusporukat ovat kuitenkin vähenemään päin, ja lautatalotkin tehdään nykyisin yhä useammin tehtaalta tilattuja lauta/villa-seinäelementit yhteen liittämällä. Ongelmia voi tulla rungon heikkoudesta ja seinärakenteen monimutkaisuudesta. Kosteusvauriot uhkaavat.

CLT on pientalon rakentamisratkaisujen uusi tulokas. CLT (cross laminated timber) on ristiin liimattua puuviilua, ikään kuin paksua vaneria. Nykyisin sitä saa myös liimattomana, viilut yhteen mekaanisesti yhteen liitettyinä. Tämä siksi, että asiakkaat pelkäävät (aiheellisesti) kaikkia kemikaaleja. Vaikka CLT:ssä yleisesti käytetty melamiiniliima onkin ilmeisen vaaratonta, liimattomuus on myyntivaltti. CLT levisi Suomeen Keski-Euroopasta.

Kokopuun eristävyys levy muodossakin on vähän siinä ja siinä. 20 cm paksu seinä juuri riittäisi, mutta sen hinta on julma – etenkin kun pois leikattavista ikkuna- ja oviaukoistakin on tapana laskuttaa. Paksujen seinäelementtien käsiteltävyys on myös korkean painon vuoksi hankalaa. Moni päätyykin ohuempaan levyyn ja lisäeristämiseen.

Kaikissa nykyisin käytettävissä runkoratkaisuissa on siis ongelmansa. Ristikkotalossa pahimmat ongelmat voidaan välttää.

2.3 Ala- ja yläpohjat

Talojen rakenteista puhutaan yleensä seinärakenteen kautta: on hirsitalo, lautatalo jne. Talossa on kuitenkin paljon muutakin, aivan erityisesti ala- ja yläpohja. Ne voi periaatteessa toteuttaa seinärakenteesta riippumatta, mutta toiset ratkaisut ovat toisia luontevampia. Taloon kuin taloon sopivat parhaiten ne ala- ja yläpohjat, jotka liittyvät saumattomasti seinärakenteeseen, jotka käyttävät samantapaisia materiaaleja ja joissa seinä, lattia ja katto voivat jakaa saman rakenteen.

Jos ja kun pyritään kosteusturvallisuuteen ja edulliseen hintaan, puutaloon soveltuvat parhaiten pilariperustus, rossipohja ja kattoristikoiden (kattotuolien) varaan rakennettu loiva harjakatto. Silloin voidaan muiden etujen lisäksi sekä ala- että yläpohjan eristys puhaltaa rakennusrungon

muodostamiin valmiisiin kaukaloihin.

3. Ristikkotalo

3.1 Ristikkotalon periaate

Ristikkorakenteista taloa pidetään maailman vanhimpana puutalotyypinä; ikäkysymys kyllä riippuu monesta asiasta, kuten sanojen määritelmästä. Pitkäikäisiä ristikkotalot ainakin ovat, vanhimmat käytössä olevat alkavat olla tuhatvuotiaita. Esimerkiksi Saksassa asutaan vielä 2,5 miljoonassa vanhassa ristikkotalossa. Ensimmäiset ristikkotalot tehtiin nykyisen Ukrainan alueella.

Perinteiset ristikkotalot – kuten esimerkiksi nuo Saksan pikkukaupunkeja koristavat viehättävät kaupunkitalot – tehtiin hirsistä kololiitoksin ja puutapein, ja näin kootun runkokehikon välit täytettiin sillä mitä löytyi: savella, oljilla, laastilla tai tiilillä.

Tämän päivän ristikkotalo kannattaa tehdä liimapuupalkeista, joiden välit täytetään eristevillalla. Tässä rakenteessa yhdistyvät melkein kaikki edut. Materiaalit ovat edullisimmat mahdolliset, eristyskyky on hyvä, ja sekä asumisterveys että kosteuden kulkeutuminen kunnossa. Tällainen talo syntyy ilman talotehtaita, erikoisammattilaisia tai ylimääräisiä välikäsiä, ja kustannukset saa alhaisemmiksi kuin millään edellä esitetyllä rakennustavalla.

Keskeinen syy siihen, miksi tällaisen talon tekee jollei aivan kotikonstein, niin tavallisen kirvesmiesporukan toimesta kuitenkin, on runkopalkkien koloaminen koneellisesti palkkitehtaalla ja liittäminen yhteen ruuveilla. Vinorasitusta, talon kaatumista ja vääntymistä, tällainen rakenne ei toki vastusta – mutta tämä on hoidettavissa eristystilaan ruuvattavin vinotuin. Kun koloukset ja palkkien kiinnitysjärjestys vielä suunnitellaan tarkasti, ei erityisosaamista tarvita. Pieni talo on pystyssä valmiille perustuksille päivässä.

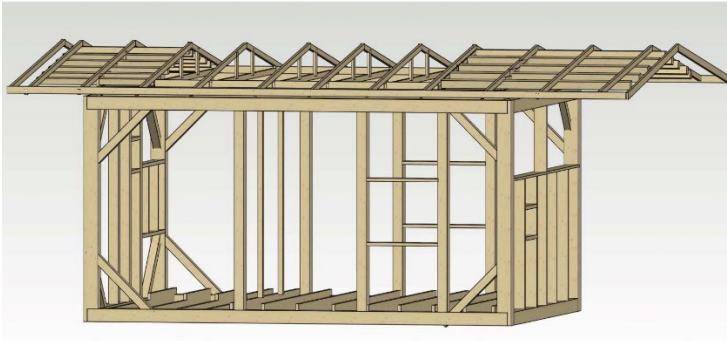
Suomen olosuhteisiin ja nykypäivään soveltuvan ristikkotalon kehittämiseksi suunniteltiin ja rakennettiin Loviisan Valkoon sijoittuva koetalo, jota tässä kutsutaan Loviisa-taloksi. Talo suunniteltiin vuonna 2021, rakennettiin 2022 ja on tarkoitus lopputarkastaa vuoden 2023 loppuun mennessä. Lisätietoja projektista on kirjoittajan yhtiön sivuilla www.etukeno.fi.



Kuva 1. Koetalon ulkoarkkitehtuuri perustuu suurelta osin väreihin. Ikkunaseinä on signaalinpunainen.

3.2 Loviisa-talon rakenne

Loviisa-taloon sovellettiin pitkälti edellä kerrottuja periaatteita. Runko on liimapuuta poikkileikkaukseltaan pääosin 240x270 mm. Ikkunaseinän rakenteissa ja pienimpien huoneiden seinissä palkkien leveys on osin pienempi, mutta syvyys lähes poikkeuksetta tuo 270 mm. Sillä mahdollistuu riittävä eristys. Osa sisäpuolen näkyvistä palkeista on paksuudeltaan vain 40–70 mm, koska ne eivät kannan.



Kuva 2. Loviisa-talon kantavat rakenteet (luonnos).

Ristikkotalo antaa mahdollisuudet monenlaiseen ulkoarkkitehtuuriin. Loviisa-talossa kantava runko julkisivuja kiertäviä palkkeja lukuun ottamatta päätettiin peittää ulkovuorauksella, jottei kosteudelle arkoja vuorauksen päitä jäisi esille liikaa. Sisällä kantavat palkit ovat näkyvissä ja antavat talolle sen oman luonteen. Loviisa-talossa palkit päätettiin kuultomaalata tummiksi ja välejä peittävät paneelit valkoisiksi; toisella värityksellä tai palkkijaolla vaikutelma olisi aivan eri.

Eristys on kauttaaltaan puhallettua selluvillaa. Seinissä rakenne on sisältä lukien (palkkien väliin asennettu) panelointi – ilmansulkupaperi – eriste – huokoinen tuulensuojalevy – ilmarako - ulkovuorilaudoitus. Yläpohja on ripustettu kattoristikoista, mutta tukeutuu päädyissä pitkien lippojen vuoksi pitkäpalkkeihin, alapohja on tehtaalla kolotun yksinkertaisen koolauksen ja sitä (seinien lisäksi) tukevan pitkäpalkin varassa. Molemmissa villa on puhallettu rungon muodostamaan kaukaloon.

Etelään suuntautuvan ikkunaseinän kantava rakenne koottiin palkkitehtaalla katkaistuista ja kolotuista palkeista, joiden ulkopintaan ikkunaelementit kiinnitettiin sisältä ruuveilla. Seinään sijoitetut ulko-ovi ja tuuletusluukku ovat umpinaiset, puiset. Kustannukset jäivät alle puoleen tehdastekoisesta alumiiniseinästä liukuovineen.

Talona Loviisa-talo on pieni, vain 50-neliöinen. Pienessä talossa katsottiin voitavan kohdata ja ratkaista kaikki ristikkotalon mahdolliset ongelmakohdat, ja suurempi vaatisi energiatodistukset ja muuta turhanaikaista byrokratiaa. Huonekorkeutta on 3.37 metriä, millä saatiin tarpeeksi ilmatilaa. Ilmanvaihto on painovoimainen, lämmitys suoralla sähköllä.

3.3 Saadut kokemukset

Rakentamisesta ja ensimmäisen vuoden asumisesta saadut kokemukset ovat hyvin myönteiset. Kaikki talon suunnittelun keskeiset periaatteet osoittautuivat toteuttamiskelpoisiksi, talon pystytys nopeaksi, rakentamisen kustannukset edullisiksi, talossa elämisen taso korkeaksi ja asumiskustannukset huokeiksi. Tällä perusteella monen rakentajan kannattaisi tehdä perheelleen ristikkotalo.



Kuva 3. Talon rungon pystytys kesti yhden työpäivän.

Rakentamisessa jouduttiin ratkaisemaan iso joukko pieniä ongelmia: monet yksityiskohdat kun olivat ennalta tuntemattomia. Näistä käytännön kysymyksistä kertyi tietovaranto, josta on epäilemättä hyötyä mahdollisissa seuraavissa ristikkotaloissa. Runsas valikoima tätä kokemusta on esitelty hankkeesta kirjoitetussa kirjassa [1], ja lisää tietoa saa kirjoittajalta.

Osa kertyneestä kokemuksesta ei koske yksinomaan ristikkotalon rakentamista, vaan millä tahansa rakenteella toteutettavan terveen, pitkäikäisen ja kustannustehokkaan pientalon rakentamista. Matkan varrella havaittiin esimerkiksi säästömahdollisuuksia vesi- ja viemäritöissä; määräysten mukaisesti, mutta ilman kosteuseristyksiä rakennettavien märkätilojen edut; kattotuoleista ripustettavan sisäkaton edullisuus; halpakeittiön nykyaikaan muokkaamisen mahdollisuudet; sekä työmaalla valmiiksi sahatuista palkeista koottavan ikkunaseinän rakenteen helppous, huokeus ja (puutalon) tyyliin sopivuus.

Loviisa-talon kokonaiskustannukset – kalleimpaan mahdolliseen aikaan toteutettuna - olivat alle 150 000 €. Tässä ovat mukana kaikki menot tontin hintaa lukuun ottamatta: niin maansiirto, perustukset, liittymät kuin viimeistely, ei vain talotehtaan ”muuttovalmiin” talon sisältämiä töitä. Varustus sisältää kaiken, mikä ok-taloon nykyisin kuuluu: sauna, kylpyamme, kuivaava pesukone, astianpesukone, laajakaista jne. Kaikki fyysiset rakennustyöt teetettiin vieraalla, kuuttia vastaan. Neliöhinnaksi tulee 3 000 €.



Kuva 4. Ristikkotalolle luonteenomaiset kantavat hirret jätettiin näkyviin vain sisäpuolelle.

Pikkutalon neliöhintaa nostaa se, että siinä on maksettu kaikista samoista liittymistä, märkätiloista, keittiöstä, varusteita ja laitteista, jotka suurempikin talo tarvitsee. Laskin vertailuhinnan talolle, joka olisi laajennettu 100 neliön suuruiseksi esimerkiksi kahdella lisämakuuhuoneella: otin mukaan vielä koneellisen ilmanvaihdon, jota suurempi talo saattaa kaivata. Hinnaksi muodostuisi tällöin 220 000 € eli 2 200 € neliöltä.

Työtunteja Loviisa-talon rakentaminen vaatii teoriassa noin 400, rakennusteollisuuden urakkahinnoittelun mukaisesti. Tässä ovat mukana vain varsinaiset työmaan kirvesmiestyöt, eivät ulkopuolelta tilatut urakat kuten eristäminen. Loviisa-talossa työtunteja kului hiukan teoreettista enemmän, syitä voi vain arvailla – ehkä teollisessa rakentamisessa revitään rakentajan selkänahasta enemmän kuin loviisalaisella pientalotyömaalla?

Ylläpitokustannuksiltaan Loviisa-talo tuntuu edulliselta. Ympärivuotisessa käytössä ja noin 10 c/kWh sähkön hinnalla sähköstä näyttäisi muodostuvan lämmityskaudella noin 150 €:n lasku kuukaudessa, ja koko vuoden ajalta keskimäärin noin 100 €/kk. Kaikki muut maksut yhteensä asettuvat samaan suuruusluokkaan.

Talon arkkitehtuuri modernisoituine perinteisen puutalon ilmeineen ja etelään suuntautumisineen tuntuu täydellisen onnistuneelta: esteetön aukeaminen luontoon on se juju.

4. Yhteenveto

Loviisa-talon perusteella ristikkotalo on erinomainen ratkaisu ainakin pienehkön omakotitalon rakentamiseen. Kustannukset ovat alhaiset, toteutus nopeaa, asukkaan vaikutusmahdollisuudet lopputulokseen lähes rajattomat, ja ylläpitokustannukset kohtuulliset.

Ristikkotalon pystyy rakentamaan, jos ei aivan talkooväki, niin ainakin tavallinen, pienikin rakennusfirma tai kirvesmiesporukka. Suunnitteluapua toki tarvitaan. Alkuun pääsee tämän esityksen lähteenä mainitusta kirjasta, kirjoittajalta saa lisää tietoa. Isompi yritys pystyisi lanseeramaan tästä menekkituotteen tai -tuotesarjan; kustannuksia saisi varmasti paljonkin alas prototyyppiin verrattuna, kun kokemus karttuisi, suunnitelmat hioutuisivat ja materiaalit voisi hankkia suuremmissa erissä.

Kaiken jälkeen huomio kiinnittyy siihen, kuinka paljon edullisempaa on tehdä hyvä puutalo yksilöllisesti käsityönä kuin ostaa se valmiina talotehtaalta. Missä ovat teollistumisen edut – eivät ne ainakaan kuluttajalle saakka näy? Jos autoteollisuuden tehokkuus olisi rakennusalan tasolla, henkilöauto kannattaisi tehdä itse eikä ostaa kaupasta.

Ja toisin päin: jos kerran yksilöllinen rakentaminen, ja etenkin ristikkotalojen tekeminen, on edullista ja tuottaa hyvän tuloksen, eikö valtiovallan pitäisi edistää juuri omatoimista rakentamista, hyvien mallipiirustusten tekemistä, uusien ideoiden palkitsemista ja lanseeraamista ja itselleen rakennuttavien paperisodan keventämistä?

Lähdeluettelo

[1] Ojala, Kari. Hirret ristiin ja taloksi. Aviador Oy, Helsinki 2023.

A2. Laskennallinen mallinnus

Sisäliikuntatilan joustolattian kosteustekninen toiminta

Konsta Kallio ja Pauli Sekki
AFRY Rakennusfysiikka

Tiivistelmä

Artikkeli perustuu vuonna 2023 valmistuneeseen diplomityöhön, jossa tutkittiin teoreettisesti, laskennallisesti ja koekohteen avulla joustolattiarakenteiden kosteusteknistä toimintaa. Joustolattiat ovat urheilulattioita, joissa jousto on toteutettu aikaisemmin puurungolla ja nykyisin matalilla synteettisillä joustinosilla synnyttäen rakenteen sisälle ilmavälin. Laskennallinen tarkastelu suoritettiin laskentaohjelmaa hyödyntäen, laskentatuloksia verrattiin koekohteessa suoritettuihin mittauksiin. Tarkasteltaviksi rakenteiksi valittiin puu- ja muovipintaisia, höyrynsulullisia ja höyrynsuluttomia sekä matalia ja korkeita rakenteita. Myös ilmavälin eri tuuletustavat huomioitiin laskennallisessa tarkastelussa. Tulosten perusteella betonipinnan päällä oleva höyrynsulkupinnoite pienentää joustolattiarakenteisiin kohdistuvaa kosteusrasitusta ja vähentää homeriskiiä sekä tuuletuksen tarvetta. Koneellisella tuuletuksella on rakenteiden toimivuutta parantava vaikutus, mikäli tuuletusilman kosteus ei nouse mikrobikasvulle kriittisen 80 % RH rajan yli. Rakennetyyppikohtaiset suositukset höyrynsulun ja tuuletuksen osalta esitetään taulukoituna tarkastellen muodonmuutosten herkkyyttä sekä tuuletustavan soveltuvuutta. Ensisijaisesti suositellaan 'matalatehoista' koneellista tuuletusta kaikille työssä tarkastelluille rakenteille. Myös höyrynsulkua voidaan suositella rakenteesta riippumatta.

1. Johdanto

Sisäliikuntatilojen joustolattiarakenteiden kosteustekninen toiminta on vähän tutkittu aihealue, ottaen huomioon, että liikuntapaikkoja rakennetaan varsin paljon. Joustolattiat toteutetaan usein betonilaatan varaan tuuletettuina, mutta rakenne- ja tuuletusratkaisut ovat verrattain uusia, minkä seurauksena niiden kosteusteknisestä toiminnasta, pitkäaikaiskestävyydestä, ylläpitotarpeista tai vauriomekanismeista ei ole juurikaan saatavilla aikaisempaa tutkimustietoa. Käytännössä toteutustavat vaihtelevat. Lisäksi yleinen käsitys rakenteen riittävästä tuuleuksesta ja tuuletuksen toteutusperiaatteista on kuitenkin hieman hatara. Myöskään betonilaatan kosteusrasituksen vaikutuksesta rakenteen toimivuuteen ei ole riittävästi tietoa.

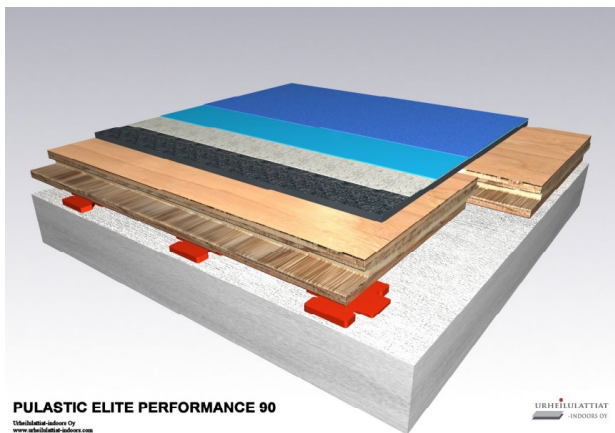
Artikkeli perustuu diplomityöhön [1], jossa tutkittiin joustolattiarakenteiden kosteusteknistä toimintaa. Tutkimuksen päätavoitteena oli selvittää tuuletustavan, pintamateriaalien ja vaihtelevien olosuhteiden vaikutuksia joustolattioiden kosteustekniseen toimintaan. Alatavoitteena oli selvittää vaurioitumismekanismit, kosteusrasitusten hallintatavat sekä merkittävimmät toteutusvaiheessa huomioitavat tekijät. Varsinainen tarkastelu tehtiin laskennallisesti, mutta aihetta käsiteltiin myös teoreettisesti sekä koekohteen seurantamittausdataa analysoimalla.

2. Tuulettuvat joustolattiarakenteet

2.1 Joustolattiarakenteet ja tuuletuksen toteutus

Diplomityössä [1] esiteltyjen haastatteluiden perusteella voidaan karkeasti arvioida, että nykyisin rakennettavista urheilulattioista n. 30 % on joustolattioita. Loput 70 % ovat suoraan betonilaatan

päälle asennettavia joustinmattoja, jotka vastaavat kosteustekniseltä toiminnaltaan muovimattoja, minkä seurauksena lattiatyyppejä ei käsitelty diplomityössä. Nykyaikaiset matalammat joustolattiat ovat yleistyneet 2000-luvun alussa syrjäyttäen korkeammat sahatavarasta rakennetut ristiinkoolatut rakenteet. Nykyaikaisissa joustolattioissa jousto tapahtuu synteettisissä joustinosissa (~10 mm) ja kuormitus jaetaan vanerilevyrungolla, tyypillisesti koivuvanerilla. Pintakerroksena joustolattiarakenteessa voivat olla erilaiset puu- tai muovipohjaiset materiaalit. Muovipohjaiset materiaalit ovat lähtökohtaisesti vesihöyrytiiviitä, puupohjaiset vesihöyryä läpäiseviä. Polyuretaanilla pinnoitettu joustolattiarakenne on esitetty kuvassa 1 alla.



YHDISTELMÄJOUSTAVA TYYPPI 4, EN 14904 HYVÄKSYTTY

Saumaton sandwich-rakenne

1	PU-pinta / W	2 mm
2	Kumijoustinkerros Regupol 6015H	7 mm
3	Uno Combi PU - kantava-jakava kerros	35 mm
	- syväpontattu koivuvaneri	
	- EPDM Bio-Pad™ kumityyny, ylikuorman varmistus	
	Rakennekorkeus	44 mm

Kuva 1. Esimerkki joustolattiarakenteesta [2].

Rakenteen sisälle muodostuu ilmaväli joustinosan koostuessa erillisistä joustintyynyistä. Ilmavälin tuuletus voidaan toteuttaa painovoimaisesti tai koneellisesti. Painovoimaisesti tuulettuvan rakenteen ilmavälin ilmaa liikuttavia voimia ovat käytön pumppausvaikutus ja vesihöyryn osapaine-erot. Näiden voimien voidaan olettaa olevan erittäin vähäisiä ja liikuttavan ilmaa ainoastaan lattian reunoilla lähellä sisäilman ilmayhteyttä. Ilmavälin tuuletuksen tehostamiseksi voidaan tuuletusväliin johtaa koneellisesti ilmaa (tuloilmanvaihto), ilmavälistä voidaan imeä ilmaa pois (poistoilmanvaihto) tai voidaan käyttää näiden yhdistelmää (tulo-poistoilmanvaihto). Koneellisella tulo-, poisto- tai tulo-poistoilmanvaihdolla varustettuja rakenteita tehdään nykypäivänä suuressa mittakaavassa suhteellisen vähän, arviolta 10 % joustolattioista on varustettu koneellisella tuuletuksella [1]. Koneellisella tuuletuksella voidaan kuitenkin esimerkiksi hallita tulevaisuuden muuttuvia olosuhteita tai mahdollistaa betonilaatan nopeampi päällystäminen. Tuloilman ilmastoinnilla (kuivatus/kostutus) voidaan ilmanvaihdon lisäksi edelleen hallita ilmavälin olosuhteita esimerkiksi kuivana talviaikana. Ilmastointia on käytetty lähinnä vaativissa erikoistapauksissa.

2.2 Kosteuslähteet ja vaurioriskit joustolattioissa

Uusien joustolattioiden suurin kosteusrasituksen lähde on yleensä betonirakenteen sisältämä rakennuskosteus. Muita kosteuslähteitä ovat esimerkiksi puurakenteiden sisältämä rakennuskosteus, sisäilman kosteus ja pesuvedet. Pääasiallisia vaurioriskejä ovat mikrobivauriot ja kosteuseläminen, jotka voivat muodostua esimerkiksi kosteudenvaihtelusta tai kosteuden kertymisestä rakenteisiin. Mikrobivaurion syntymisen keskeisenä tekijänä on kosteuden ja lämpötilan yhteisvaikutus [3]. Lämpötila joustolattiarakenteen sisällä on lähtökohtaisesti aina mikrobikasvun kannalta otollinen (lähellä sisäilman lämpötilaa), jolloin puurakenteisiin päätyvä kosteus voi tietyissä tilanteissa aiheuttaa mikrobivaurioitumisen mahdollistavat olosuhteet. Kosteuseläminen voi aiheuttaa käytettävyysongelmia puun hallitsemattomien muodonmuutosten seurauksena. Puu on voimakkaasti hygroskooppinen materiaali, joten kosteuden vaihtelun

seurauksena puussa tapahtuu kutistumista tai turpoamista [4]. Rakenteiden liiallinen kuivuminen esimerkiksi koneellisen tuuletuksen ja liian kuivan tuuletusilman seurauksena voi aiheuttaa vaurioitumista, kuten pintarakenteiden rakoilua tai halkeilua.

3. Joustolattiarakenteen kosteusteknisen toimivuuden tarkastelu

3.1 Koekohde

Tutkimuksessa hyödynnettiin AFRY Buildings Finland Oy:n (ent. Vahanen Rakennusfysiikka Oy) koekohteeseen suorittamia tutkimus- sekä seurantamittaustuloksia. Kohde on tammikuussa 2019 käyttöön otettu uusi liikuntahallirakennus, jossa on koneellisesti tulo-poistoilmanvaihdolla tuuletettu koivuvanerirunkoinen polyuretaanipintainen joustolattia. Tuuletusilmaa kuivatettiin kesä-lokakuun välinen aika. Joustolattian ilmavälin olosuhteita mitattiin kuudessa mittapistessä (MP1...MP6), lisäksi mitattiin koneellisen tuuletuksen tulo- ja poistoilman sekä sisäilman olosuhteita. Työssä tarkasteltava mittaajako oli aikavälillä 3.11.2018...28.2.2020. Mittaustulokset pohjautuvat Sisäilmayhdistyksen raporttiin 39 ja sitä vastaavaan Sisäilmastoseminaarin 2021 esitykseen [5].

3.2 Laskennallinen tarkastelu

Laskennallinen kosteustekninen tarkastelu suoritettiin hyödyntäen WUFI Pro 6.6 -laskentaohjelmaa. Rakenteiden homehtumisriskiä tarkasteltiin VTT:n ja TTY:n kehittämään Suomalaiseen homemalliin pohjautuen. Homemalli laskee lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvojen perusteella homeindeksin, joka voi saada arvoja välillä 0...6 [6]. Materiaalien pinnoilla ei esiinny homeenkasvua homeindeksin maksimiarvon ollessa alle yhden. Ehdon $M_{max} < 1,0$ täyttymistä pidettiin työssä tehtävissä tarkasteluissa kriteerinä toimivalle rakenteelle. Homeindeksit laskettiin rakenteiden ilmavälissä 5 mm päässä yläpinnasta. Muodonmuutoksia tarkasteltiin puurakenteiden kosteuspitoisuuksiin perustuen hyödyntäen laskennassa käytettyä koivuvanerin tasapainokosteuskäyrää. Näin saatiin arvioitua lattiarakenteen muodonmuutoksia kosteuden muutosten suhteen. Puuosien kosteuspitoisuudet laskettiin kunkin rakenteen puuosan tai -osien keskikohdasta.

3.3 Tarkasteltavat rakenteet

Mallinnettavien rakenteiden valitseminen tehtiin urheilulattiatoimittajien mallistoihin, diplomityön ohjausryhmässä käytyihin keskusteluihin sekä AFRY Buildings Finland Oy:n (ent. Vahanen Rakennusfysiikka Oy) tutkimusraportteihin perustuen. Tarkasteltavia rakenteiden perustyyppinä valittiin 3 kappaletta (AP1...AP3), joihin lisäämällä höyrynsulku (HS) saatiin rakenteita yhteensä 6 kappaletta. Työssä tarkastellut rakenteet on esitetty kuvassa 2 alla.

AP1* PU-pinta 10 mm Koivuvaneri 25 mm Ilmaväli 10 mm Betoni 250 mm EPS 100 mm	AP2 Parketti 20 mm Koivuvaneri 25 mm Ilmaväli 10 mm Betoni 250 mm EPS 100 mm	AP3 Mänty ponttilauta 32 mm Ilmaväli 100 mm Betoni 250 mm EPS 100 mm
AP1 HS PU-pinta 10 mm Koivuvaneri 25 mm Ilmaväli 10 mm Höyrynsulkuepoksi 1 mm Betoni 250 mm EPS 100 mm	AP2 HS Parketti 20 mm Koivuvaneri 25 mm Ilmaväli 10 mm Höyrynsulkuepoksi 1 mm Betoni 250 mm EPS 100 mm	AP3 HS Mänty ponttilauta 32 mm Ilmaväli 100 mm Höyrynsulkuepoksi 1 mm Betoni 250 mm EPS 100 mm

*Koekohteen rakenne

Kuva 2. Laskennallisessa tarkastelussa käytetyt rakennetyypit.

Lisäksi jokainen tarkasteltava rakenne mallinnettiin neljällä eri tuuletuksen ilmamäärällä: 0, 5, 50 ja 200 m³/h. Ilmamäärät 0 ja 5 m³/h kuvaavat painovoimaisesti tuulettuvia rakenteita. Ilmamäärä 50 m³/h kuvaa matalatehoista ja 200 m³/h korkeatehoista koneellista tuuletusta. Lattian ilmavälin ilmanvaihtuvuus eli ilmanvaihtoluku n (1/h) määräytyy kentän koon, ilmavälin korkeuden sekä ilmaväliin puhalletun ilmamäärän mukaan. Joustolattian koko on asetettu kaikissa tarkasteltavissa rakenteissa samaksi, 1000 m². Rakennetyypeissä AP1 ja AP2 ilmavälin korkeus on 10 mm, AP3 ilmavälin korkeus on 100 mm. Taulukossa 1 on listattu tuuletuksen ilmamäärät ja laskennassa käytetyt ilmanvaihtoluvut rakennetyypeittäin.

Taulukko 1. Ilmanvaihtoluvut rakennetyypeittäin.

Tuuletuksen ilmamäärä (m ³ /h)	Ilmanvaihtoluku n (1/h)		
	AP1 & AP1 HS	AP2 & AP2 HS	AP3 & AP3 HS
0	0	0	0
5	0,5	0,5	0,05
50	5	5	0,5
200	20	20	2

3.4 Laskentatapaukset

Laskenta jaettiin kahteen vaiheeseen. Ensimmäisen vaiheen tavoitteena oli varmistaa laskentamallin soveltuvuus sekä suorittaa laskennan herkkyytstarkastelut. Laskenta suoritettiin koekohdetta vastaavalla rakenteella sekä olosuhteilla. Laskennan tuloksia vertailtiin koekohteen mittaustuloksiin. Toisen vaiheen tavoitteena oli arvioida eri joustolattiarakennetyyppien kosteusteknistä toimintaa ja toimivuutta yleisemmällä tasolla. Tarkasteluun valittiin erilaisia joustolattiarakenteita erilaisissa tapauksissa, joissa muuttuvia reunaehtoja ovat rakenteiden alkuolosuhteet sekä sisä- ja ulkoympäristön olosuhteet. Tapaukset valittiin kuvaamaan mahdollisimman laajasti erilaisia tilanteita, tapaukset esitetty alla:

- T1 Perustilanne
 - Betoni alku 15 °C / 85 % RH,
 - Puuosat alku 15 °C / 70 % RH
 - Ulkoympäristö, maaperä 14 °C / 100 % RH
 - Sisäympäristö 20 °C / RH: Rakennusfysikaalinen mitoitussuosi Jokioinen 2011

- T2 Betonin alkukosteus korkea (Betoni alku 95 % RH)
- T3 Joustolattian asennus kosteana (Puuosat alku 85 % RH)
- T4 Rakennuspohja lämmennyt (Ulkoympäristö 18 °C)
- T5 Ilmastonmuutoksen vaikutus (Sisäympäristö Jokioinen 2080 8.5RCP)
- T6 Tuuletusilma ilmastoitu (Sisä-/tuuletusilma rajoitettu 40...60 % RH)

Laskennan ajanjakson pituudeksi valittiin 5 vuotta (1.1.2020...1.1.2025). Ajanjakson pituus määräytyi tarkasteltavien suureiden mukaan. Kosteuspitoisuuksien muutosta tarkastellaan koko ajanjaksolta, homemallin mukaisen homeindeksin maksimiarvon tarkastelujaksoksi valittiin laskentajakson viimeinen vuosi. Yhdistämällä rakenteet, tuuletuksen ilmamäärät sekä laskentatapaukset muodostui laskennan toisessa vaiheessa eri tilanteita kuvaavia laskettavia rakennemalleja yhteensä 144 kappaletta (6 rakennetta, 4 tuuletusta, 6 tapausta).

3.5 Ulko- ja sisäympäristön olosuhteet

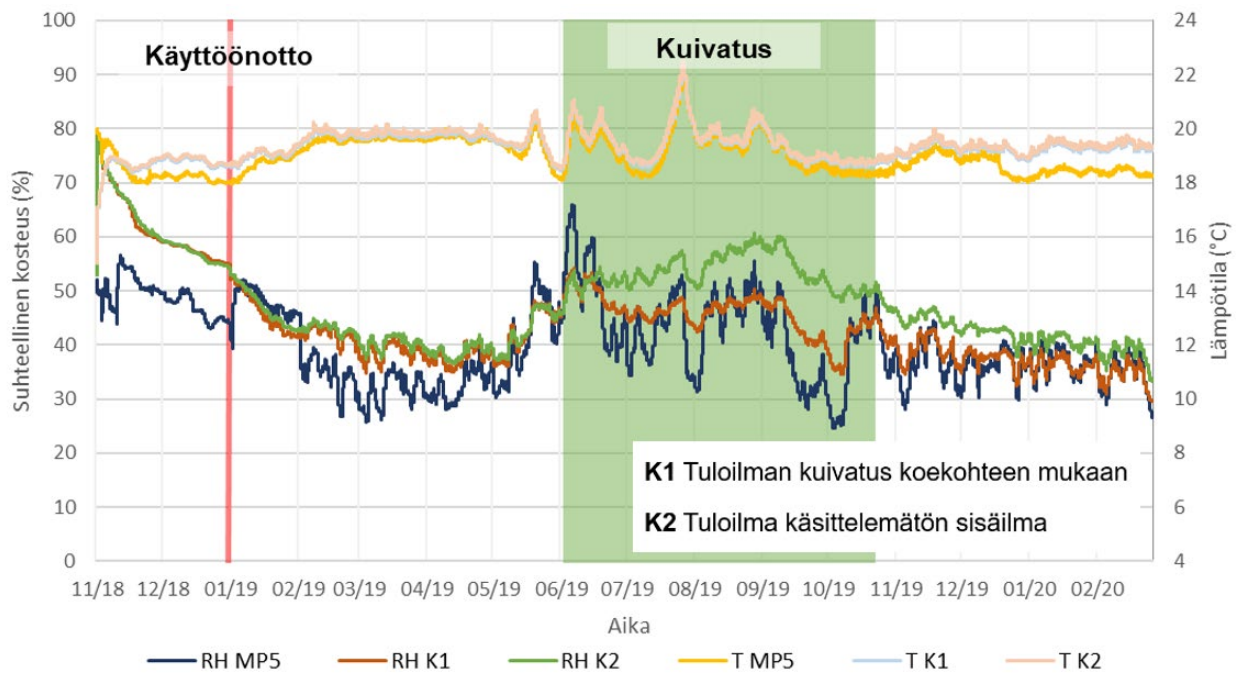
Laskennassa tarkasteltavat rakennetyypit loppuvat alapohjan eristekerrokseen, jonka alla on tyypillisesti vähintään kapillaarikatkosorakerros ennen maaperää. Ulkoympäristönä tarkasteluissa toimii eristeen alapintaa vasten olevan maaperän olosuhteet. RIL 255-1-2014:ssa [6] esitettyjen alapohjan lämpötilajakaumaesimerkkien perusteella perustilanteen T1 lämpötilaksi valittiin 14 °C. Tapaukseen T4 valittiin lämpötilaksi 18 °C, joka kuvaa keskialueen käytön aikana lämmenneen maapohjan lämpötilaa. Alapohjarakenteen alapuolisen maan suhteelliseksi kosteudeksi valittiin vakio 100 % RH.

Sisäympäristön olosuhteet määritettiin valitsemalla rakennusfysikaalinen mitoitusvuosi (ulkoilma) ja lisäämällä sen kosteuspitoisuuden arvoihin sisäilman kosteuslisä. Sisäilman kosteuslisänä käytettiin Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeiden (RIL 107-2012) mukaisia arvoja kaikissa tapauksissa, pois lukien tapaus T6, jossa kosteuspitoisuus oli rajoitettu. Kosteuslisä määräytyy sisäilman kosteusluokan ja ulkoilman lämpötilan mukaan. Liikuntasaleissa kosteuslisän mitoitusarvo on talvella ($T < 5 \text{ °C}$) 5 g/m^3 ja kesällä ($T > 15 \text{ °C}$) 2 g/m^3 , väliarvot interpoloitiin lineaarisesti. Sisäilman lämpötila oli kaikissa tapauksissa vakio 20 °C [7].

4. Tulokset ja tulosten tarkastelu

4.1 Laskentamallin soveltuvuus

Ensimmäisen vaiheen laskennan avulla varmistettiin laskentamallin toiminta ja soveltuvuus sekä suoritettiin laskennan herkkyystarkasteluja. Laskennan tuloksia verrattiin koekohteessa keskellä kenttää olevaan mittapisteeseen (MP5). Tarkastelu tehtiin sekä koekohteen mukainen kuivatus huomioiden että ilman kuivatusta. Jälkimmäinen kuvaa tyypillistä ratkaisua, jossa tuuletusilmana on käytetty käsittelemätöntä sisäilmaa. Ensimmäisen vaiheen laskennan tulokset on esitetty alla kuvassa 3.



Kuva 3. Tapausten K1 ja K2 ilmavälin suhteellisen kosteuden ja lämpötilan laskentatulosten vertailu koekohteen keskialueen mittaustuloksiin. Tapauksessa K1 sisäilma on kuivatettu, tapauksessa K2 ei.

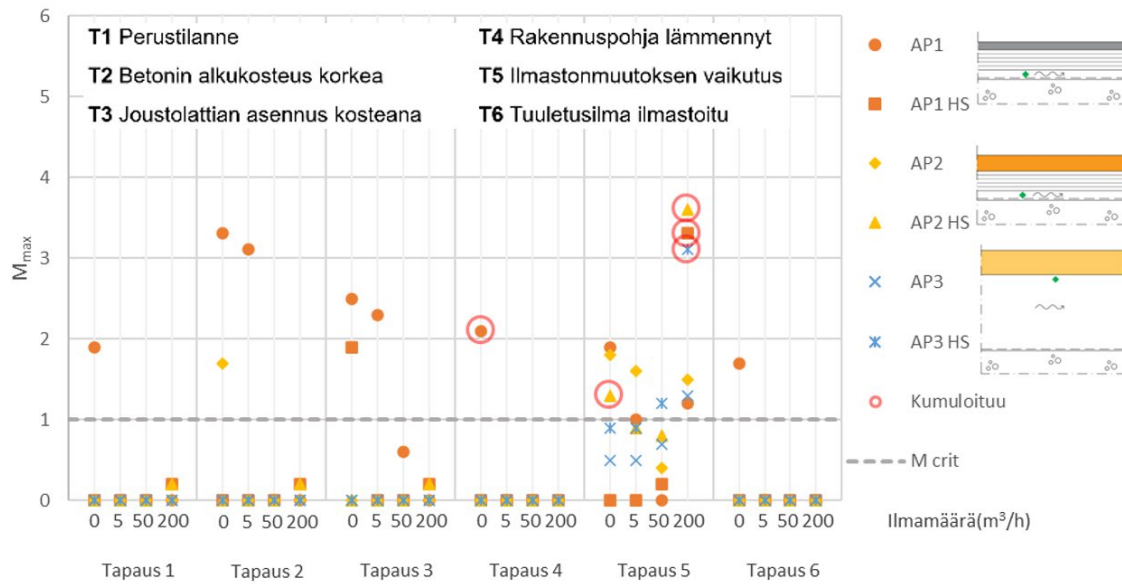
Ensimmäisen vaiheen laskennan tulosten perusteella voitiin todeta, että laskentamalli on soveltuva käyttöön. Koekohteen mukainen kuivatus huomioiden tulosten todettiin vastaavan varsin hyvin koekohteen mittaustuloksia (Kuva 3, K1). Myös ilman kuivatusta tehdyn tarkastelun tulokset vastasivat mittaustuloksia melko tarkasti (Kuva 3, K2). Kuivatusjaksolla tapauksien suhteellisissa kosteuksissa havaittiin luonnollisesti selkeä ero, mikä osoittaa, että tuloilman kuivatuksella on merkittävä rooli tulosten kannalta.

4.2 Yhteenveto laskennallisen tarkastelun tuloksista

Laskennan toisessa vaiheessa laskettiin olosuhteet (RH/T) rakenteiden ilmavälissä sekä kosteuspitoisuudet (%) puurakenteissa. Tulosten avulla arvioitiin rakenteiden kosteusteknistä toimintaa, vaurioitumisriskiä ja pitkäaikaiskestävyyttä.

4.2.1 Homeindeksi

Ilmavälin suhteellisen kosteuden laskentatulokset vaihtelevat kokonaisuudessaan välillä 40...90 % RH. Homeindeksin laskentatulokset on esitetty kuvassa 4. Homeindeksin kriittisiä arvoja ylittäviä tilanteita on kaikissa tarkastelluissa tapauksissa ja yhteensä 21/144 kpl. Ilmastonmuutoksen vaikutuksesta kohonnut sisäilman suhteellinen kosteus korostuu laskentatuloksissa selkeästi: homeindeksin raja-arvon ylittävistä tuloksista yli puolet 12/21 kpl saadaan tapauksessa T5. Laskentatuloksista erottuu myös koekohteen mukainen tiivispintainen rakenne AP1, joka on homeenkasvulle alttein painovoimaisesti tuulettuvan rakenteen ilmamäärillä. Homeindeksin ylittävistä tuloksista 9/21 kpl saadaan rakenteella AP1. Höyrynsuluttomilla rakenteilla homeindeksi ylittyy useammin kuin höyrynsulullisilla (14 kpl vs. 7 kpl). Lämpötilan laskentatulosten vaihtelu on hyvin vähäistä, vaihteluväli on alkulämpötilan tasaannuttua yhden asteen sisällä, 19...20 °C.



Kuva 4. Homeindeksin maksimiarvot laskennan viimeisenä 5. vuonna. Kumuloituvat tulokset on korostettu punaisella ympyrällä. Homeindeksin tarkastelupisteet on esitetty rakenneleikkauksissa.

4.2.2 Muodonmuutokset

Puuosien kosteuspitoisuuden laskentatulokset vaihtelivat kokonaisuudessaan välillä 6...28 %. Vuotuiset vaihtelut olivat suurinta koneellisesti tuuletetuilla rakenteilla. Varisinkin korkeatehoisen koneellisen tuuletuksen sekä epätiivin pintarakenteen yhdistelmällä puurakenteiden kosteuspitoisuus vaihtelee merkittävästi vuodenaikojen mukaan. Painovoimaisesti tuuletuvat rakenteet turpoavat asennuskosteuteen nähden keskiarvolta hieman enemmän kuin koneellisesti tuuletetut, jolloin riittävän asennusvaran tärkeys kasvaa. Tehokas koneellinen tuuletus kuivattaa rakenteita talviaikana, mikä kasvattaa riskiä kutistumisesta aiheutuville pinnan vaurioille.

5. Johtopäätökset

Höyrynsululla voidaan hallita uusien joustolattioiden merkittäväntä kosteusrasitusta, eli betonin sisältämää rakennuskosteutta. Höyrynsulku pienentää laskentatulosten perusteella joustolattiarakenteisiin kohdistuvaa kosteusrasitusta sekä madaltaa homehtumisriskiä ja siten parantaa varsinkin painovoimaisesti tuulettuvien tiivispintaisten rakenteiden toimivuutta. Höyrynsulku vähentää myös ilmavälin koneellisen tuuletuksen tarvetta.

Koneellinen tuuletus vähentää joustolattiarakenteisiin kohdistuvaa kosteusrasitusta. Laskenta- ja mittaustulosten perusteella koneellinen tuuletus lähtökohtaisesti parantaa rakenteen kosteusteknistä toimivuutta. Tuuletusilman kosteudella sekä kosteuden vaihteluvälillä on kuitenkin tulosten perusteella merkittävä vaikutus tuuletuksen lopulliseen toimivuuteen ja kostealla tuuletusilmalla on lattian toimivuutta heikentävä vaikutus, mikäli ilman kosteus nousee mikrobikasvulle kriittisen 80 % RH rajan yli.

Laskentatulosten perusteella tiivispintaisten rakenteilla erityisesti homehtumisriski on epätiivimpiä puupintaisia rakenteita korkeampi. Tällöin rakenteen ja tuuletuksen suunnittelulta vaaditaan lähtökohtaisesti puupintaisia rakenteita enemmän ja kosteusteknisen toiminnan huomioiminen suunnittelussa korostuu. Tulosten perusteella määritettiin rakennetyyppikohtaisia suosituksia, jotka huomioivat muodonmuutosten herkkyyden sekä tuuletustavan soveltuvuuden.

Suosituksset höyrynsulun ja tuuletuksen osalta on esitetty alla taulukossa 2.

Taulukko 2. Rakennekohtaisesti arvioitu muodonmuutosten herkkyys sekä tuuletustavan soveltuvuus.

Rakenne	Pinta-rakenteiden s_d (m)*	Herkkyys muodonmuutoksille	Tuuletustavan soveltuvuus (-, +, ++)		
			Paino-voimainen	Matala teho koneellinen (50 m ³ /h)**	Korkea teho koneellinen (200 m ³ /h)**
AP1	100	Matala	-	++	+
AP1 HS	100	Matala	+	++	-
AP2	5,5	Matala	+	++	+
AP2 HS	5,5	Matala	+	++	-
AP3	0,9	Korkea	+	++	-
AP3 HS	0,9	Korkea	+	++	-

*Ympäristön ilman suhteellisen kosteuden ollessa 70 % RH.

**Tarkastelut tehty 1000 m² kokoiselle kentälle, ilmanvaihtuvuus n (1/h) riippuu ilmavälin korkeudesta.

Ensisijaisesti suositellaan 'matalatehoista' koneellista tuuletusta kaikille työssä tarkastelluille rakenteille. Myös höyrynsulkua voidaan suositella rakenteesta riippumatta, koska se poistaa betonilaatan aiheuttaman yläpuolisiin rakenteisiin kohdistuvan kosteusrasituksen parantaen rakenteiden toimivuutta. Kaiken kaikkiaan kosteusteknisesti turvallisin vaihtoehto on koneellisesti tuuletettu ja ilmastoitu ratkaisu.

6. Yhteenveto

Tutkimuksessa selvitettiin tuulettuvien joustolattiarakenteiden kosteusteknistä toimivuutta. Pääkysymyksinä oli selvittää tuuletustavan, pintamateriaalien ja vaihtelevien olosuhteiden vaikutuksia joustolattioiden mikrobi- ja kosteusmuodonmuutosvaurioiden riskeihin. Tulosten perusteella muodostettiin tarkastelluille rakenteille taulukko, jota voidaan hyödyntää tuulettuvien joustolattiarakenteiden suunnittelussa.

Lähdeluettelo

- [1] Kallio, K. 2023. Sisäliikuntatilan joustolattian kosteustekninen toiminta. Diplomityö, Tampereen yliopisto. 133 s.
- [2] Unisport (2022). Urheilulattiat. Saatavissa (viitattu 9.9.2023): <https://www.unisport.com/fi/pulastic-elite-performance-90>
- [3] RT 08-11286. 2017. Puurakenteiden home- ja lahottajasienet sekä bakteerit. Rakennustietosäätiö. 15 s.
- [4] Puuinfo. 2020. Puun kosteuskäyttäytyminen. Saatavissa (viitattu 1.8.2023): <https://puuinfo.fi/suunnittelu/ohjeet/tekniset-tiedotteet/puun-kosteuskayttaytyminen/>
- [5] Kettunen, A-V. & Salo E. 2021. Liikuntasalin koneellisesti tuulettun puurakenteisen joustolattian kosteustekninen toiminta. Sisäilmayhdistys Raportti 39. Sisäilmastoseminaari 2021, SIY Sisäilmätieto Oy.
- [6] RIL 255-1-2014 (2014). Rakennusfysiikka I. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry. 500 s. ISBN 978-951-758-589-7.
- [7] RIL 107-2012 (2012). Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry. 219 s. ISBN 978-951-758-545-3.

Suuren puolilämpimän ryömintätilan olosuhteiden hallinnan laskennallinen tarkastelu

Petteri Huttunen ja Teemu Vanha-Viitakoski
Sweco Finland Oy

Tiivistelmä

Olosuhteet tuulettuvissa ryömintätiloissa saattavat muuttua kevät- ja kesäaikaan otollisiksi homeen kasvulle, kun lämmin ja kostea ulkoilma virtaa ryömintätilaan, jonka pohja on talven jälkeen vielä kylmä. Tästä aiheutuvaa suhteellisen kosteuden nousua voidaan estää lämmittämällä ryömintätilaa kesäisin. Uuden keskussairaala Assin alapohjarakenteeseen ja siihen liittyvän suuren ryömintätilan kosteusolosuhteiden hallintaan liittyen tehtiin rakennusfysikaalisia simulointeja, joilla pyrittiin selvittämään riittäviä lämmitystehojen arvoja, jotka pitävät suhteellisen kosteuden matalana. Laskennat toteutettiin Comsol Multiphysics -ohjelmalla, jolla ratkaistiin yhtäaikaaisesti ryömintätilan olosuhteet, jotka oli kytketty alapuolisen maan ja yläpuolisen alapohjarakenteen lämpö- ja kosteusteknisiin malleihin. Tarkasteluissa tutkittiin eri tapauksia, joissa vaihdeltiin ilmanvaihdon ja lämmitystehon ohjaustapaa sekä alapuolisen maan pinnalle asennettavia materiaalikerroksia. Tarkasteluissa löydettiin kustannustehokas ratkaisu, jossa maan päälle asennetaan ≥ 300 mm paksu kevytsorakerros, joka yhdessä lämmityksen kanssa auttaa olosuhteiden hallinnassa sitomalla kesäisin ylimääräistä kosteutta. Maasta haihtuvan kosteuden merkitys oli pieni verrattuna ilmanvaihdon aiheuttamaan kosteusrasitukseen, jonka kovuutta voidaan rajoittaa pitämällä ilmanvaihtuvuus kesäisin maltillisena.

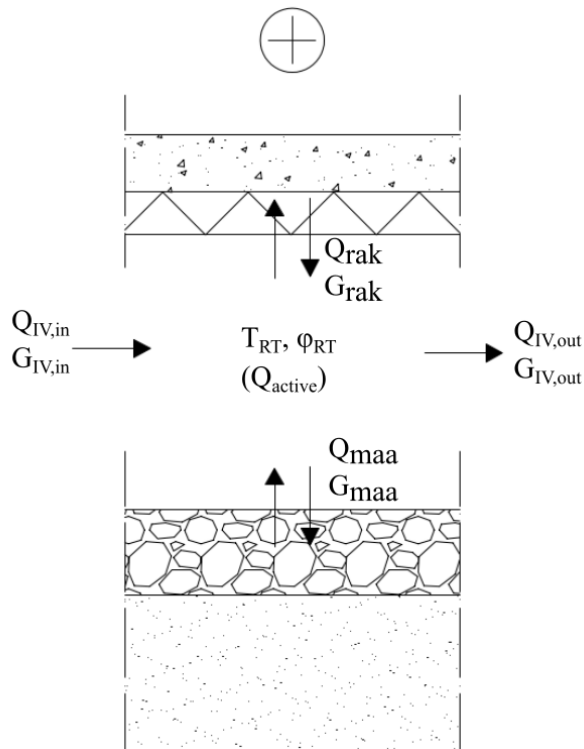
1. Johdanto

Tuulettuvissa ryömintätiloissa tunnetaan ilmiö, jossa talviaikana jäähtynyt ryömintätilan alapuolinen maa aiheuttaa kevät- ja kesäaikaan ryömintätilaan virtaavan kostean ulkoilman jäähtymistä ja siten suhteellisen kosteuden nousua, joka voi johtaa haitallisiin olosuhteisiin ryömintätilassa. Hämeenlinnan Ahvenistoon rakennettavan uuden keskussairaala Assin alapohjarakenteeseen ja siihen liittyvän korkean ryömintätilan kosteusolosuhteiden hallintaan liittyen tehtiin rakennusfysikaalisia simulointeja vuosina 2021–2022, joilla pyrittiin selvittämään lämmitystehoja, joiden avulla voidaan estää koneellisesti tuuletettavan ryömintätilan ilman suhteellisen kosteuden nouseminen liian korkeaksi kesäaikaan. Sairaalan pohjapinta-ala on suuri (noin $14\,000\text{ m}^2$) ja sen ryömintätilan korkeus vaihtelee ollen korkeimmillaan yli 2 metriä. Sairaalan suunnitteluvaiheessa päätettiin selvittää laskennallisesti, kuinka sairaalatekniikasta saatavaa merkittävää hukkalämpöä voitaisiin hyödyntää ryömintätilan olosuhteiden hallinnassa. Tässä artikkelissa esitellään laskelmia, joilla pyrittiin saamaan tietoa ryömintätilan lämmittämiseen kuluvista vuosittaisista energiamääristä käytettäessä erilaisia ilmanvaihtokertoimia ja suhteellisen kosteuden raja-arvoja lämmityksen ohjauksessa sekä saamaan käsitystä hetkellisistä tarvittavien lämmitystehojen suuruuksista. Artikkelissa ei käsitellä LVI-tekniisiä yksityiskohtia hukkalämmön siirtämisestä ryömintätilaan.

2. Laskentamenetelmät ja lähtötiedot

Laskennat toteutettiin Comsol Multiphysics -ohjelmalla (v. 5.5), joka on elementtimenetelmään perustuva yleisfysikaalinen simulointiohjelma [1], jolla voidaan tehdä vastaavia tarkasteluja lämmön- ja kosteuden siirtymiselle rakennusmateriaaleissa kuin laskentaohjelma WUFI:ssa [2].

Ohjelmassa voidaan rakentaa useista komponenteista koostuvia malleja, joissa eri komponentit edustavat esimerkiksi eri rakenneosia tai niihin liittyviä ilmatiloja. Komponentit voidaan kytkeä fysikaalisilta vaikutuksilta toisiinsa ja ratkaista yhtäaikaaisesti niiden avulla määriteltyjä lämmön- ja kosteudensiirto-ongelmia. Kuvassa 1 on havainnollistettu kuinka ryömintätilan (RT) täysin sekoittuneeksi oletettu ilma kytkettiin yksiulotteisiin malleihin, jotka kuvasivat yläpuolista alapohjarakennetta ja alapuolista maata.



Kuva 1. Ryömintätilan ilman lämpötilaan (T_{RT}) ja suhteelliseen kosteuteen (ϕ_{RT}) vaikuttavat lämpö- ja kosteusvirrat ($Q[W/m^2]$, $G[kg/(m^2s)]$).

Alapohjarakenteena tarkasteluissa oli 400 mm betonikerros, jonka alapuolella oli 120 mm paksu EPS-eristys. Malleissa käytettiin alapuolisena maana 10 metriä paksua maakerrosta, jonka päällä olevat sora- tai eristekerrokset vaihtelivat tarkastelutapauksittain. 10 metrin maan osalta mallinnettiin ainoastaan lämmön johtuminen ja sen yläpinnassa oletettiin olevan 100 % RH suhteellinen kosteus jatkuvasti. Reunaehdoksi 10 metrin syvyyteen asetettiin 5 °C vakiolämpötila. Sisäilman olosuhteina alapohjarakenteen yläpuolella käytettiin vakio-olosuhteita 21 °C ja 60 % RH. Lämmönsiirtokertoimenä ryömintätilan ilman ja alapohjarakenteen sekä maan pinnan välillä käytettiin arvoa 20 W/(m²K). Muut tarkasteluihin vaikuttavat tekijät vaihtelivat tapauksittain. Materiaaleille soveltuvat lämpö- ja kosteustekniset materiaaliominaisuudet valittiin joko laskentaohjelma WUFI:n materiaalitietokannasta tai lähteen [3] liitteistä.

2.1 Tarkastelutapaukset

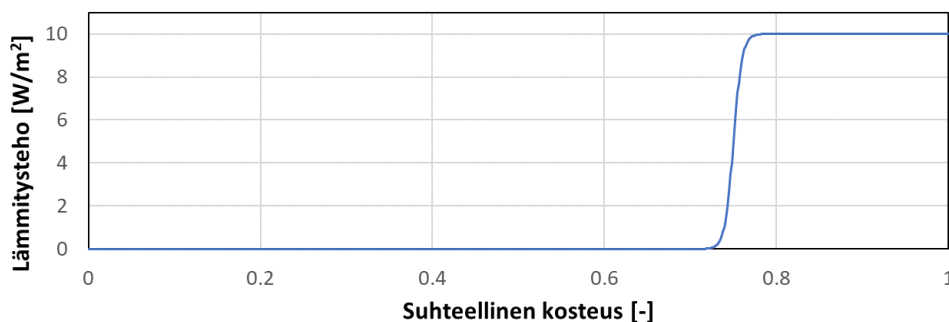
Koska ennen tarkastelujen tuloksia ei tiedetty tarkasti mitkä tekijät ovat merkittävimpiä ryömintätilan olosuhteiden hallinnan energiatehokkuudessa, tarkastelutapauksia valittiin yhdessä LVI-suunnittelijan kanssa sitä mukaa, kun edellisistä saatiin tuloksia. Ensimmäisissä tarkasteluissa verrattiin kuinka kaksi eri materiaalia – XPS ja kevytsora – asennettuna maan päälle ryömintätilassa vaikuttavat kokonaisuuden toimintaan. Lisäksi tutkittiin olisiko hyödyllistä asentaa vesihöyryn siirtymistä merkittävästi hidastava ns. geokalvo ($S_d = 50$ m)

kevytsorakerroksen alle. Ensimmäisissä tarkasteluissa ulkoilman olosuhteina käytettiin rakennusfysikaalista testivuotta Jokioinen 2100, joka on kriittinen ulkoilman kosteussisällön kannalta [3] ja siten tuottaa merkittävän kosteusrasituksen ilmanvaihdon kautta. Ensimmäisten tarkastelujen jälkeen tutkittiin myös, kuinka tilanne muuttuu etenkin lämmitysenergian kulutuksen osalta käytettäessä hyvin kylmää testivuotta, Sodankylä 2012.

Lämmitysrajaksi valittiin aluksi $\varphi_{lim} = 75 \% RH$, jonka ylittyessä mallissa syötettiin ryömintätilan ilmaan ylimääräistä lämpöä kaavan 1 mukaisella sigmafunktiolla:

$$Q_{active} = \frac{10 \text{ W/m}^2}{1 + \exp(-200 \cdot (\varphi_{RT} - \varphi_{lim}))} \quad (1)$$

Kuvassa 2 on esitetty kaava 1 visuaalisesti suhteellisen kosteuden välille 0...1. Lämmitystehon säätäminen kyseisen funktion avulla pehmentää merkittävästi numeerisen ratkaisijan toimintaa verrattuna tilanteeseen, jossa käytettäisiin lämpötehon säätökaavana lämmitysrajan kohdalla jyrkästi muuttuvaa porraskunktiota.



Kuva 2. Kaavan 1 mukainen sigmafunktio.

Ilmanvaihtuvuudeksi valittiin aluksi vakioarvo 0,75 1/h. Myöhemmissä tarkasteluissa tutkittiin lisäksi, kuinka lämmitystarve muuttuu, kun ilmanvaihtoa rajoitetaan lämpiminä kausina. Ryömintätilan lämpötilarajaksi valittiin 15 °C, jonka ylittyessä ilmanvaihto putoaa 0,75 vaihdosta tunnista 0,5 vaihtoon tunnissa kaavan 2 mukaisesti:

$$n = 0,75 - \frac{0,25}{1 + \exp(-15 \cdot (T_{RT} - 15 \text{ °C}))} \quad (2)$$

Tarkasteluja tehtiin yhteensä 24 kpl ja niissä vaihtelevat tekijät on taulukoitu seuraavassa luvussa yhdessä vuosittaiseen energiankulutukseen liittyvien tulosten kanssa.

3. Tulokset

Johtuen numeerisista tarkasteluista saatavan tulosdatan suuresta määrästä, tässä artikkelissa esitetään vain keskeisimpiä tuloksia, joista voitiin päätellä mitkä tekijät ovat merkittäviä lämmitettävän ryömintätilan olosuhteiden hallinnan energiatehokkuudessa. Taulukossa 1 on esitetty ensimmäisestä neljästä laskentatapauksesta määritetyt lämmittämiseen kuluvat energiat vuodessa, jolla kaavan 1 mukainen ideaalilämmitin pitää ryömintätilan suhteellisen kosteuden alle lämmitysrajan.

Taulukko 1. Ryömintätilan lämmitykseen kuluvat energiat ensimmäisistä laskentatarkasteluista. Ulkoilman olosuhteina Jokioinen 2100.

Ratkaisu	Paksuus	Ilmanvaihto	Lämmitysraja	Lämmitysenergia
-	[mm]	[1/h]	[% RH]	[kWh/m ² /vuosi]
XPS	30	0,75	75	3,75
XPS	60	0,75	75	3,47
Kevytsora	300	0,75	75	3,06
Kevytsora	600	0,75	75	1,81

Taulukossa 1 esitetyistä ensimmäisistä tarkasteluista havaittiin, että kevytsora on hygroskooppisen kosteuskapasiteettinsa vuoksi pohjamaan päällisenä kerroksena parempi materiaali tässä tapauksessa kuin XPS. Kevytsoran kasvattaminen 300 mm:stä 600 mm:iin pienensi vielä merkittävästi vuosittaista lämmitysenergian määrää. Näiden tulosten perusteella valittiin taulukon 2 mukaiset lisätarkastelut, joissa tutkittiin kuinka tarvittava lämmitysenergia vuodessa muuttuu, kun kevytsoraratkaisuihin vaihdellaan muita tekijöitä.

Taulukko 2. Ryömintätilan lämmitykseen kuluvat energiat ensimmäisistä lisätarkasteluista. Ensimmäisen sarakkeen ”G” viittaa geokalvolliseen ratkaisuun. Ilmanvaihto-sarakkeessa ”Vakio”: 0,75 1/h, ”Muuttuva”: Ks. kaava 2. Ulkoilman olosuhteina Jokioinen 2100.

Paksuus	Ilmanvaihto	Lämmitysraja	Ryömintätilan korkeus	Tarkastelu-aika	Lämmitysenergia
[mm]	-	[% RH]	[m]	[vuotta]	[kWh/m ² /vuosi]
600 + G	Vakio	75	1,2	2	1,55
600	Muuttuva	75	1,2	2	1,27
600	Vakio	80	1,2	2	0,69
600	Muuttuva	80	1,2	2	0,41
600	Muuttuva	80	1,2	10	0,50
600	Muuttuva	80	2,0	2	0,85
300 + G	Vakio	75	1,2	2	2,73
300	Muuttuva	75	1,2	2	1,66
300	Vakio	80	1,2	2	1,40
300	Muuttuva	80	1,2	2	1,17
300	Muuttuva	80	1,2	10	1,20
300	Muuttuva	80	2,0	2	1,62

Vertaamalla taulukon 2 geokalvollisten tapausten tuloksia taulukon 1 vastaaviin tapauksiin ilman geokalvoa todettiin, että vesihöyryn diffuusiota maasta ylös estävästä kalvosta ei ollut kokonaistaloudellisesti arvioituna merkittävästi hyötyä. Ero vuosittaisessa lämmitysenergiassa kaikkien 300 mm ja 600 mm tapausten välillä oli keskimäärin kaksinkertainen. Lämmitysrajaa nostamalla ja ilmanvaihtoa pienentämällä kevytsorakerroksen paksuuden kasvattamisen hyöty alkaa pienentyä. Taulukosta 2 nähdään myös, että tulokset eivät juurikaan muutu kasvattamalla laskennan pituutta 2 vuodesta 10 vuoden tarkasteluun, kun vuosittainen energia lasketaan viimeisen laskentavuoden tuloksista. Rakennuksen suunnittelun edetessä kävi ilmi, että ryömintätilasta tulee keskimäärin selvästi korkeampi kuin 1,2 metriä, jonka vuoksi tehtiin kaksi tarkastelua, joissa ryömintätilan korkeus ja ilmatilavuus on suurempi ($h = 2,0$ m). Korkeuden kasvattaminen kasvatti tarvittavan lämmitysenergian määrää 30...100 % odotetusti, koska ilmanvaihdon asetukset pidettiin samoina, jolloin suurempi tilavuusvirta aiheuttaa suuremman ilmankosteuskuorman.

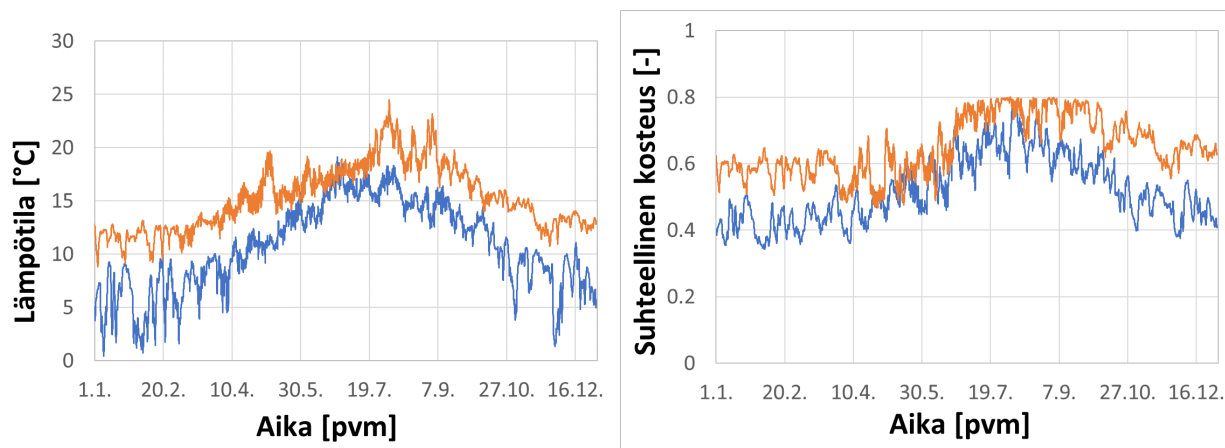
Taulukossa 3 on esitetty toisen lisätarkastelukierroksen tulokset, joissa ilmanvaihtokerrointa pienennettiin joko arvoon 0,50 tai 0,25 1/h (vakio). Lisäksi tutkittiin kuinka tilanne muuttuu, kun ulkoilman olosuhteina käytetään hyvin kylmää vuotta Sodankylä 2012 tarkoituksena saada tietoa voiko ilman korkean kosteussisällön sijaan kylmyydeltään kriittinen vuosi vaatia enemmän lämmitysenergiaa olosuhteiden hallitsemiseksi.

Taulukko 3. Toisen lisätarkastelukierroksen tulokset, joissa muutettiin ilmanvaihtokertoimia sekä ulkoilman olosuhteita. Ryömintätilan korkeus kaikissa tapauksissa 2,0 m.

Kevytsorakerroksen paksuus	Ilmanvaihto	Ulkoilma	Lämmitysenergia
[mm]	[1/h]	-	[kWh/m ² /vuosi]
300	0,5	Jokioinen 2100	1,50
300	0,5	Sodankylä 2012	0,01
300	0,25	Jokioinen 2100	1,02
300	0,25	Sodankylä 2012	0,0
600	0,5	Jokioinen 2100	0,79
600	0,5	Sodankylä 2012	0,0
600	0,25	Jokioinen 2100	0,26
600	0,25	Sodankylä 2012	0,0

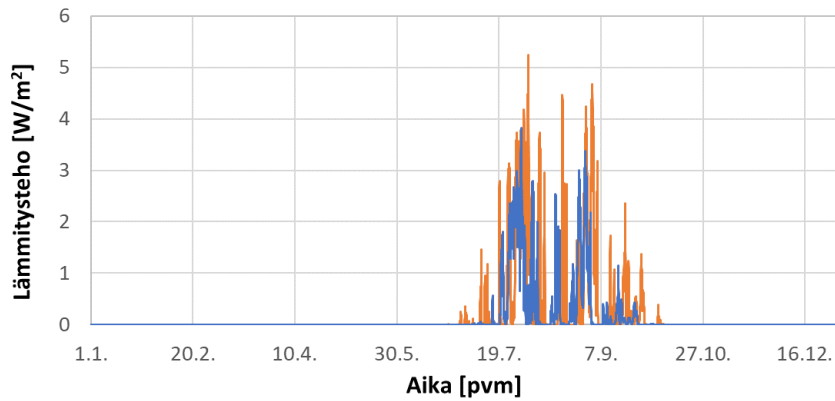
Taulukosta 3 nähdään, että Sodankylä 2012 ei ole selvästi kriittinen vuosi tässä tapauksessa eikä lämmitysenergiaa tarvittu juuri ollenkaan taulukon mukaisilla ilmanvaihtokertoimilla.

Käytettäessä ulkoilman olosuhteina kosteaa vuotta Jokioinen 2100 ilmanvaihtokertoimen pienentäminen 0,5:stä 0,25 vaihtoon tunnissa pudotti tarvittavan lämmitysenergian määrää molemmilla kevytsoran paksuuksilla noin 0,5 kWh/m²/vuosi. Kuvassa 3 on esitetty ryömintätilan lämpötila ja suhteellinen kosteus vuoden aikana kahdesta muuten samanlaisesta tarkastelusta mutta, joissa käytettiin eri ulkoilman olosuhteita.



Kuva 3. Ryömintätilan lämpötila ja suhteellinen kosteus kahdessa tarkastelutapauksessa. Oranssi: Jokioinen 2100, Sininen: Sodankylä 2012. Molemmissa: Ilmanvaihto 0,5 1/h (vakio), lämmitysraja 80 % RH. Kevytsora 300 mm.

Kuvassa 4 on esitetty lämmitysteho kahdesta muuten samanlaisesta tarkastelusta, mutta joissa käytettiin eri ilmanvaihtuvuuden arvoja. Kuvista 3 ja 4 nähdään, että lämmitystarvetta olosuhteiden hallinnassa on ainoastaan kesä-syysaikana.



Kuva 4. Lämmitysteho kahdessa tarkastelutapauksessa. Oranssi: Ilmanvaihto 0,5 l/h, Sininen: Ilmanvaihto 0,25 l/h. Molemmissa: Jokioinen 2100, lämmitysraja 80 % RH, kevytsora 300 mm.

Laskentatulokset kokonaisuudessaan ovat linjassa oppaassa RIL 107-2012 esitettyjen viitearvojen kanssa, joiden mukaan ryömintätilan olosuhteiden hallintaan kuuluva riittävä lämmitysenergia on tyypillisesti 2–3 kWh/m²/vuosi [4]. Lämmitysrajana on energiankulutuksen minimoinnin kannalta järkevää käyttää arvoa 80 % RH, jota pidetään myös homeen kasvulle mahdollisen olosuhdealueen suhteellisen kosteuden alarajana. Koneellisesti tuuletettavan suuren ryömintätilan ilmanvaihtuvuutta ei ole järkevää säätää liian suureksi, mutta toisaalta ilman tulee vaihtua jatkuvasti jonkin verran kosteusteknisen toimivuuden varmistamiseksi.

4. Yhteenveto

Suurelle koneellisesti tuuletettavalle ryömintätalalle tehtiin ajasta riippuvia laskennallisia tarkasteluja kesäaikaiseen lämmitykseen perustuvan olosuhdehallinnan näkökulmasta. Tarkastelujen avulla huomattiin, että maltillisen suhteellisen kosteuden avulla määritellyn lämmitysrajan sekä maltillisen ilmanvaihtokertoimen lisäksi energiankulutuksen minimoinnin kannalta hygrooskooppisella materiaalilla kuten kevytsoralla voi olla merkittävä vaikutus ryömintätilan ilman kuivana pitämisessä. Hygrooskooppiseen materiaaliin kuten kevytsoraan perustuva ratkaisu edellyttää toimiakseen jatkuvaa ilmanvaihtoa myös talvisin, jotta materiaaliin kesällä sitoutuva kosteus vapautuu talvella takaisin ulkoilmaan. Tulosten mukaan lämmitystarvetta on ainoastaan kesäaikaan, sillä talvisin ryömintätilaan virtaava ulkoilma lämpenee alapohjan lämpöhäviöiden ja maasta nousevan lämmön takia siten, että suhteellinen kosteus pysyy selvästi homeen kasvulle mahdollisen alueen alapuolella.

Lähdeluettelo

- [1] Comsol Multiphysics documentation. <https://doc.comsol.com/> (Viitattu 10.8.2023)
- [2] WUFI Product overview. <https://wufi.de/en/software/product-overview/> (Viitattu 10.8.2023)
- [3] Vinha, J., Laukkarinen, A., Mäkitalo, M., Nurmi, S., Huttunen, P., Pakkanen, T., Kero, P., Manelius, E., Lahdensivu, J., Köliö, A., Lähdesmäki, K., Piironen, J., Kuhno, V., Pirinen, M., Aaltonen, A. & Suonketo, J. (2013) Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tutkimusraportti 159. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-2949-8>
- [4] RIL 107-2012 Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL.

Laskentamalli rakennusten hybridienergiajärjestelmien nopeaan tuntitason tarkasteluun

Janne Hirvonen¹, Natalia Lastovets¹ ja Piia Sormunen^{1,2}

¹ Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka, Talotekniikka

² Granlund Oy

Tiivistelmä

Hiilineutraalit energiaratkaisut ja lämpöpumpputeknologia -tutkimusohjelman (HybE) osahankkeessa on kehitetty Python-pohjainen laskentamalli rakennusten hybridijärjestelmien dynaamiseen mallintamiseen. Malliin syötetään rakennuksen tuntikohtaiset energiankulutustiedot sekä tuntitason säätiedosto, jonka jälkeen sillä voidaan toteuttaa parametrianalyysi eri energiajärjestelmien päästö- ja kustannusvaikutusten laskemiseksi. Mallin avulla voidaan nopeasti tarkastella satoja erilaisia järjestelmäkombinaatioita ja löytää kustannustehokas ratkaisu erilaisissa hintaskenarioissa. Työkalu auttaa energiaremonttien esisuunnittelussa ja hybridienergiajärjestelmien rinnakkaisen käytön vaikutusten tarkastelussa ennen yksityiskohtaisemman rakennuksen energiamallin tuottamista kaupallisella ohjelmalla.

1. Johdanto

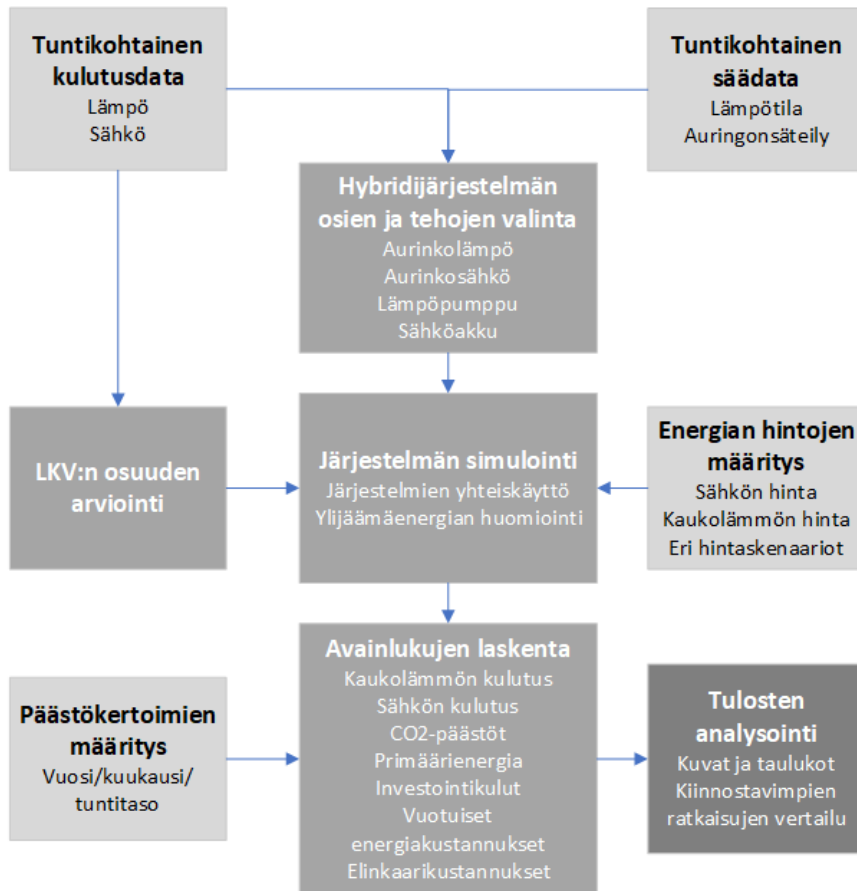
Rakennusten modernit hybridienergiajärjestelmät ovat monimutkaisia kokonaisuuksia, jossa rakennuksen oma sähkön ja lämmön tuotanto voi toimia kaukolämmön rinnalla. Järjestelmien vaikutusten arviointia tehdään joko karkeasti vuositasolla tai raskaiden ja paljon asiantuntemusta vaativien rakennussimulaatio-ohjelmien avulla tuntitasolla. Rakentamis- tai energiakorjaushanketta miettiessä olisi kuitenkin hyödyllistä olla käytössä nopea menetelmä, jolla voi helposti ja ilman suurta asiantuntemusta tehdä vertailuja erilaisten hybridijärjestelmäkoonpanojen vaikutuksesta.

Hiilineutraalit energiaratkaisut ja lämpöpumpputeknologia -tutkimusohjelman (HybE) [1] osahankkeessa on kehitetty Python-pohjainen laskentamalli, jolla voidaan nopeasti laskea suuri määrä eri järjestelmäkoonpanoja niiden vaikutusten tarkastelemiseksi. Laskentamalliin syötetään rakennuksen mitatut tuntitason sähkön ja kaukolämmön kulutustiedot sekä tuntitason säätiedot vuoden ajalta. Sen jälkeen ohjelma laskee läpi kaikki toivotut järjestelmäkokonaisuudet ja raportoi niiden energiankulutukset, hiilidioksidipäästöt ja elinkaarikustannukset. Mallilla on tällä hetkellä mahdollista laskea kaukolämpö-, maalämpö-, aurinkolämpö-, aurinkosähkö- ja akkuvarastojärjestelmien vaikutuksia. Parametrijolla voidaan käydä läpi tuhansia järjestelmäkoonpanoja samassa ajassa mikä menee yhteen tarkkaan simulointiin yksityiskohtaisemmalla menetelmällä, kuten IDA-ICE-simuloinnilla. Mahdollisuus tuntitason tarkasteluun on myös etu perinteiseen vuositasen laskentaan verrattuna. Laskentamalli ei mallinna itse rakennusta, vaan ainoastaan sen energiajärjestelmää. Malli ei korvaa yksityiskohtaista rakennuksen energiasimulointia, vaan toimii hankesuunnittelun tukena.

2. Laskentamallin toimintaperiaate

2.1 Laskentamallin toimintaperiaate

Laskentamallin oleelliset osat on esitetty kuvassa 1. Laskentamalli on toteutettu Python-ohjelmalla Google Colab -ympäristössä. Ohjelmaa voidaan käyttää tässä pilvipohjaisessa ympäristössä kopioimalla ohjelmakoodi käyttäjän Google Drive pilvitallennustilaan. Kaikki koodi on vapaasti muokattavissa.



Kuva 1. Laskentamallin toimintaperiaate.

Käyttäjältä vaaditaan tutkittavan rakennuksen energiankulutustietojen ja säätietojen lataaminen tietyssä formaatissa. Kehitystyössä on käytetty Granlund Manager -ohjelmasta saatuja kulutustietoja ja Ilmatieteen laitokselta ladattavia säätietoja [2]. Tietojen syöttämisen jälkeen määritetään hybridijärjestelmän komponenttien tarkasteltavat arvot, joista laskentamalli käy läpi kaikki erilaiset yhdistelmät.

Taulukko 1. Esimerkki parametrijossa käytettävistä muuttujien arvoista, teho suhteessa huippukulutuksiin.

Lämpöpumppu-kapasiteetti (%)	Aurinkolämpö-kapasiteetti (%)	Aurinkosähkö-kapasiteetti (%)	Akkuvaraston kapasiteetti (%)
0	0	0	0
20	50	50	50
40	100	100	100
60	200	200	150
80	300	300	200

Esimerkiksi Taulukko 1:n tapauksessa laskettaisiin $5 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 5 = 625$ järjestelmäkokoontapanaa. Lopuksi ohjelma esittää kiinnostavimmat ratkaisuvaihtoehdot, joita voidaan käyttää

hankesuunnittelun tukena tai lähtökohtana lisäanalyysille toisessa parametrijossa tai yksityiskohtaisemmassa simulaatiossa toisella laskentaohjelmalla.

2.2 Energialaskenta

2.2.1 Aurinkolämpö

Aurinkolämpökeräimen energiantuotanto arvioidaan hyötysuhdepohjaisella mallilla, huomioiden lämmitysverkon lämpötilan ja olettaen keräimeen aina syötettävän 20 °C lämpöistä nestettä. Aurinkolämpökeräimen lämmöntuotanto lasketaan EN 15316 tapaan yhtälöstä:

$$Q = A_{ST}(\eta_0 G - c_1 \Delta T - c_2 \Delta T^2), \quad (1)$$

missä A_{ST} on keräinten pinta-ala, G on keräinpinnalle osuva auringonsäteily, η_0 on keräimen optinen hyötysuhde, c_1 ja c_2 keräimen ensimmäisen ja toiseen asteen lämpöhäviökertoimet ja lämpötilaero ΔT on keräimen keskilämpötilan ja ulkolämpötilan erotus. ΔT määritetään yhtälöllä:

$$\Delta T = T_m - T_{amb} = \frac{T_{out} + T_{in}}{2} - T_{amb}. \quad (2)$$

Malli huomioi keräinpinnan asennuskulman pystysuunnassa ja itä-länsi-suunnassa ja laskee keräinpinnalle osuvan kokonaissäteilyn auringon aseman ja säätiedostosta luettujen hajasäteilyn ja suoran säteilyn tietojen mukaan [3]. Aurinkolämpökeräimen parametreinä käytettiin Savo-Solarin SF-100-01A-RUUKKI -mallin ominaisuuksia [4]. Lämpövarasto mallinnettiin standardista poiketen häviöttömällä energiapohjaisella mallilla siten, että energiaa voi varastoida N huipputehotunnin tuotannon verran.

2.2.2 Aurinkosähkö

Aurinkosähköpaneeliin kohdistuva säteily laskettiin samaan tapaan kuin lämpökeräimelle. Sähköntuotanto lasketaan säteilystä kiinteällä hyötysuhdekertoimella, jonka oletusarvo on 20 %. Parametrijossa aurinkosähköpaneelien teho mitoitetaan suhteessa kesäajan huippusähkökulutukseen mitatulla datalla.

2.2.3 Lämpöpumppu

Lämpöpumppu on mallinnettu energiapohjaisesti lämpöpumpun COP-käyrien avulla siten, että tuntikohtainen lämpöteho ja COP-arvo riippuvat lämpöpumpun tuottamasta lämpötilasta ja lämmönlähteen lämpötilasta. Lopullinen tuotantoteho ja sähköntarve saadaan interpoloimalla eri lämpötilatasojen tehokäyriä. Lämpöpumppu tuottaa vain yhtä lämpötilaa, joka määräytyy tuntikohtaisesti lämmitysverkon ja lämpimän käyttöveden lämpötilojen painotetusta keskiarvosta, niiden hetkellisen energiantarpeen suhteiden mukaan. Lämmitysverkon lämpötila taas määräytyy lämmityskäyrältä ulkolämpötilan funktiona. Energian varastointia ei huomioitu, vaan lämpöpumppua käytetään mitatun lämmitystarpeen mukaisesti joka hetki. Lämpöpumpun kompressori oletetaan invertteriohjatuksi siten, että sitä voidaan ajaa vapaasti millä tahansa osateholla.

Lämpöpumppu mitoitetaan suhteessa vuoden huippukulutukseen. Varajärjestelmäksi oletetaan kaukolämpö. Lämpöpumppua ohjataan sähkön hinnan ja aurinkosähkötuotannon mukaan. Jos lämpöpumpulla lämmön tuottamiseen vaadittavan sähkön kustannus on alempi kuin vastaavan lämpötehon tuottaminen kaukolämmöllä, lämpöpumppu käy. Jos kaukolämpö on halvempaa, sitä

käytetään siten, että kaukolämpöteho ei ylitä lämpöpumpun mitoituksen vajetta. Ts. jos lämpöpumppu on mitoitettu 80 % vuoden huipputehosta, kaukolämpö voi tuottaa korkeintaan 20 % vuoden huipputehosta. Näin rajoitetaan kaukolämmön tehomaksun suuruutta.

2.2.4 Sähköakku

Sähköakku varastoi sähköä ilman häviöitä. Akku pystyy purkamaan ja lataamaan tunnissa 10 % maksimivarauksestaan. Ohjausalgoritmi perustuu seuraavien tuntien sähkön hintoihin ja tietoon aurinkosähkön ylijäämästä. Oletetaan tunnetuksi milloin aurinkosähköstä on ylijäämää. Jos aurinkosähkön tuotannosta on ylijäämää, kyseisen tunnin sähkön hinta asetetaan nollassa. Akku toimii yksinkertaisilla säännöillä:

1. Jos aurinkosähköstä on ylituotantoa, lataa akkua.
2. Jos seuraavan viiden tunnin sähkön hintojen mediaani on tämän tunnin hintaa korkeampi, lataa akkua.
3. Jos seuraavan viiden tunnin sähkön hintojen mediaani on tämän tunnin hintaa matalampi, pura akkua oman kulutuksen kattamiseksi. Akkuun ladattua sähköä ei myydä takaisin verkkoon.

Akun ohjausalgoritmissa pyrittiin yksinkertaisuuteen eikä se välttämättä tuota kustannusoptimaalista tulosta. Parametrijossa akkukapasiteetti mitoitetaan suhteessa vuoden suurimpaan sähkön tuntikulutukseen mitatulla datalla.

2.3 Päästökertoimet

Sähkön päästökertoimina käytettiin vuoden 2022 kuukausikeskiarvoja [5]. Vaihteluväli oli 33–109 kg-CO₂/MWh, kesällä päästöt olivat pienimmillään ja talvella suurimmillaan Kaukolämmön päästöt oletettiin vakioksi koko vuodelle, arvolla 223 kg-CO₂/MWh [6].

2.4 Energian hinta

Kaukolämmön energialle määritetään kausihinnat (oletusarvona Helen Oy:n viiden vuoden kausihintojen keskiarvot). Lisäksi huomioidaan vuoden huipputehosta määräytyvä tehomaksu.

Taulukko 2. Skenaariot sähkön tuntihinnoille.

Skenaario	Profiilin muoto	Keskihinta (€/MWh)	Hinnan vaihtelu (€/MWh)
Matala, vakaa	2019	44	15.3
Matala, vaihteleva	2022	44	37.9
Korkea, vakaa	2019	154	53.4
Korkea, vaihteleva	2022	154	132.4

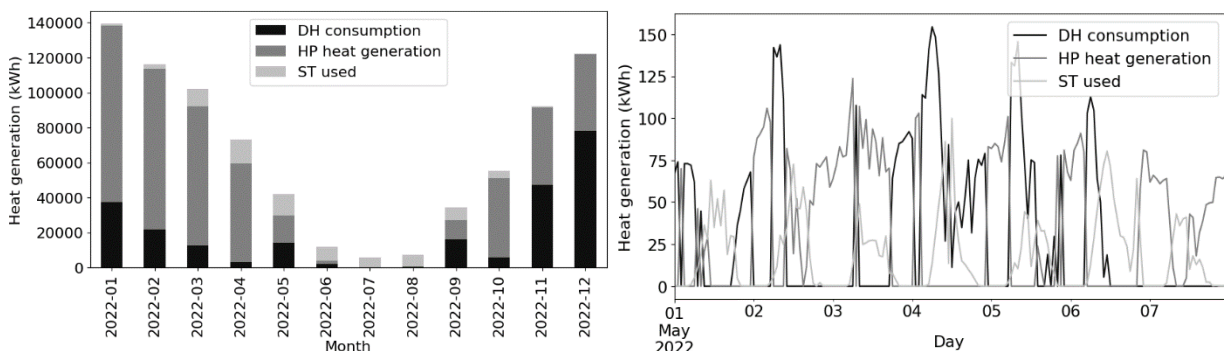
Sähkön hintaa tarkasteltiin tuntitasolla. Sille määritettiin neljä erilaista hintaskenaariota hybridijärjestelmien herkkyyksanalyysiä varten (Taulukko 2). Matalan ja vakaan hinnan skenaariossa käytettiin vuoden 2019 sähkön spot-hintoja. Korkean ja vaihtelevan hinnan skenaariossa käytettiin vuoden 2022 spot-hintoja. Vuoden 2022 hintaprofiili skaalattiin hintakeskiarvoltaan vuoden 2019 tasolle matalan ja vaihtelevan skenaarion muodostamiseksi. Vastaavasti vuoden 2019 hintaprofiili skaalattiin vuoden 2022 tasolle korkean ja vakaan profiilin muodostamiseksi. Sähkön hinnalla on merkittävä vaikutus hybridijärjestelmän kustannusoptimiin, mikä tekee skenaariotarkastelusta tärkeän työvälineen.

2.5 Järjestelmähinnat

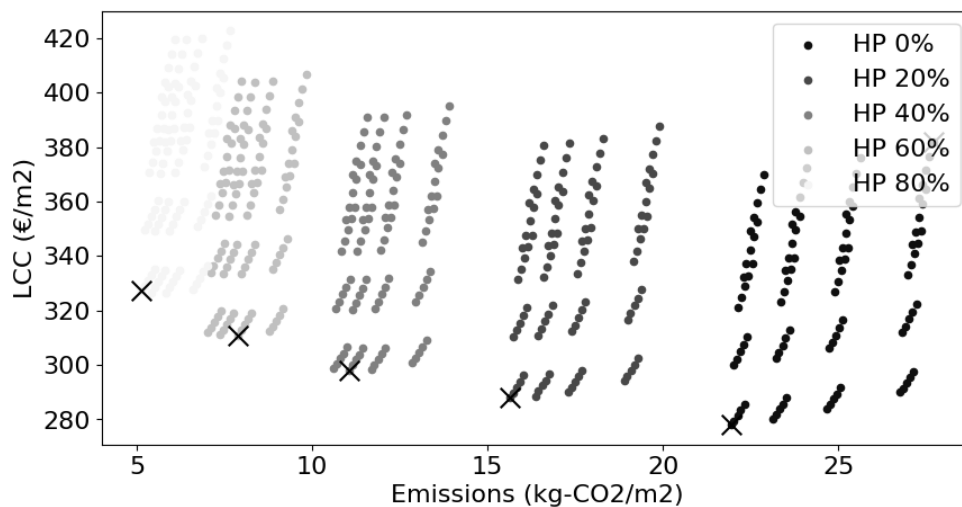
Energiajärjestelmien verottomina hintoina käytettiin yrityskumppaneiden tarjoamia tietoja. Aurinkolämpökeräimien hinta oli vakio 243 €/m². Sähköakkujen hintana käytettiin 665 €/kWh. Maalämmölle käytettiin kasvavan kapasiteetin mukaan laskevia hintoja, 4000-1500 €/kW_{th}, samoin aurinkosähkölle, 230-140 €/m².

3. Laskentaesimerkki

Ohjelmalla voi tarkastella yksittäisen järjestelmän toimintaa yksityiskohtaisella tasolla, esim. kuukausikohtaisesti tai tuntikohtaisesti (kuva 2).



Kuva 2. Lämmitysjärjestelmän toiminta kuukausitasolla (vas.) ja tuntitasolla (oik.).



Kuva 3. Parametriajon tulokset yhdelle rakennukselle ja hintaskenaariolle. Rasteilla on merkitty kustannustehokkaat ratkaisut eri päästötasoilla sekä referenssiratkaisu oikeassa yläkulmassa.

Parametriaajossa voidaan vertailla satoja ratkaisu vuosi/elinkaarisuhteella, eri hintaskenaarioille. Kuva 3 näyttää parametriaajon tulokset yhdelle rakennukselle ja hintaskenaariolle. Tulokset voidaan erotella halutun muuttujan suhteen, kuten esimerkikuvassa on esitetty lämpöpumppukapasiteetin suhteen. Eri päästötasoilta voidaan tunnistaa kustannustehokkaat ratkaisut visuaalisesti (kuva 3 rastit) tai numeroina (Taulukko 3).

Taulukko 3. Kustannustehokkaita järjestelmäratkaisuja eri päästöasoilla (ks. Kuva 3).

Tapaus	Päästöt (kg-CO ₂ /m ²)	LCC (€/m ²)	Investointi- kustannus (€)	Energia- kustannus (€/year)	Primääri- energia (kWh/m ²)	LP teho (%)	Aur.läm. teho (%)	Aur.säh. teho (%)	Akku teho (%)
0	27.7	381.8	0	52 844	103	0	0	0	0
99	21.9	278.0	133 450	31 634	71	0	300	300	200
199	15.6	288.1	237 311	27 719	64	20	300	300	200
274	11.1	298.1	312 204	25 264	61	40	200	300	200
349	7.9	310.9	369 261	24 114	59	60	100	300	200
499	5.1	327.2	444 448	22 521	54	80	300	300	200

4. Yhteenveto

Kehitettyä laskentamallia voi hyödyntää erilaisten hybridijärjestelmäkoonpanojen yhteisvaikutuksen arviointiin ja mahdollisten ratkaisujen esiseulontaan ennen tarkempia järjestelmäsimulaatioita. Laskentamalli tulee avoimeen jakoon ”Hiilineutraalit energiaratkaisut ja lämpöpumpputeknologia (HybE)”-hankkeen verkkosivulle [7]. Laskentamalli tulee olemaan vapaasti käytettävissä ja muokattavissa.

Laskentamallia voidaan kehittää edelleen lisäämällä uusia järjestelmävaihtoehtoja tai muuttamalla nykyisten järjestelmämallien toimintaa. Erityisen kiinnostavaa olisi korvata nykyisiä järjestelmämalleja todellisten järjestelmien mittausdataan pohjautuvilla malleilla.

Lähdeluettelo

- [1] Tampereen yliopisto, “HybE - hiilineutraalit energiaratkaisut ja lämpöpumpputeknologia,” *Tampereen korkeakouluuyhteisö*, 2023. <https://www.tuni.fi/fi/tutkimus/hybe-hiilineutraalit-energiaratkaisut-ja-lampopumpputeknologia> (accessed Aug. 07, 2023).
- [2] Ilmatieteen laitos, “Havaintojen lataus - Ilmatieteen laitos,” 2023. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus> (accessed Aug. 11, 2023).
- [3] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th ed. John Wiley & Sons, 2013.
- [4] Solar Keymark, “Solar thermal collector certificate PSK -042/2013, Savo-Solar SF 100-01A-RUUKKI.” Nov. 2013. [Online]. Available: http://www.estif.org/solarkeymark/Links/Internal_links/certif/PSK-042-2013.pdf
- [5] Energiategollisuus ry, “Sähkön kuukausitilasto,” *Energiategollisuus*, Jul. 19, 2023. https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/sahkon_kuukausitilasto.html (accessed Aug. 10, 2023).
- [6] Helen Oy, “Energian ominaispäästöt,” Feb. 27, 2017. <https://www.helen.fi/tietoa-meista/energia/energiantuotanto/sahkon-ja-lammon-ominaispaastot> (accessed Aug. 10, 2023).
- [7] HybE-hankkeen kotisivu, <https://research.tuni.fi/talotekniikan-tutkimusryhma/research/hybe/>

Dynaaminen painovoimaisen ilmanvaihdon laskentamalli ja infektioriskin arviointi potilashuoneessa

Natalia Lastovets¹, Mohamed Elsayed¹, Ville Silvonen², Anni Luoto^{1,3} ja Piia Sormunen^{1,3}

¹ Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka

² Tampereen yliopisto, Fysiikka, Aerosolifysiikka

³ Granlund Oy

Tiivistelmä

Riittävällä ilmanvaihdolla on tärkeä rooli hengitysilman viruspitoisuuden laimentamisessa sairaalataloissa. Nykyiset ilmajälitteisen infektioriskin arvioinnissa käytettävät mallit soveltuvat enimmäkseen koneellisen ilmanvaihdon tiloihin. Vaikka sairaalailmanvaihto on Suomessa toteutettu koneellisesti, painovoimainen ilmanvaihto on yleisempää eteläisissä Euroopan maissa, kuten Romaniassa. Painovoimaisella ilmanvaihdolla ilman ja siten aerosolien ja pisaroiden kulkuun vaikuttavat sekä stationaariset (huoneen fyysiset piirteet, ikkuna- ja oviaukkojen ja hormin koot) että dynaamisesti muuttuvat (ulko- ja sisäilmaolosuhteet, vuotoilmavirrat, oleskeluajat, ikkunoiden avaamisaikataulut) tekijät. Lisäksi tulee ottaa huomioon paikallisten ilmanpuhdistimien vaikutus sisäilman viruspitoisuuden laimentamiseen. Tämän takia ottaen huomioon ilmavirtojen jakautuminen painovoimaisella ilmanvaihdolla toteutetuissa tiloissa, tarvitaan yksinkertainen simulointimalli infektioriskien ennustamiseen.

Tämä tutkimus sisältää sisäilman laadun kenttämittauksia ja infektioriskisimulointeja sairaalarakennuksessa Romaniassa. Sisäilmamalli on rakennettu IDA ICE-simulointiohjelmistossa dynaamisesti muuttuvien ilmavirtausten laskemiseksi. Mallia validoitiin sisäilmamittauksia vastaan. Tämän jälkeen infektioriskin laskennassa käytettiin simuloituja ilmavirtoja ja huoneolosuhteita. Infektioriskimallin viruskohtaiset ja ihmisten aktiviteettien parametrit on arvioitu erikseen tieteellisen kirjallisuuden tutkimuksilla. Mittaus- ja simulaatiotulokset osoittavat, että painovoimaisella ilmanvaihdolla ei ole mahdollista laimentaa riittävästi ilmassa olevia epäpuhtauksia nykyisessä tapaustutkimuksessa. Tästä syystä tilaan asennettavan ilmanpuhdistimen käyttö on erittäin perusteltua.

1. Johdanto

Muutamat tapaustutkimukset ovat osoittaneet, että SARS-CoV-2 -virus voi säilyä elinkelpoisena aerosoleissa useiden tuntien ajan, mikä korostaa entisestään toimivan ilmanvaihdon ja ilmansuodatuksen merkitystä terveydenhuollon tiloissa. Ilmanvaihtojärjestelmä sairaaloissa tulee suunnitella vähentämään ilmateitse tapahtuvia virustartuntoja. COVID-19-pandemia on tuonut esiin painovoimaisen ilmanvaihdon rajoitukset ilmanlaadun ja ilmavirtojen hallinnassa. Vastaavien standardien ja säännösten vaatimuksien mukaisesti potilashuoneiden ilmanvaihtojärjestelmän on pystyttävä tuottamaan ilmanvaihto 4–12 l/h tunnissa (ACH) [1]. Korkean riskin ympäristöissä usein suositellaan koneellista ilmanvaihtoa säädetyillä ilmavirtauksilla ja ilmanpuhdistusta [2].

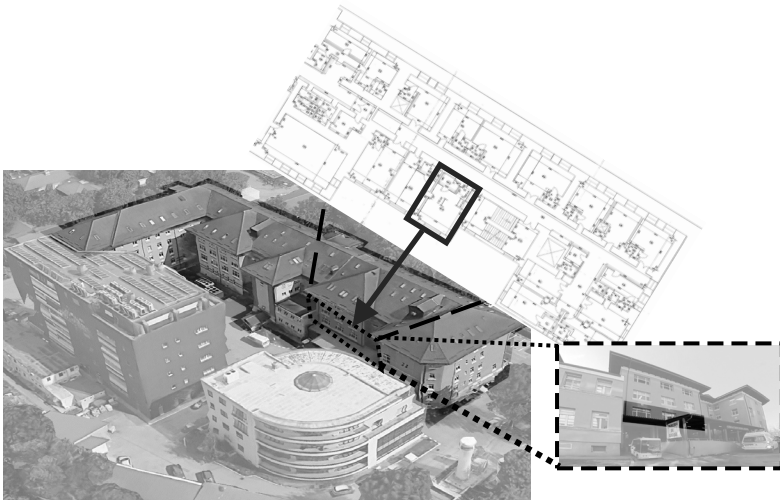
Painovoimaista ilmanvaihtoa käytetään edelleen yleisesti sairaaloissa, erityisesti lämpimällä ilmastovyöhykkeellä. Jos terveydenhuollon laitoksessa nykyisen painovoimaisen ilmanvaihdon vaihto koneelliseen ei ole heti mahdollista, tarvitaan eri teknologioiden yhdistelmä sisäilman laadun parantamiseksi [3]. Infektioriskin arviointi sisätiloissa painovoimaisella ilmanvaihdolla on

monimutkainen ja monitahoinen aihe, joka liittyy sekä rakennusfysiikkaan että viruksen ominaisuuksien, käyttäytymisen ja leviämisen erityispiirteisiin. Näiden haasteiden voittamiseksi tutkijat ja insinöörit käyttävät stationaaristen ja dynaamisten energialaskentamenetelmien, empiiristen yhtälöiden ja sisäilman virtaussimulaatioiden yhdistelmää. Tapaustutkimukset simulointitutkimuksessa virusriskistä painovoimaisella ilmanvaihdolla tehdään yleensä koulutusrakennuksiin, toimistoihin sekä liike- ja asuinrakennuksiin. Sairaalatiloista puuttuu kuitenkin näyttöön perustuvia tutkimuksia, jotka ovat strategisesti tärkeitä ympäristöjä, joita ei suljeta pandemiatilanteissa.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on kehittää laskemismenetelmä infektioriskin arvioimiseksi painovoimaisesti toteutetuissa terveydenhuoltorakennuksissa. Menetelmän avulla on myös mahdollista tarkistaa vaihtoehtoisia mahdollisia ilmanvaihto- ja ilmanpuhdistusstrategioita. Tässä paperissa esitetään tapaustutkimus infektioriskin arvioinnista painovoimaisesti tuuletetussa potilashuoneessa. Tapaustutkimuksessa käytettiin sisäilman parametrien mittauksia, painovoimaisen ilmanvaihdon suorituskyvyn dynaamista simulointia ja infektioriskin arviointia. Lopuksi infektioriskiin perustuvia ratkaisuja kuvataan käyttämällä ilmanvaihto- ja ilmanpuhdistusstrategioiden yhdistelmiä.

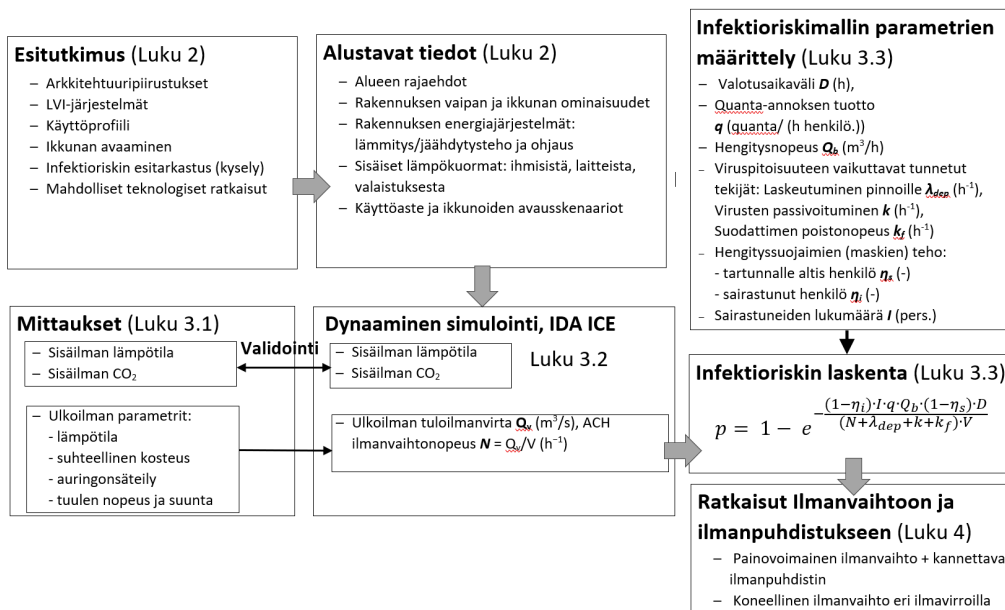
2. Tutkimustapaus

Tämä tapaustutkimus perustuu ilmanvaihto- ja ilmanpuhdistusratkaisujen analyysiin Matei Balsin infektiosairaalan potilashuoneessa Romaniassa, Bukarestissa (kuva 1). Sairaalarakennuksessa on tiiliseinät ja suuret ikkunat ja se on rakennettu 1900-luvun alussa. Suljettu käytävä erottaa potilashuoneet rakennuksen vastakkaisilla puolilla. Tutkittu tehohoituhuone sijaitsee nelikerroksisen sairaalarakennuksen toisessa kerroksessa.



Kuva 1. Tehohoituhuoneen sijainti Matei Balsin infektiosairaalan sairaalarakennuksessa.

Rakennuksen tuuletus tapahtuu vain painovoimaisella ilmanvaihdolla, jossa raitis ilma tulee vuotoilmasta ja aukkojen kautta sekä poistoilma poistuu ilmahormin kautta WC:stä. Potilashuonetta lämmitetään kaukolämpöjärjestelmään kytketyillä ikkunan alla sijaitsevilla puhallinkonvertereilla. Virukset voivat levitä sairaalatoissa koneellisen ilmanvaihtojärjestelmän ja ilmanpuhdistuksen puuttumisen vuoksi. Tutkimuksessa keskityttiin analysoimaan tilojen raitisilmanvaihtoa ja infektioriskiä dynaamisissa olosuhteissa (Kuva 2). Selvityksen mahdollisina teknisinä ratkaisuinä käytettiin kannettavien ilmanpuhdistimien yhdistämistä olemassa olevaan painovoimaiseen ilmanvaihtoon. Infektioriskilaskelmissa tarkastettiin vaihtoehtona myös koneellista ilmanvaihtoratkaisua.



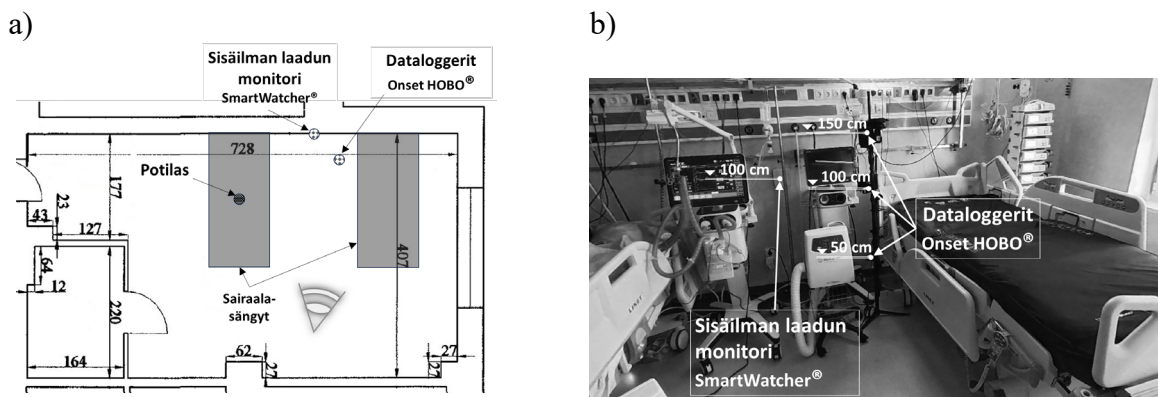
Kuva 2. Tapaustutkimuksen algoritmi ja menetelmät.

3. Menetelmät

Tässä osiossa käytetyt menetelmät kuvaavat esitutkimusvaihetta seuranneita tutkimusmenetelmiä (Kuva 2), mukaan lukien sisäilman parametrien mittaukset, dynaaminen simulointi ja infektoriskin laskenta.

3.1 Sisäilman parametrien mittaukset

Sisäilman lämpötilat ja hiilidioksidipitoisuudet mitattiin pilvipohjaisella sisäilman laadun monitoroinnilla SmartWatcher® ja dataloggereilla Onset HOBO®. Pilvipohjainen sisäilman laadun sensorit SmartWatcher® sijaitsi sisäseinällä 1 metrin korkeudella. Kolme dataloggeria, Onset HOBO®, asetettiin jalustalle kolmelle korkeudelle 0,5 m, 1,0 m ja 1,5 m (Kuva 3). Taulukossa 1 on esitetty mittauslaitteiden lämpötila- ja hiilidioksidianturien tekniset parametrit.



Kuva 3. Mittauslaitteiden sijainti tehohoituhuoneen piirustuksissa a) ja valokuvassa b)

Taulukko 1. Mittauslaitteiden ominaisuudet.

	SmartWatcher®		Onset HOBO®	
	Ilman lämpötila °C	CO ₂ ppm	Ilman lämpötila °C	CO ₂ ppm
Mittausalue	-10 to 50 °C	0–10000	0 to 50	0–5000 ppm
Mittaustarkkuus	±0.1 °C	±3 % lukemasta	±0.21	±50 ±5 % lukemasta
Resoluutio	0.1 °C	±30	0.024	1 ppm

3.2 Dynaaminen simulointi

IDA ICE-rakennussimulointiohjelmisto laskee vuotoilman määrän huoneeseen vuotoilman ja tuulen aiheuttamien voimien vuoksi [4]. Tässä tutkimuksessa IDA-ICE -laskentamalli oli tehty yhdessä tilassa, sairaalan tehohoituhuoneessa. Mallissa hyödynnettiin mitattuja ilmastotietoja ulkoilman olosuhteiden simuloimiseen. Mittauskampanjan aikana määritettiin huoneiden geometria ja ulkoilman parametrit. Rakennuksen vaipan, tuulen sekä valaistuksen ja laitteiden ominaisuudet arvioitiin visuaalisen havainnoinnin perusteella. Vyöhykelämpötasapaino laskettiin, jotta saavutetaan keskimääräinen sisäilman lämpötila 21 °C puhallinkonvektorin lämmitystehon määrittämiseksi. Ohjelmisto käyttää tuuliprofiiliyhtälöitä ja tuulenpainekertoimia arvioimaan ulkotuulen nopeutta eri korkeuksilla rakennuksen ominaisuuksien mukaan. Laskenta ottaa huomioon sisä- ja ulkoilman lämpötilaerot sekä painehäviöt. Laskettuja ilmanvaihtokertoimia käytetään seuraavassa kohdassa 3.3 kuvatussa infektioriskin arvioinnissa.

3.3 Infektioriskimalli

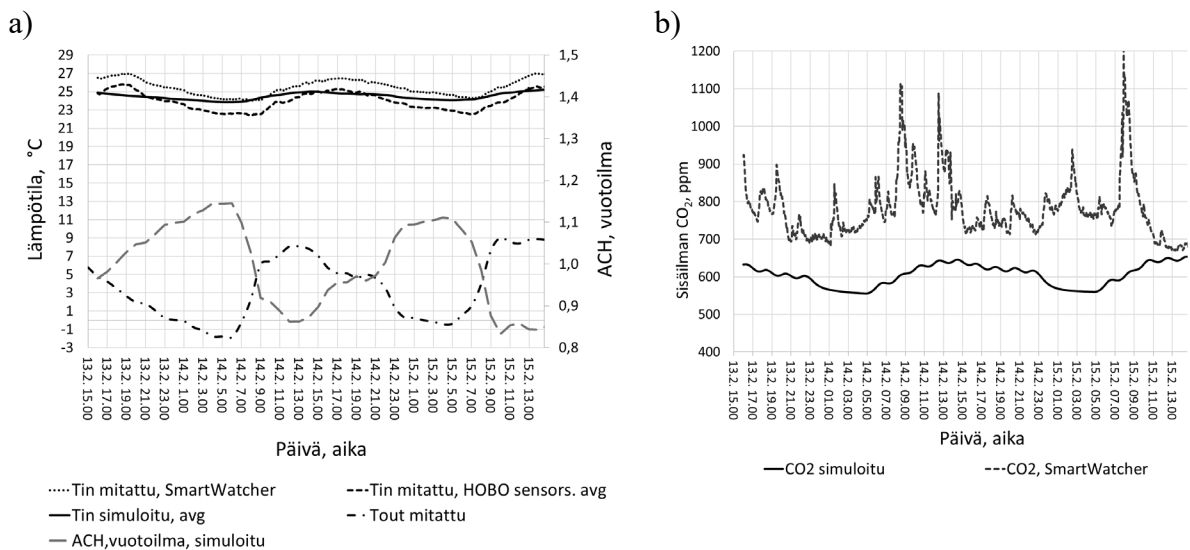
Infektioriskilaskelmat suoritettiin Wells-Rileyn mallilla (Kaava 1), jota käytetään laajalti ilmanvaihdon suunnittelussa ja sisäilman laatututkimuksissa infektioriskin arvioimiseksi erityisesti tarttuvien hengityselinten sairauksien. Mallin alkuarvot valittiin uusimmasta kirjallisuudesta [5]. Tutkimuksessa tarkasteltiin erilaisten quanta-annoksen tuottojen vaikutuksia infektioiden leviämisen sisätiloissa ilman kasvonaamioita ($\eta_s = 0$ ja $\eta_i = 0$) käyttämällä quanta-annoksen tuottojen vaihteluväliä 2–10 quanta/h per henkilö. Simulaatiot suoritettiin olosuhteissa, joissa yksi tarttunut ($I = 1$) ja yksi sairastunut henkilö olivat jatkuvasti läsnä. Dynaamista ilmavirtalaskelmaa käytettiin simuloimaan infektioriskiä painovoimaisella ilmanvaihdolla ilmanpuhdistimen kanssa ja ilman sitä. Lisäksi koneelliset ilmanpuhdistimet ilman ilmanpuhdistimia laskettiin potilashuoneiden suositelluilla vähimmäis- ja enimmäisilmanvaihdolla (4–12 ACH) [1].

$$p = 1 - e^{-\frac{(1-\eta_i) \cdot I \cdot q \cdot Q_b \cdot (1-\eta_s) \cdot D}{(N + \lambda_{dep} + k + k_f) \cdot V}} \quad (1)$$

- missä
- p = infektioriskin todennäköisyys
 - D = valotusaikaväli (h)
 - V = huoneen tilavuus, 81 m³
 - q = quanta-annoksen tuotto, 2–10 quanta/h henkilö
 - Q_b = hengitysnopeus, 0,5 m³/h
 - N = ilmanvaihtokerroin (ACH), 4–12 h⁻¹
 - λ_{dep} = virusten laskeutuminen pinnoille, 0,3 h⁻¹
 - k = virusten passivoituminen, 0,6 h⁻¹
 - k_f = suodattimen poistonopeus 4,5 h⁻¹
 - η_s ja η_i = hengityssuojaminen tartunnalle η_s ja sairastuneille η_i henkilölle, 0 h⁻¹
 - I = sairastuneiden lukumäärä, 1 henkilö

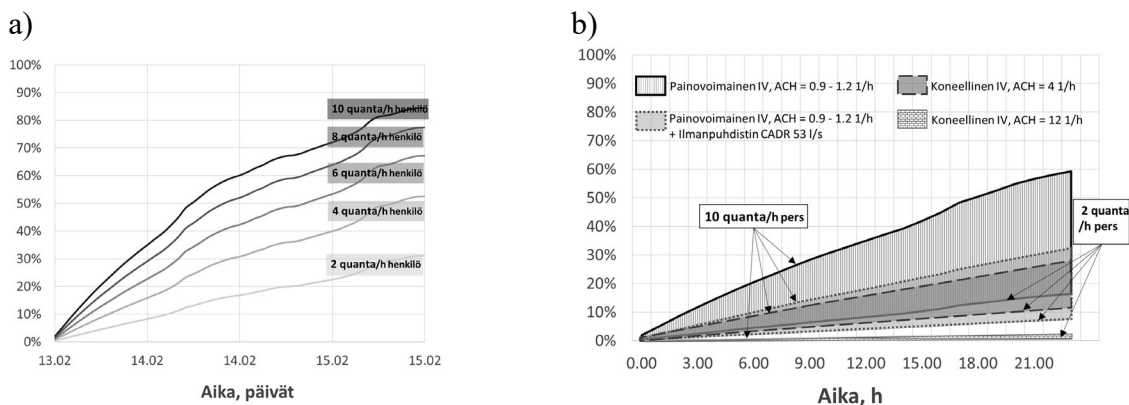
4. Tulokset

IDA-ICE-mallilla simuloituja ilman lämpötiloja ja CO₂-päästöjä verrattiin mittauksiin rakennussimulaatiomallin validoimiseksi (Kuva 4). Simuloidut ilmanlämpötilat olivat lähellä mittaustuloksia. Tässä tapauksessa painovoimainen ilmanvaihto mahdollistaa ilmanvaihtokertoimen 0,9–1,2 ACH. Koska ulkoilman lämpötila pääosin määritti ilmavirrat painovoimaisella ilmanvaihdolla, simuloidut ilmanvaihdot olivat korkeammat yöllä, kun ulkoilma oli kylmempää (Kuva 4a). Tehoitohuoneessa mitatut CO₂-päästöt vaihtelivat päivän mittaan riippuen käyttäjien toiminnasta, ilmanvaihdosta ja muista ympäristöolosuhteista, jotka olivat vaikeita tallentaa ja simuloida (Kuva 4b).



Kuva 4. Mitatut ja simuloidut sisäilman lämpötilat (a) ja CO₂-päästöt (b).

Infektion todennäköisyydet laskettiin mittausjakson aikana ilman ilmanpuhdistinta (Kuva 5a). Infektoriskin tulokset riippuvat merkittävästi quanta-annoksen tuotosta. Kuva 5b esittää tartuntariskin kasvua altistus päivän aikana erilaisilla ilmanvaihtojärjestelmillä ja ilmanpuhdistimen lisäämisellä. Pelkästään painovoimaisella ilmanvaihdolla infektoriskin todennäköisyys on ennustettavasti suurin. Koneellisen ilmanvaihtojärjestelmän käyttö korkealla ilmanvaihdolla ACH 12 osoittaa parhaan tehokkuuden vähentää infektoriskiä eri quanta-annoksen tuotoilla. Koneellisella ilmanvaihdolla, jossa on alhaisempi ACH, voi kuitenkin olla rajoituksia infektoriskin tehokkaassa vähentämisessä, erityisesti skenaarioissa, joissa quanta-annoksen tuotot ovat korkeat.



Kuva 5. Infektoriskin todennäköisyys mittausjakson (a) ja altistus päivän (b) aikana.

5. Yhteenveto

Tässä tutkimuksessa tutkittiin painovoimaisesti tuuletettua potilashuonetta Bukarestissa, Romaniassa. Sisäilmamittaukset ja rakennussimulaatiot yhdistettiin infektioriskin arviointiin mahdollisten ilmanvaihto- ja ilmanpuhdistustekniikoiden selvittämiseksi. Tutkittavan huoneen simulaatiomalli kehitettiin IDA ICE -ohjelmistolla ja validoitiin mittauksin. Simulaatiomallissa laskettiin dynaamiset ilmavirtaukset painovoimaisella ilmanvaihdolla ja sovellettiin infektioriskin arvioinnissa.

Tutkimus paljasti tietoa tarkasteltavasta tehohoituhuoneesta, jossa painovoimainen ilmanvaihto ei yksinään osoittautunut riittäväksi ilmassa olevien epäpuhtauksien ja virusten vähentämisessä. Potilashuoneissa tarvitaan yhdistetty ilmanvaihtostrategia ja ilmanpuhdistus tartunnan estämiseksi. On kuitenkin syytä huomata, että tulevissa tutkimuksissa olisi hyödyllistä tarkastella erilaisia painovoimaisen ilmanvaihdon ratkaisuja ja niiden vaikutuksia. Esimerkiksi ikkunoiden avaaminen voi olla yksi tehokas keino lisätä ilmanvaihtoa ja vähentää tartuntariskiä, mutta se voi myös aiheuttaa muut haasteet, kuten epä mukavuus, veto ja melu sisätiloissa. Kehitettyä simulointityökalua voidaan käyttää infektioriskianalyysiin sairaalan ilmanvaihtojärjestelmän toiminnan optimoimiseksi. Tutkimus auttaa ymmärtämään infektioriskiä sisäympäristöissä ja mahdollistaa optimoitujen ilmanvaihto- ja ilmanpuhdistusstrategioiden löytämisen ilmassa leviävien tartuntatautien leviämisen vähentämiseksi.

6. Kiitokset

Tutkimus on toteutettu osana Business Finlandin rahoittamaa E3-pandemianhallintahanketta (www.pandemicresponse.fi). Kiitämme myös hankkeessa mukana olevia tutkimuslaitos- ja yrityskumppaneita Tamlink (Tuotekehitys Oy Tamlink), Smartwatcher Oy, ISEC (Inspector Sec Oy) sekä Matei Balsin sairaalan henkilökunnalle.

Lähdeluettelo

- [1] Lancet COVID-19 Commission. 2022. Proposed Non-infectious Air Delivery Rates (NADR) for Reducing Exposure to Airborne Respiratory Infectious Diseases. Available online: <https://covid19commission.org/safe-work-travel> (accessed on 18 May 2023).
- [2] World Health Organization (WHO). 2021. Roadmap to improve and ensure good indoor ventilation in the context of COVID-19. Available online: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240021280> (accessed on 18 May 2023).
- [3] Fennelly, M., Hellebust, S., Wenger, J., O'Connor, D., Griffith, G.W., Plant, B.J. and Prentice, M.B., 2023. Portable HEPA filtration successfully augments natural-ventilation-mediated airborne particle clearance in a legacy design hospital ward. *Journal of Hospital Infection*, 131, pp. 54-57.
- [4] Bring, A., Sahlin, P. and Vuolle, M., 2000. Models for Building Indoor Climate and Energy Simulation: A Report of IEA SHC Task 22: Building Energy Analysis Tools; Subtask B: Model Documentation: Version 1.02, December 1999. Kungl. Tekniska högsk., 110 s.
- [5] Kurnitski, J., Kiil, M., Mikola, A., Vösa, K. V., Aganovic, A., Schild, P., Seppänen, O. 2023. Post-COVID ventilation design: infection risk-based target ventilation rates and point source ventilation effectiveness. *Energy and Buildings*, 113386.

Sisäilmasto-olosuhteiden kytketty virtauslaskenta

Antti Mikkonen
Sweco Finland Oy

Tiivistelmä

Tässä työssä etsitään hyvää kompromissia tarvittavan tarkkuuden ja toteutettavissa olevan hinnan välillä sisäilmasto-olosuhteiden kytkettyyn virtauslaskentaan. Sovelluksena käytetään matkailuauton asunto-osaa. Kytketty virtauslaskenta tarkoittaa tässä yhteydessä ilman ja kiinteiden kappaleiden, esim. seinät, lämpötilan laskentaa samanaikaisesti. Usein kytkentä kiinteiden kappaleiden ja ilman välillä tehdään asettamalla pinnoille monivyoöhykemallista, kuten IDA-ICE, saatu vakioilämpötila. Tällöin kuitenkin menetetään merkittävästi luotettavuutta virtauslaskentamallin tuloksissa. Virtauslaskennassa ratkaistaan tyypillisesti muutamasta miljoonasta muutama sataan miljoonaan lämpötilapistettä kerralla. Lisäksi esimerkiksi säteilylämmönsiirron tai pienten kylmäsiltojen huomiointi on vaikeaa, jos pinta lämpötilat täytyy asettaa etukäteen. Kiinteiden kappaleiden täyden huomioimisen suurin este on niiden mallintamisen vaatima käsityö. Kiinteän kappaleen lämmönsiirron mallinnus aiheuttaa vain pienen lisälaskentakustannuksen, mutta tarvittava mallintajan lisätyöaika on merkittävä. Hyväksi kompromissiksi osoittautui mallintaa vain sisäilmaa lähinnä oleva materiaalikerros kokonaan ja lisätä ulompien kerrosten vaikutus yksiulotteisesti U-arvoja hyödyntäen.

1. Johdanto

Sisäilmasto-olosuhteiden arviointi virtauslaskentaa käyttäen on toistuva insinööritehtävä rakennusalalla. Käyttäjän kokema lämpöviihtyvyys määräytyy ilman lämpötilan, pintojen lämpötilojen ja ilman liikkeen perusteella. Lisäksi käytetään vectoriskin käsitettä, joka lasketaan edellisten perusteella. Usein käytetty standardi aiheesta on EN ISO 7730 [1].

Tyypillisiä käyttökohteita lämpöviihtyvyys tarkastelulle ovat esimerkiksi toimistot. Toimiston sijaitessa monista huoneista ja monimutkaisesta talotekniikasta koostuvassa kerrostalossa, monivyoöhykemallinnus, esim. IDA-ICE, on usein välttämätön suunnittelun työkalu. Monivyoöhykemallista saatava tieto jää kuitenkin usein tilan keskilämpötilan tasolle.

Virtauslaskennassa ilmatilavuus jaetaan miljooniin pienempiin tilavuuksiin, joille kaikille lasketaan paikalliset arvot lämpötilalle, nopeutelle, yms. Laskentamenetelmä tarjoaa hyvin yksityiskohtaista ja tarkkaa tietoa, mutta käytettävissä olevat resurssit rajoittavat tuloksen luotettavuutta. Virtauslaskenta on liian kallista, jotta sillä kannattaisi mallintaa kaikkia tiloja kaikissa tilanteissa. Tyypillisesti tarkastelu rajoittuu kesä- ja talvitapaukseen jossakin erityisen kiinnostavassa tilassa.

Virtauslaskenta ja monivyoöhykemallinnus täydentävätkin toisiaan. Monivyoöhykemallinnuksella tuotetaan ne tapaukset, joista tarvitaan tarkempaa tietoa. Näistä muutamasta tauksesta virtauslaskennan puolelle siirretään pintalämpötilat, ilmamäärät, lämpötehot ja muut tarvittavat tiedot. Toisinaan syntyy kuitenkin tilanteita, joihin tämä menettely sopii huonosti. Eräs esimerkki on säteilylämmittimet. Koska edellä kuvatussa menetelmässä pintojen lämpötilat on etukäteen asetettu vakioiksi, ei säteilyn vaikutusta saada virtauslaskentamallissa huomioitua mielekkäästi.

Toinen esimerkki on tapaukset, joissa on merkittäviä pieniä yksityiskohtia, esimerkiksi kylmäsiltoja. Kriittinen tieto menetetään tässäkin tapauksessa yksinkertaistusta tehdessä.

Tähän työhön on valittu tapaus, joka helppo mallintaa myös kokonaan virtauslaskennalla hyödyntämättä monivyoohykemallinnusta. Kyseessä on ”tee se itse” -henkinen kevytkuorma-autoon rakennettu asunto-osa. Englanninkielisiä ilmaisia vastaavalle ratkaisulle ovat esim. box camper tai lutan camper. Auto on kuvattu ulkoa kuvassa 1 ja sisältä kuvassa 2. Asunto-osassa on käytetty hyvin yksinkertaista rakennetta, jotta se olisi helppo mallintaa. Esimerkiksi teollisuushalleissa käytetään samankaltaista yksinkertaista rakennetta.

Tätä yksinkertaista ja halvalla ratkaistavaa mallia hyödyntäen tässä työssä etsitäänkin hyvää kompromissia sopivasta mallinnuksen tasosta. Mallin tulisi ratkaista vakiopintalämpötilojen aiheuttamat ongelmat ja olla samanaikaisesti riittävän helppo ja halpa käytettäväksi toistuvissa kaupallisissa projekteissa.

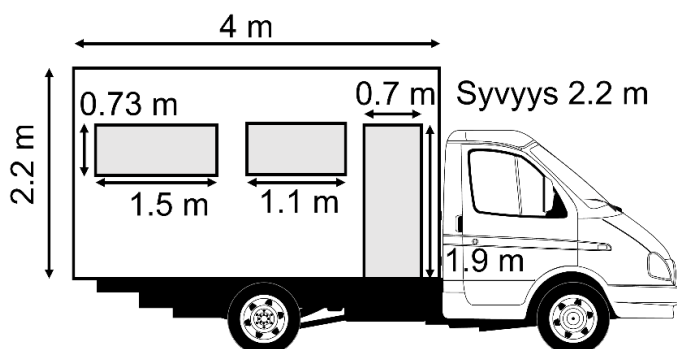
Suurin osa kytketyn virtauslaskennan lisäkustannuksista syntyy mallintamisen vaatimasta lisätyöstä mallin rakennusvaiheessa. Laskentakuorma ei kasva merkittävästi kiinteiden kappaleiden rakenteesta huolimatta. Esim. puisten rakenteiden tarkkaan piirtämiseen seinien sisään kuluu kuitenkin kohtuuttomasti aikaa. Huomioitava yksityiskohta on, että virtauslaskennassa käytettävien mallien täytyy olla täsmällisiä ja ”vesitiiviitä”. Esim. vierekkäisten osien täytyy muodostaa yksi yhtenäinen kappale ilman rakoja.

Samoja menetelmiä voisi myös hyödyntää kytkettyyn kosteudensiirtoon. Kosteudensiirtoyhtälöt kiinteässä kappaleessa on saatavilla tässä työssä käytetylle ohjelmistolle [2] ja kytkentä ilman liikkeisiin pitäisi onnistuvalle vastaavalla tavalla kuin tässä työssä on tehty lämmönsiirrolle.

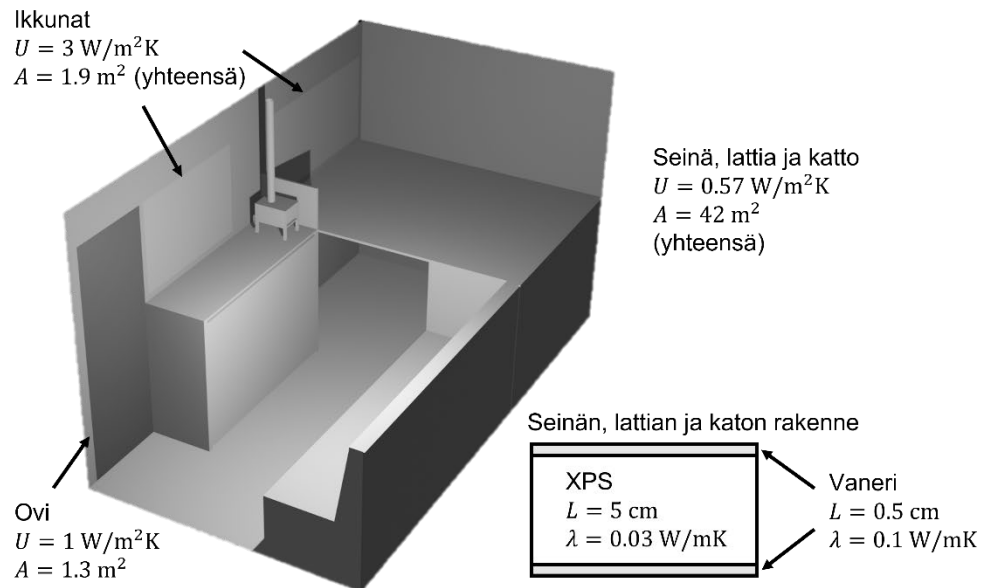
2. Tarkasteltava tapaus

Tarkastellaan kevytkuorma-auton lavalle rakennettua matkailuauton asunto-osaa. Auto ja asunto-osan sisämitat ovat kuvassa 1. Asunto-osan sisäosat sekä seinissä, lattiassa ja katossa käytetty rakenne on kuvassa 2. Myös U-arvot sekä sisäpuoliset pinta-alat ovat kuvassa 2. Asunto-osassa on kaksi ikkunaa ja ovi. Muita kylmäsiltoja ei ole. Kaikki sisärakenteet ovat 2 cm paksua vaneria. Kaapin ovien ylä- ja alareunassa on 2 cm rako.

Ulkolämpötila kaikissa suunnissa on 0 °C. Ulkopinnan lämmönsiirto kertoimeksi valitaan 10 W/m²K. Sisäpinnoilla käytetään samaa arvoa. Lämpösäteilyä ei huomioida. Asunto-osaan tuodaan korvausilmaa sängyn alta lattiasta asunto-osan takaosasta ja poisto sijaitsee etuosassa katossa. Ilmanvaihto on mitoitettu vaihtamaan asunto-osan ilmatilavuus kerran tunnissa (19 m³/h).



Kuva 1. Asunto-osan sisämitat.



Kuva 2. Asunto-osan sisätilat (osa seinistä poistettu). U -arvot ja pinta-alat sekä seinän rakenne.

Tilassa on henkilöistä lämpökuormaa 100 W sängyllä. Tilassa on myös lämmitin penkin alla. Lämmitin ottaa ilmaa sängyn alta seinästä ja purkaa sitä tilan keskelle yhdestä 4 cm x 4 cm raosta. Lämmitysilmän tilavuusvirta on 8.5 l/s ja lämpötila +60 °C.

3. Menetelmät

3.1 Monivyöhykemallinnus

Monivyöhykemallinnusta tässä työssä edustaa käsin laskettu energiatase asunto-osan sisätilalle. Kaappien sisäosia tai esim. sängyn alusta ei ole eritelty omiksi vyöhykkeiksi. Menetelmä on kuitenkin vastaava kuin monimutkaisemmassa tilanteessa tyypillisesti käytettäisiin useille vyöhykkeille (huoneille). Tuloksena saadaan sisätilan keskilämpötila sekä pintojen keskilämpötilat. Sisäilma oletetaan täysin sekoittuneeksi. Pinnan lämpötila T_s lasketaan seuraavista yhtälöistä

$$q = U_{tot}(T_i - T_u) \quad (1)$$

$$q = h(T_i - T_s) \quad (2)$$

missä q = lämpövirta (W/m^2)
 U_{tot} = Rakenteen kokonaislämmönläpäisykerroin ($\text{W/m}^2\text{K}$)
 T_i = Sisälämpötila (K)
 T_u = Ulkolämpötila (K)
 h = Lämmönsiirtokerroin ($\text{W/m}^2\text{K}$)

3.2 Virtauslaskenta

Virtauslaskenta toteutetaan eri tarkkuusasteilla kiinteiden kappaleiden lämpötilojen laskennan osalta. Ilmatilavuus lasketaan kaikissa menetelmissä samalla tavalla. Ilmatilavuuden laskentaan valittiin ajasta riippumaton, lämpötilan ja ilman tiheyden muutokset (nosteen) huomioiva

menetelmä. Turbulenssi ratkaistaan $k-\omega$ -SST mallilla. Käytetty ohjelmisto on OpenFOAM v10 ja sen ratkaisijat buoyantFoam ja chtMultiRegionFoam.

Geometriat luotiin Blenderillä ja laskentaverkot cfMeshillä. Laskenta toteutettiin pääasiassa CSC:n Mahti-supertietokoneella. Tarkkoja laskenta-aikoja ei tarkasteltu. Uudet laskennat alustettiin vanhoista laskentakuorman pienentämiseksi.

3.2.1 Vakio pintalämpötilat, menetelmä (a)

Yksinkertaisin tapa huomioida kiinteiden kappaleiden lämpötilat on hyödyntää suoraan monivyöhykemallinnuksen tuottamia pintalämpötiloja. Tällöin monivyöhykemallin resoluutio määrittää paljolti virtauslaskennan tulosten tarkkuutta. Tyypillinen resoluutio virtauslaskennan yhteydessä käytettävälle monivyöhykemallille on yksi pintalämpötila per seinä. Virtauslaskennan yhteydessä ei siis tehdä lainkaan kiinteiden kappaleiden lämpötilojen laskentaa. Lämpösäteilyä ei voida huomioida lainkaan virtauslaskennan yhteydessä tätä menetelmää käyttäen.

3.2.2 Lämmönjohtuminen ulkopintojen läpi, menetelmä (b)

Laskennallisesti kevyt tapa huomioida ulkopintojen läpi menevä lämpövirta virtauslaskenta mallissa on ratkaista yhtälöt (1 ja 2) jokaiselle virtauslaskennassa käytettävälle ulkoseinän pisteelle (pinta kontrollitilavuus menetelmässä). Tällöin tyypillinen resoluutio on luokkaa miljoona laskentapistettä per seinä. Tämä kasvattaa laskentaresurssin tarvetta vain marginaalisesti. Huomioitavaa kuitenkin on, että tämä menetelmä huomioi lämmönjohtumisen vain pinnan normaalin suunnassa. Tällöin pinnan vierekkäisiin laskentakoppeihin voi syntyä paljon suurempia lämpötilaeroja kuin todellisuudessa on mahdollista.

3.2.3 Lämmönjohtuminen kaikkiin suuntiin vanerissa, menetelmä (c)

Kiinteiden kappaleiden lämmönjohtumisen laskenta on huomattavasti kevyempää ja helpompaa kuin kaasun liikeyhtälöiden ratkaisu. Laskennallisesti kiinteän kappaleen lämmönsiirron ratkaisu yhdessä virtauslaskennan kanssa ei aiheuta merkittäviä lisäkuluja. Käytännössä rajoittavaksi tekijäksi nousee kuitenkin puutteelliset tiedot käytettävistä rakenteista tai suuri käsityön määrä tarkan CAD-mallin luomiseksi. Tässä menetelmässä työn määrää vähennetään mallintamalla vain sisäpinnan materiaali (vaneri) tarkasti. Tässä kerroksessa ratkaistaan lämmönjohtuminen kaikkiin suuntiin. Muut kerrokset (eriste ja toinen vanerikerros) huomioidaan yhtälöitä (1 ja 2) vastaavalla tavalla. Tällöin saadaan myös tilan sisällä olevien pintojen läpi tapahtuva lämmönjohtuminen huomioitua (esim. penkit ja sänky) sekä lämpösäteilyn lisääminen malliin olisi suoraviivaista.

Taulukko 1. Tulosten vertailu. Huomaa ulkolämpötila $T_u = 0 \text{ }^\circ\text{C}$.

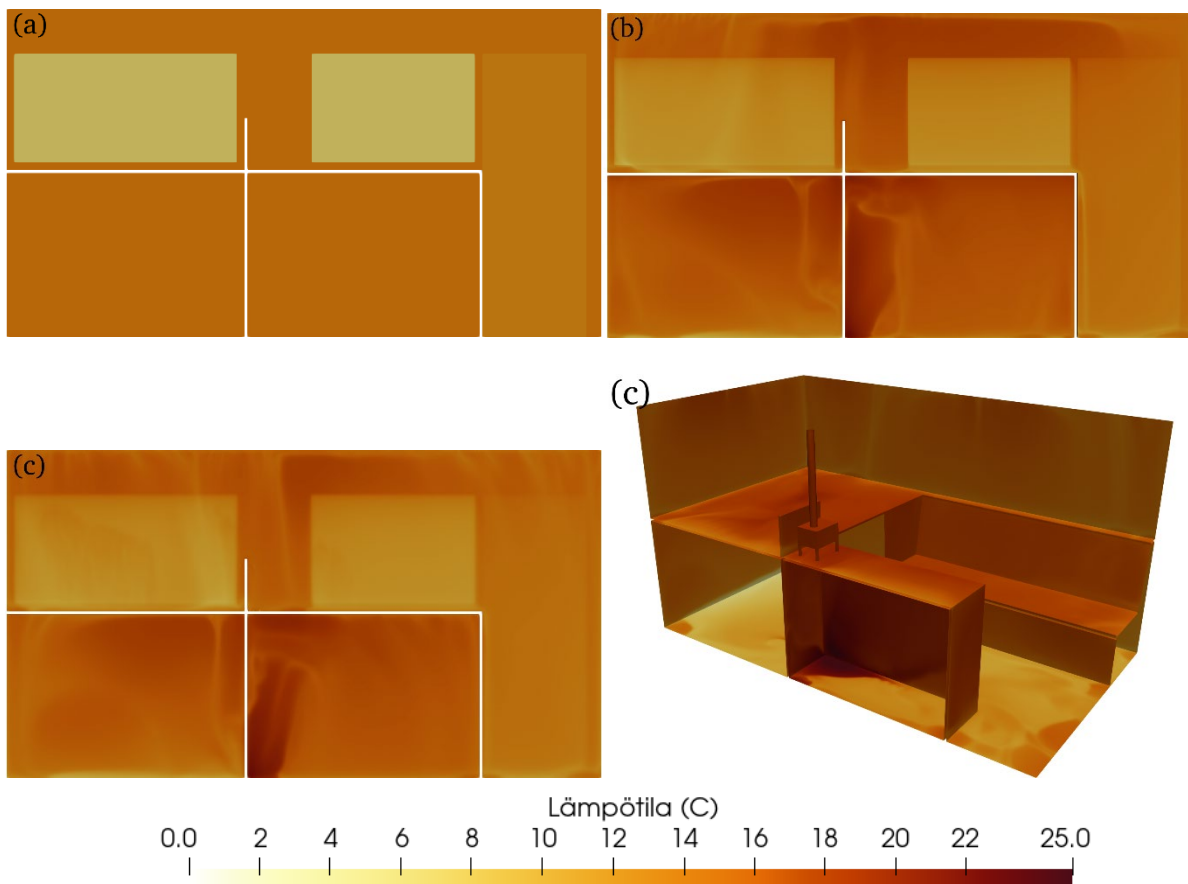
Menetelmä	Keskilämpötilaero ($^\circ\text{C}$) $\bar{T}_i - T_u$	Ero (%)	Laskenta kopit ($\times 10^6$)
Monivyöhykemallinnus	16	-13.5	-
Virtauslaskenta + vakio pintalämpötilat (menetelmä (a))	17.4	-5.9	27
Virtauslaskenta + johtuminen läpi (menetelmä (b))	18.9	2.1	27
Virtauslaskenta + johtuminen (menetelmä (c))	18.5	-	44

4. Tulokset

Taulukossa 1 on annettu keskilämpötilaero asunto osan ja ulkoilman välillä eri menetelmillä. Taulukossa on myös prosentuaalinen ero verrattuna menetelmään (c), joka on tässä työssä käytetyistä tarkin. Kaikkien virtauslaskentamallien antama keskilämpötila ero on merkittävästi suurempi kuin monivyöhykemallinnuksen antama tulos. Selittäviä tekijöitä ovat mm. lämmityslaitteen vuotolämmön huomioitta jättäminen monivyöhykemallissa, kaappien yms. eristävä vaikutus ja monivyöhykemallin yleinen epävarmuus.

Keskilämpötilaero menetelmillä, joissa pintojen lämpötilat ratkaistiin virtausmallinnuksen yhteydessä, menetelmät (b) ja (c), oli hyvin lähellä toisiaan. Huomattavaa kuitenkin on, että kun kiinteän kappaleen lämpötiloja ei ratkaista muihin kuin pinnan normaalin suuntaan (menetelmä (b)) voi tulokseen syntyä pistemäisiä hyvin kuumia tai kylmiä kohtia. Esim. kondenssia tarkastellessa tällaiset virheet ovat hyvin merkittäviä. Tässä tapauksessa tätä ongelmaa ei kuitenkaan merkittävästi esiintynyt. Vakio pintalämpötilojen käyttö (menetelmä (a)) johti merkittävään virheeseen keskilämpötilassa, josta seuraa myös merkittäviä paikallisia virheitä.

Vaikka laskentakoppeja oli kiinteän kappaleen johtumisen huomioivassa mallissa (menetelmä (c)) huomattavasti enemmän, oli laskenta kuorma vain hieman suurempi. Tämä johtuu kiinteän kappaleen lämmönjohtumisen laskennan keveydestä.



Kuva 3. Sisäpinnan lämpötila eritavoin laskettuna ikkunaseinälle. (a) Vakio pintalämpötilat. (b) Lämmönjohtuminen ulkopintojen läpi. (c) Lämmön johtuminen kaikkiin suuntiin vanerissa. (d) Yleiskuva pintalämpötiloista muilla seinillä menetelmää (c) käyttäen.

Sisämateriaalin huomioiminen CAD mallissa (menetelmä (b)) aiheutti jonkin verran lisää käsityötä, mutta paljon vähemmän kuin rakenteen tarkka huomioiminen vaatisi. Vastaava ohut kerros olisi helppo lisätä useimpiin kaupallisiin sovelluksiin. Monimutkaisen mallin rakentamisessa käsityön osuuden vaikutus kasvaisi merkittävästi, tehden siitä liian kalliiksi useimmissa tapauksissa.

Vain pinnan normaalin suuntaisen lämmönjohtumisen huomioiminen (menetelmä (b)) ei kasvata käsityön määrää juuri lainkaan verrattuna vakio pintalämpötilojen käyttöön (menetelmä (a)). Tässä työssä käytetyn tapauksen kaltaisissa tapauksissa työmäärä voi olla jopa pienempi, sillä erillistä monivyöhykemallia ei tarvita

Ikkunaseinän paikalliset lämpötilat on annettu kuvassa 3. Kuvassa (a) on menetelmän (a) vakio pintalämpötilat. Kuvissa (b) ja (c) on vastaavien menetelmien pintalämpötilat. Nämä tulokset ovat hyvin samankaltaiset eikä tässä tapauksessa saavuteta merkittävää eroa energiayhtälön ratkaisusta. Virtauslaskenta tulokseen ajasta riippumatonta muotoilua käyttäen jää aina värähtelyä. Kuvassa 3d on pintalämpötilat muille sisäpinnoille menetelmällä (c) laskettuna. Menetelmän (c) etu on sen kyky huomioida myös tilan sisäisten kappaleiden lämmönjohtavuus. Tässä tapauksessa kyseessä ovat esim. sänky ja pöytä. Erityisen kiinnostavaa tämä olisi, jos kamina olisi käytössä.

Virtauskentät olivat kaikissa tapauksissa laadullisesti samankaltaiset. Kosteuden siirron huomiointi rakenteissa olisi myös melko suoraviivaista yhdistää laskentaan, jos kiinteät kappaleet on valmiiksi mallinnettu.

5. Yhteenveto

Tässä työssä vertailtiin eri tapoja ratkaista pintojen lämpötilat sisäilmasto-olosuhteiden virtauslaskentaa varten. Tavoitteena oli löytää käytännön projektityön kannalta tehokas ja riittävän tarkka menetelmä. Vertailussa oli monivyöhykemallinnuksesta saadun vakio lämpötilan asettaminen pinnalle, pinnan normaalin suuntaisen lämmönjohtumisen huomiointi jokaisessa pinnan pisteessä erikseen sekä lämmönjohtumisen ratkaisu kaikkiin suuntiin sisäpinnan pintamateriaalissa.

Vakio pintalämpötilojen käyttö johti suuriin virheisiin. Pinnan normaalin suuntaisen lämmönjohtumisen huomioiminen tuotti keskimääräiselle lämpötilalle hyvän tuloksen, mutta paikallisesti tulos voi olla epävakaa. Laskentakuorma ei kasvanut ja käsityön määrä mallia luodessa voi olla jopa pienempi kuin vakiolämpötiloja käytettäessä. Paras kompromissi monissa tapauksissa on kuitenkin sisäpintamateriaalin lämmönjohtumisen huomioiminen. Tulokset ovat luotettavia. Laskenta kuorma ei merkittävästi kasva ja esimerkiksi säteilyn huomiointi olisi suoraviivaista.

Lähdeluettelo

- [1] ISO 7730:1994. Moderate thermal environments – determination of the pmv and ppd indices and specification of the conditions for the thermal comfort. International Organization for Standardization, Switzerland, 1994.
- [2] <https://github.com/amikkonen/hamFoam>

Virtauslaskenta pandemian leviämisen estossa

Aku Karvinen
Teknologian tutkimuskeskus VTT

Tiivistelmä

Koronapandemiaan on sairastunut virallisten tietojen mukaan yli puoli miljardia ihmistä ja kuollut lähes seitsemän miljoonaa, todellisten lukujen ollessa eri arvioiden mukaan monta kertaa suuremmat. Pandemian aiheuttamien kokonaiskustannusten on arvioitu olevan jopa 16 biljoonaa euroa. Pandemian aikana on jo pandemian alussa aerosolifyysikoiden esille tuoma ilmalevitteisyys varmistunut merkittäväksi, ellei jopa merkittävimmäksi, pandemian leviämistavaksi. Ilmalevitteisyyttä pystytään rajoittamaan tehokkaasti mm. rakennusten ilmanvaihtoa tehostamalla ja uudelleensuunnittelemalla. Myös ilmanpuhdistimien ja hengityssuojainten merkitys pandemiantorjunnassa on osoittautunut merkittäväksi. Tässä työssä esitellään virtauslaskennan merkitystä pandemian torjunnassa kahdesta eri näkökulmasta; sekä ihmisten tiedottamisessa että uusien estomenetelmien kehityksessä. Työssä esitellään laajassa Business Finlandin osittain rahoittamassa *E3 Excellence in Pandemic Response and Enterprise Solutions* -hankkeessa saatuja tuloksia.

1. Johdanto

Tätä kirjoitettaessa (14.8.2023) on SARS-CoV-2 -viruksen aiheuttamaan koronatautiin sairastunut maailmanlaajuisesti WHO:n tilastojen (covid19.who.int) mukaan 769 miljoonaa ihmistä ja kuollut yli 7,0 miljoonaa. Lisäksi tauti on aiheuttanut suuren määrän niin inhimillistä kuin taloudellistakin kärsimystä. Tämän vuoksi lääketieteellisten taudin leviämisen estomenetelmien, kuten rokotteiden ja lääkkeiden, lisäksi on jo heti taudin alkuaikoina huomattu ei-lääketieteellisten estomenetelmien, kuten liikkumisrajoitusten, turvavälien, ilmanvaihdon, -puhdistuksen, hengityssuojaimien ja muiden täysin uusien menetelmien tärkeys. Tässä työssä keskitytään ei-lääketieteellisten menetelmiin jättäen huomiotta liikkumisrajoitukset niiden taloudellisten ja inhimillisten ongelmien vuoksi.

Tutkimusmenetelmät voidaan jakaa kahteen kategoriaan, joista ensimmäisessä keskitytään tarkastelemaan eri menetelmien todellisia vaikutuksia todellisessa ihmispopulaatiossa. Tällöin esimerkiksi verrataan muuten toisiaan mahdollisimman hyvin vastaavan koulupiirin sairastumislukuja tilanteessa, jossa toisessa käytetään parempaa ilmanvaihtoa tai hengityssuojaimia. Toinen esimerkki on päiväkotit, jossa verrataan sairastuvuutta yhtenä vuonna ilman ylimääräisiä taudin leviämisen estomenetelmiä vuoteen, jolloin päiväkodissa käytetään tehostettua ilmanvaihtoa tai ilmanpuhdistimia. Toinen tutkimusmenetelmä keskittyy itse leviämisen fysiikan tarkasteluun joko mittamalla tai simuloimalla.

Tässä työssä on käytetty näistä jälkimmäistä, eli fysiikkaan perustuvaa simulointia. Tätä on käytetty jo pandemian alkuaikoina mm. Vuorinen et al.:n toimesta [1]. Laajin ja monipuolisimmin tilanteeseen vaikuttavia asioita huomioon ottava lähde tätä kirjoitettaessa on alkuvuodesta 2023 julkaistu Nie et al.:n [2] artikkeli.

2. Virtauslaskenta

Virtaussimuloinnissa nesteen tai kaasun virtaus lasketaan perustuen virtausta hallitseviin osittaisdifferentiaaliyhtälöihin [3] ottaen huomioon tilanteessa tarvittava fysiikka.

Hengitystieinfektio leviämisen simuloinnissa otetaan myös huomioon ilmassa liikkuvat pisarat ja aerosolihiukkaset, joko olettamalla niiden muodostama faasi jatkuvaksi (ns. Euler-Euler -menetelmä) tai simuloimalla pisarat ja hiukkaset erillisenä diskreettinä faasina (ns. Euler-Lagrangian -menetelmä) ottamalla huomioon niihin vaikuttavat voimat [4]. Tässä työssä on käytetty näistä jälkimmäistä.

Virtaussimuloinnin yksi haastavimmista tekijöistä on lähes aina virtaustilanteessa mukana oleva turbulenssi [5] ja sen huomioiminen laskentatehokkaasti riittävällä tarkkuudella. Tämä voidaan tehdä esimerkiksi RANS-turbulenssimalleilla (Reynolds-averaged Navier-Stokes), LES-malleilla (large eddy simulation) tai DNS-simuloinnilla (direct numerical simulation). Näistä LES-simulointi on laskennallisesti vaativaa ja DNS-simulointi erittäin vaativaa. RANS-simulointi voidaan tehdä aikariippumattomana, jolloin lasketaan virtauskentän aikakeskiarvokenttä, muiden simulointimenetelmien vaatiessa aina aikariippumatonta simulointia. RANS- ja LES-mallien yhdistelmää, jossa laskenta-alueen ydinalue simuloidaan käyttäen LES-malleja ja seinämän lähialueet RANS-malleja, kutsutaan DES-simuloinniksi (detached eddy simulation). Tämän työn simuloinnit on tehty käyttäen DES-mallinnusta sen kohtuullisen laskentaresurssivaatimuksen, yleensä RANS-malleja tarkempien tulosten ja tilanteen aikariippuvan luonteen vuoksi.

Tässä työssä on tilannetta hallitsevasta fysiikasta otettu huomioon mm. seuraavat asiat:

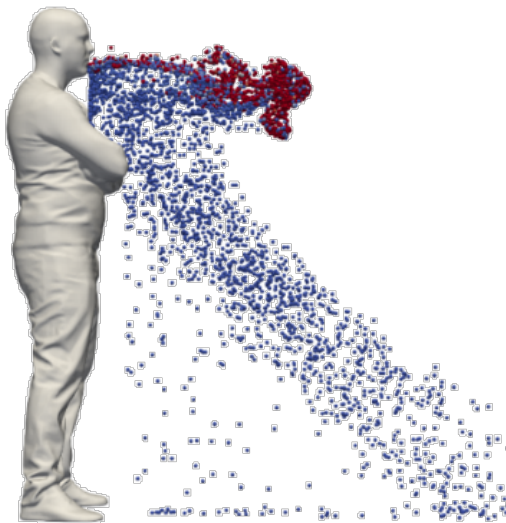
- Totuudenmukainen ilmanvaihto (esim. sekoittava tai syrjäyttävä).
- Lämpötilaerot (henkilöiden lämpökuorma, viileämpi ikkuna, lämmitetty lattia jne.) ja niiden aiheuttaman konvektiovirtaukset.
- Tilanteen aikariippuva luonne (yskäisy, hengityksen jaksollisuus, jne.).
- Turbulenssi käyttäen $k-\omega$ SSTDES-mallia (shear-stress transport) [6].
- Todellinen ilmavirtaus esimerkiksi yskäisyssä [7].
- Ihmisen emittoimien (hengitys, yskäisy, aivastus) pisaroiden ja aerosolihiukkasten koostumus nesteestä ja kiintoaineesta [2].
- Pisaroiden ja hiukkasten todellinen kokojakauma (mm. [8] ja [9]).
- Kokojakauman muutos ajan funktiona riippuen ilman suhteellisesta kosteudesta.
- Suhteellisen kosteuden kasvu pisaroiden ja hiukkasten kuivumisen vaikutuksesta.

Kehittyneitä turbulenssin mallinnusta on käytetty mm. Auvinen et al.:n [10] toimesta ja yksityiskohtaista pisaran ja aerosolihiukkasten mallinnusta Nie et al.:n [2] toimesta, mutta näiden yhdistelmän käyttö on vielä harvinaista.

3. Esimerkkituloksia

3.1 Yskäisy

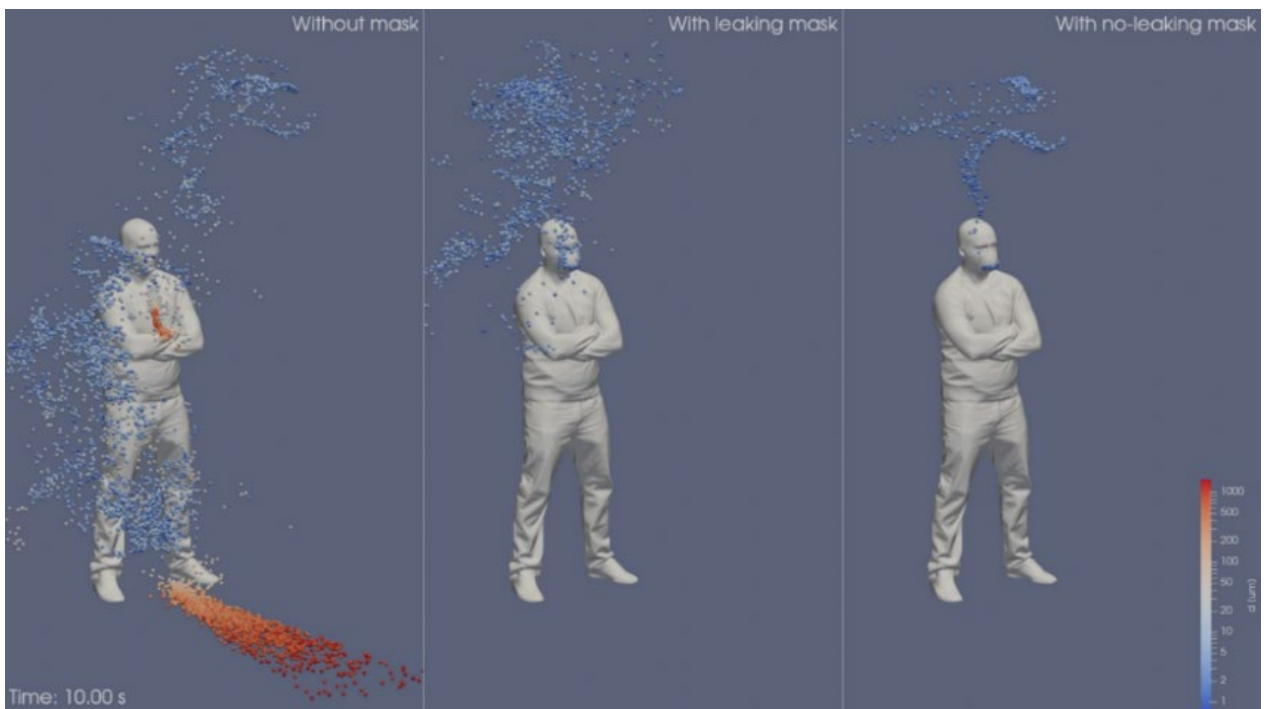
Kuvassa 1 on esitetty esimerkki yskäisyyn simuloinnista. Kuvassa näkyy kuinka isot kosteat pisarat tippuvat nopeasti alas ballistista rataa pitkin ja pienet kuivat hiukkaset lentävät kauemmaksi. Tässä simuloinnissa huoneen ilmanvaihtoa ei ole huomioitu.



Kuva 1. Yskäisyyn tuottamien pisaroiden ja aerosolihiukkasten simulointitulokset. Kosteat pisarat sinisiä (mustavalkokuvassa vaaleita) ja kuivat punaisia (mustavalkokuvassa tummia).

3.2 Maskin vaikutus

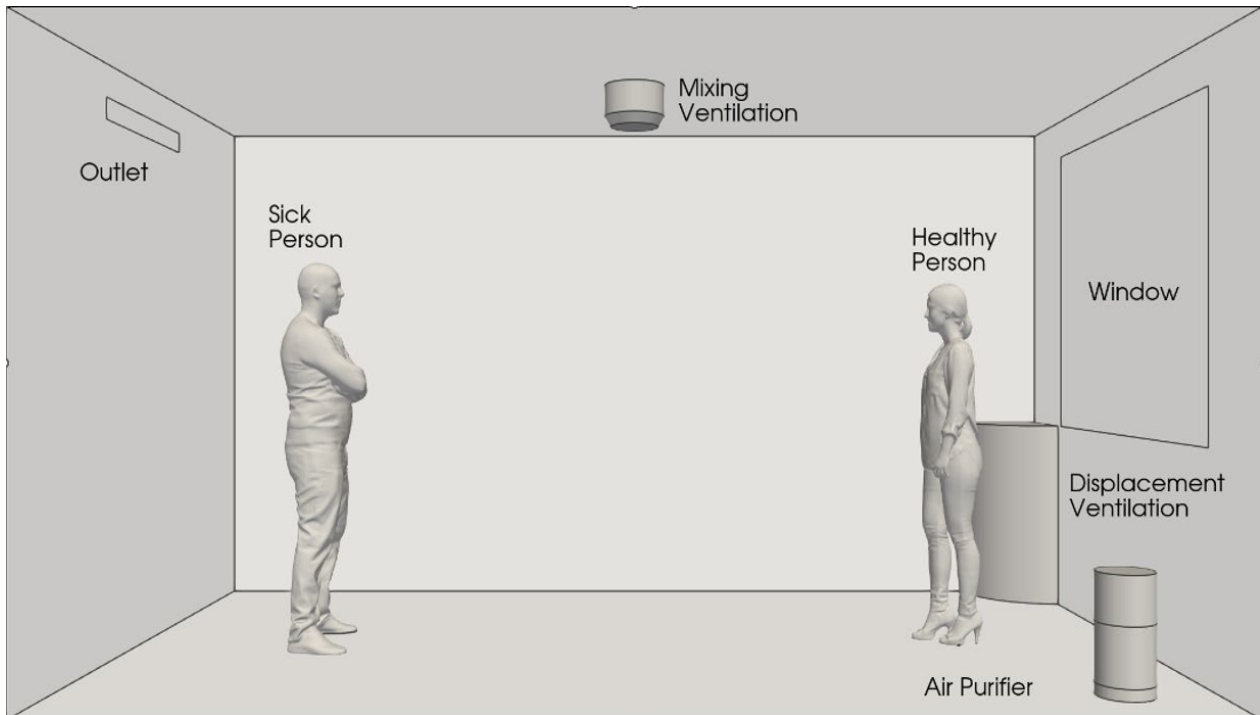
Maskin vaikutus lähdekontrollissa on esitetty kuvassa 2. Kuvan simuloinneissa on käytetty tyypillisen kirurgisen suu-nenäsuojan erotuskykyä muiden lähtötietojen ollessa samat kuin edellisessä esimerkissä. Kuvassa näkyy kuinka suojain estää hyvin isojen pisaroiden huonetilaan pääsyn. Kuvassa näkyy myös, kuinka ihmisen oman lämpötilan aiheuttama noste nostaa pienimpiä hiukkasia nopeasti ylöspäin ja tätä voidaan käyttää hyväksi suunniteltaessa pandemiaturvallista ilmanvaihtoa.



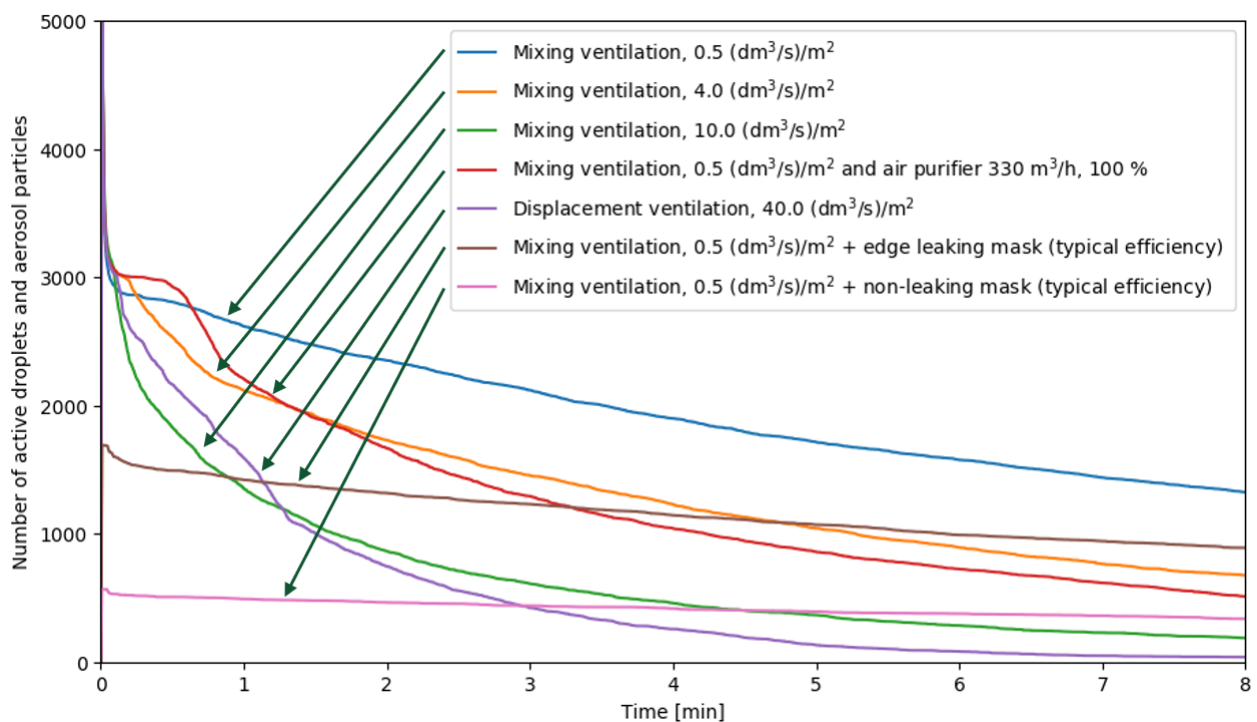
Kuva 2. Kirurgisen suu-nenäsuojan vaikutus yskäisyssä emittoituvien pisaroiden ja aerosolihiukkasten lähdekontrollissa. Isot pisarat punaisia (mustavalkokuvassa tummia) ja pienet hiukkaset sinisiä (mustavalkokuvassa vaaleita).

3.3 Ilmanvaihtotapojen vertailu

Tässä esimerkissä on tutkittu kuvan 3 tilanteessa eri ilmanvaihtomäärien ja -tapojen (syrjäyttävä ja sekoittava), ilmanpuhdistimen ja maskin vaikutusta tilan aerosolipitoisuuteen.



Kuva 3. Simuloitu tilanne.



Kuva 4. Tulokset. Yskäisy sisältää yhteensä 5000 pisaraa ja hiukkasta.

Kuten kuvan 4 tulokset osoittavat, on ilmanvaihdon määrällä suuri merkitys siihen, kuinka nopeasti hiukkaset poistuvat tilasta. Maskin vaikutus lähdekontrollissa (maski yskivällä

henkilöllä) perustuu siihen, että suuri osa pisaroista ja hiukkasista jää maskiin, jolloin tilan hiukkaspitoisuus on heti yskäisyksen jälkeen pienempi kuin ilman maskia. Tässä esimerkissä syrjäyttävän ilmanvaihdon paremmuus johtuu lähinnä suuremmasta käytetystä ilmanvaihdon määrästä, mutta syrjäyttävä ilmanvaihto oikein suunniteltuna tuottaa puhtaamman hengitysvyöhykkeen kuin vastaavan ilmanvaihdon suuruuden omaava sekoittava ilmanvaihto hiukkasten pyrkinessä kerrostuman vuoksi tilan yläosaan pois hengitysvyöhykkeeltä.

4. Tiedottaminen

Jo koronapandemian alkua ajoista lähtien on ihmisillä ollut suuri tarve saada lisätietoja tartunnan leviämistavoista ja keinoista leviämisen estämiseksi. Tätä tarvetta tyydyttääkseen on media tarvinnut asiantuntijoiden apua. Kuvassa 5 on esitetty eräitä esimerkkejä asiantuntija-avusteisesta median tiedottamisesta.



Kuva 5. Esimerkkejä leviämisen estomenetelmien tiedottamisesta mediassa.

Tällä tiedottamisella on ollut merkittävä rooli mm. ihmisten motivoinnissa hengityssuojaimen käyttöön tai turvavälin pitoon.

5. Johtopäätökset

Tässä työssä esitelty menetelmä patogeenin (COVID-19:n tapauksessa SARS-CoV-2) leviämisen simuloimiseksi, joka yhdistää kehittyneen turbulenssin virtauksen simulointimenetelmän ja yksityiskohtaisen pisaroiden ja aerosolihiukkasten fysiikan simuloinnin, mahdollistaa paremman leviämisen ymmärtämisen ja sen estoon tähtäävien menetelmien kehittämisen.

Työssä esitellyt esimerkkitapaukset osoittavat, että tilojen pandemiaturvallisuutta voidaan lisätä muutenkin kuin lisäämällä ilmanvaihdon määrää, joka yleensä tarkoittaa energian kulutuksen lisääntymistä. Tällaisia menetelmiä ovat mm. hengityssuojaimet ja ilmanjaon suunnittelu pandemiaturvallisuus huomioon ottaen, muun muassa tuottaen tilaan puhdas oleskeluvyöhyke käyttäen syrjäyttävää ilmanvaihtoa tai poistaen patogeenit läheltä sairasta ihmistä käyttäen kohdepoistoja.

Nyt esitettyä menetelmää tullaan kehittämään lisää ja käyttämään erilaisten jo tässä työssä esiteltyjen ja täysin uusien leviämisen estomenetelmien kehittämisessä.

Pandemia-aika tuo myös tarpeen tiedeperustaiselle tiedottamiselle, jota tehdäkseen media tarvitsee asiantuntijoiden apua. Tällä tiedottamisella on merkittävä rooli ihmisten käyttäytymisen ohjaamisessa mm. maskien käyttöön motivoimiseksi ja uusien leviämisen estomenetelmien käyttöönoton motivoinnissa.

Tekijä kiittää Business Finlandia, joka on rahoittanut tätä työtä AIRCO-hankkeen ja E3-hankkeen muodossa.

Lähdeluettelo

- [1] V. Vuorinen *et al.*, ‘Modelling aerosol transport and virus exposure with numerical simulations in relation to SARS-CoV-2 transmission by inhalation indoors’, *Safety Science*, vol. 130, p. 104866, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.ssci.2020.104866.
- [2] Z. Nie, Y. Chen, and M. Deng, ‘Quantitative evaluation of precautions against the COVID-19 indoor transmission through human coughing’, *Sci Rep*, vol. 12, no. 1, Art. no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1038/s41598-022-26837-0.
- [3] J. H. Ferziger, M. Perić, and R. L. Street, *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Cham: Springer International Publishing, 2020. doi: 10.1007/978-3-319-99693-6.
- [4] C. T. Crowe, Ed., *Multiphase flows with droplets and particles*, 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2012.
- [5] S. B. Pope, *Turbulent Flows*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. Accessed: Apr. 27, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511840531>
- [6] F. Menter, M. Kuntz, and R. Langtry, ‘Ten years of industrial experience with the SST turbulence model’, *Heat and Mass Transfer*, vol. 4, Jan. 2003.
- [7] J. K. Gupta, C.-H. Lin, and Q. Chen, ‘Flow dynamics and characterization of a cough’, *Indoor Air*, vol. 19, no. 6, pp. 517–525, 2009, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2009.00619.x>.
- [8] J. P. Duguid, ‘The size and the duration of air-carriage of respiratory droplets and droplet-nuclei’, *Epidemiology & Infection*, vol. 44, no. 6, pp. 471–479, Sep. 1946, doi: 10.1017/S0022172400019288.
- [9] M. Alsved *et al.*, ‘Exhaled respiratory particles during singing and talking’, *Aerosol Science and Technology*, vol. 54, no. 11, pp. 1245–1248, Nov. 2020, doi: 10.1080/02786826.2020.1812502.
- [10] M. Auvinen, J. Kuula, T. Grönholm, M. Sühring, and A. Hellsten, ‘High-resolution large-eddy simulation of indoor turbulence and its effect on airborne transmission of respiratory pathogens—Model validation and infection probability analysis’, *Physics of Fluids*, vol. 34, no. 1, p. 015124, tammikuu 2022, doi: 10.1063/5.0076495.

A3. Rakenteiden ja rakennusten lämpö- ja kosteustekninen toiminta

Vähän lämpöä läpäisevien puurunkoisten ulkovaipparakenteiden tuuletusvälien lämpö- ja kosteustekninen toiminta

Klaus Viljanen^{1,2} ja Jari Puttonen²

¹ Ramboll Finland Oy

² Aalto-yliopisto

Tiivistelmä

Artikkelissa tarkastellaan puurunkoisten ulkovaipparakenteiden tuuletusvälien lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa ja kosteusturvallisuutta perustuen koerakenteista ja omakotitalon yläpohjasta tehtyihin mittauksiin sekä laskennallisiin tarkasteluihin. Nykyaikaisissa ulkoseinä- ja yläpohjarakenteissa rakenteiden tehokas lämmöneristys alentaa kylmänä vuodenaikana rakenteiden ulko-osien lämpötilaa. Tällöin tuuletusvälissä vallitseva suhteellinen kosteus nousee kasvattaen myös riskiä homeenkasvulle otollisten olosuhteiden esiintymiseen tuuletusvälissä. Tulosten perusteella hyvin eristettyjen rakenteiden tuuletusvälien kosteusturvallisuutta voidaan parantaa kasvattamalla tuuletusvälin ulkopuolisen rakenneosan lämmönvastusta. Rakenteiden tuuletuksen rajoittamisella voidaan parantaa tuuletusvälin olosuhteita, mutta tuuletuksen toteutus tulee aina suunnitella tapauskohtaisesti. Tuuletuksen minimimäärään vaikuttaa tuuletusväliin kohdistuvat kosteuskuormat ja kattojen tapauksessa lisäksi lumen sulamisen estäminen.

1. Johdanto

Rakennusten lämmöneristettyjen ulkoseinien ja kattojen rakennusfysikaalisessa suunnittelussa on viime vuosikymmeninä vakiintunut käytäntö varmistaa rakenteellisilla ratkaisulla ulkovaipan rakenteiden ulko-osien riittävä, mutta usein myös tehokas tuulettavuus. Rakenteiden tuulettavuudella on varmistettu niihin kohdistuvien kosteuskuormien riittävän nopea kuivuminen ulkoilmaan. Suomessa ohjeistetaan käyttämään puurunkoisissa ulkoseinissä vähintään 20 mm paksuista tuuletusväliä [1]. Tuuletusvälin suositeltava paksuus on 40 mm, kun seinässä on muurattu tiilikuorimuurin [1]. Yläpohjarakenteissa suositeltu tuuletusvälin korkeus on vähintään 100 mm kattokaltevuudella 1:10, ja kaltevuuden ollessa 1:10–1:20, suositeltava korkeus on 200 mm. Norjassa yläpohjien tuuletusvälin suositeltava korkeus riippuu tuuletusvälin pituudesta [2].

Suomessa lämpimien tilojen katon lämmönläpäisykertoimen (U) vertailuarvo laski vuonna 2010 arvosta 0,15 W/(m²K) arvoon 0,09 W/(m²K). Seinärakenteiden lämmönläpäisykertoimen vertailuarvo laski vastaavasti arvosta 0,24 W/(m²K) arvoon 0,17 W/(m²K). Tarkasteltavassa tutkimuksessa arvioitiin hyvin eristettyjen ulkoseinien (U 0,12–0,13 W/(m²K)) ja kattorakenteiden (U 0,08 W/(m²K)) tuuletusvälien lämpö- ja kosteusolosuhteita ja suositeltavia rakenneratkaisuja, joilla voidaan tarvittaessa parantaa tuuletusvälien toimivuutta [3].

2. Tuuletusvälien toiminnan arviointi

Hyvin eristettyjen ulkovaipparakenteiden tuuletusvälien toimintaa tutkittiin mittaamalla lämpö- ja kosteusolosuhteita neljästä ulkoseinärakenteesta ja yhdestä kattorakenteesta Etelä-Suomessa (kuva 1) [3–5]. Yksi tutkituista seinistä oli vertailuseinä, jolla oli kolme muuta seinää korkeampi U-arvo (kuva 1). Seinien mittausjakso oli 9.6.2017–30.12.2019 ja kattorakenteen vastaava jakso oli 8.9.2017–28.12.2019. Katon ja julkisivun päälle asennettiin hetkellisesti lisäeristys, jolla arvioitiin tuuletusvälin ulkopuolisen rakenteen lämmönvastuksen vaikutusta tuuletusvälin

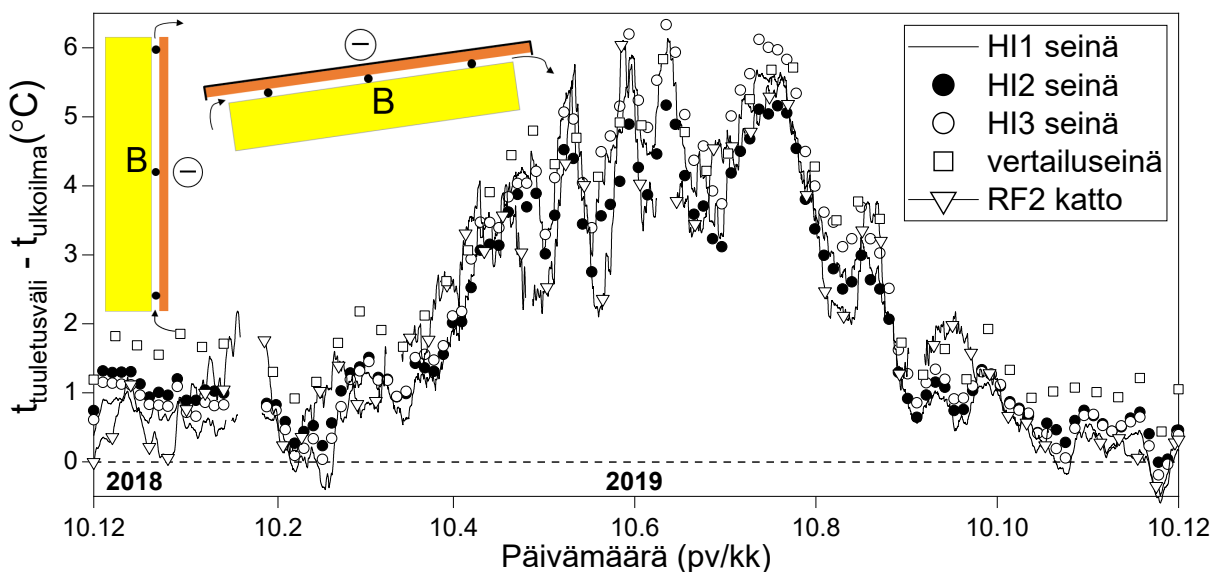
3. Tulokset

3.1 Tuuletusvälin lämpö- ja kosteustekninen toiminta

Ulkoseinän tuuletusvälin ilmanvaihtuvuuden havaittiin riippuvan vuodenajasta [4]. Kesällä ilman mitattu nopeus tuuletusväliässä on keskimäärin 0,3 m/s, joka vastaa ilmanvaihtuvuutta 310 1/h. Ilmanvaihtuvuuden hidastuminen alkoi elokuussa auringon säteilyn vähentyessä, ja lokakuussa ilmanvaihtuvuus saavutti kylmän vuodenajan keskimääräisen tason, joka oli 40 1/h. Katon tuuletusväliässä mitattu ilmanvaihtuvuus muuttui vastaavasti, mutta kylmänä vuodenaikana ilmanvaihtuvuus ei hidastunut niin pieneksi kuin seinässä, ja toisaalta katon tuuletusväliässä ilmanvaihtuvuus riippui enemmän tuulesta.

Talvella tuuletusvälin lämpötilat hyvin eristetyissä (HI) seinissä olivat tyypillisesti 0,4–1,5 °C alemmat kuin vertailuseinässä [4]. Talvella tuuletusvälin lämpötila oli seinissä 0–2 °C ja katossa 0,2 °C ulkoilmaa korkeampi (kuva 2). Kesällä tuuletusvälin lämpötilat olivat 0–20 °C ulkoilmaa korkeampia, koska auringonsäteily lämmitti rakenteen ulko-osaa. Korkeimmat mitatut lämpötilat seinien ja katon tuuletusvälistä olivat 53 °C ja 55 °C. Huippulämpötilojen aikana tuuletusvälin suhteellinen kosteus laski alimmillaan tasolle 10 %, mikä voi estää homeen kasvua [9]. Keskikesällä seinien ja katon lämpötilat A-pisteissä olivat 6 °C ja 11 °C ulkoilman lämpötilaa korkeampia, kun taas pisteissä B ja C lämpötilaerot olivat vastaavasti 17 °C ja 22 °C. Talvella lämpötilajakauma oli selvästi tasaisempi pisteiden A- ja C-pisteiden välisen lämpötilaeron ollessa alle asteen. Seinän HI1 ilmavälistä tehty paine-eromittaus tuki myös sitä, että ilmavirtauksen suunta oli seinissä yleensä ylöspäin.

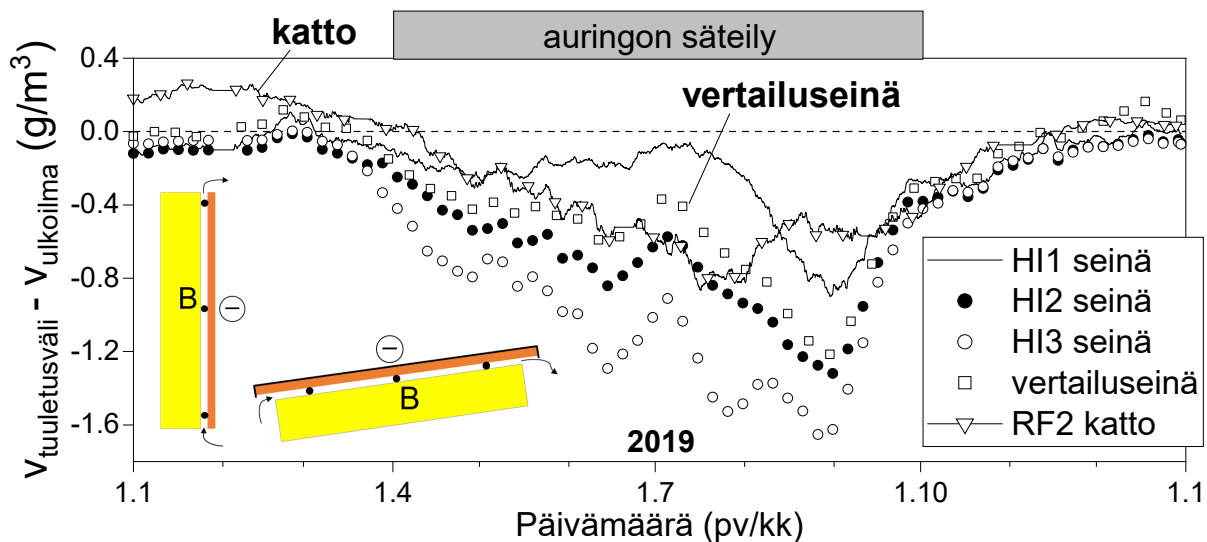
Tuuletusvälin lämpötila nousi julkisivun ja kattopinnan lisäeristeellä, vasta kun ilman sisäänvirtausaukko tuuletusväliin oli täysin suljettu. Julkisivun alaosan hiirilista ei näin ollen estänyt riittävästi ilman virtausta. Toisaalta tuuletusvälin ilman kosteussisältö nousi yli ulkoilman tason, kun sisäänvirtausaukko suljettiin, joten optimaalisimmat tuuletusratkaisut kokeissa olivat seinien ja katon alkuperäiset rakenteet. Tulokset osoittavat, että ilmavirtauksen rajoittaminen siten, että tuuletusvälin lämpötila nousee, edellyttää tehokasta painehäviötä ainakin toisessa virtausaukossa.



Kuva 2. Mitattu lämpötilaero tuuletusvälin pisteen B ja ulkoilman välillä [3,4].

Mittaukset osoittivat, että tuuletusvälin suhteellinen kosteus on HI-seinissä yleensä 1–7 % korkeampi kuin vertailuseinässä johtuen alhaisemmasta lämpötilasta [4]. Talvella tuuletusvälin suhteellinen kosteus oli katossa lähimpänä ulkoilman tasoa, kun taas seinien suhteellinen kosteus oli yleensä alle ulkoilman tason. Tuuletusvälin ilman kosteussisältö oli lähellä ulkoilman tasoa erityisesti talvella (kuva 3), mikä korostaa rakenteen lämpöteknisen toiminnan merkitystä tuuletusvälin ilman suhteellisen kosteuden tasolle. Mitä korkeampi lämmöneristävyys tuuletusvälin ulkopuolisella rakenteella on, sitä alhaisempi on tuuletusvälin suhteellinen kosteus. Kesällä auringon säteily kuivattaa rakenteita ja laskee tuuletusvälin absoluuttisen kosteuden selvästi alle ulkoilman tason (kuva 3).

Koeseinien julkisivuverhous purettiin kokeen jälkeen, jolloin havaittiin selkeää homekasvua kahdessa tuuletusvälin koolauksen pystylaudassa lautojen alareunasta lähtien aina 450 mm korkeudelle [3]. Homekasvun sijainti selittyy tuuletusvälin alaosan muuta rakennetta alhaisemmillä lämpötiloilla ja toisaalta sillä, että ulkoilma voi ajoittain toimia kosteuslähteenä tuuletusvälille. Puuverhouksen taustan alaosa oli silmin nähden muuta aluetta tummempi. Lisäksi kosteusmittaukset puuverhouksen sisäosasta osoittivat puuverhouksen olevan kylmänä vuodenaikana kostein alaosaan.



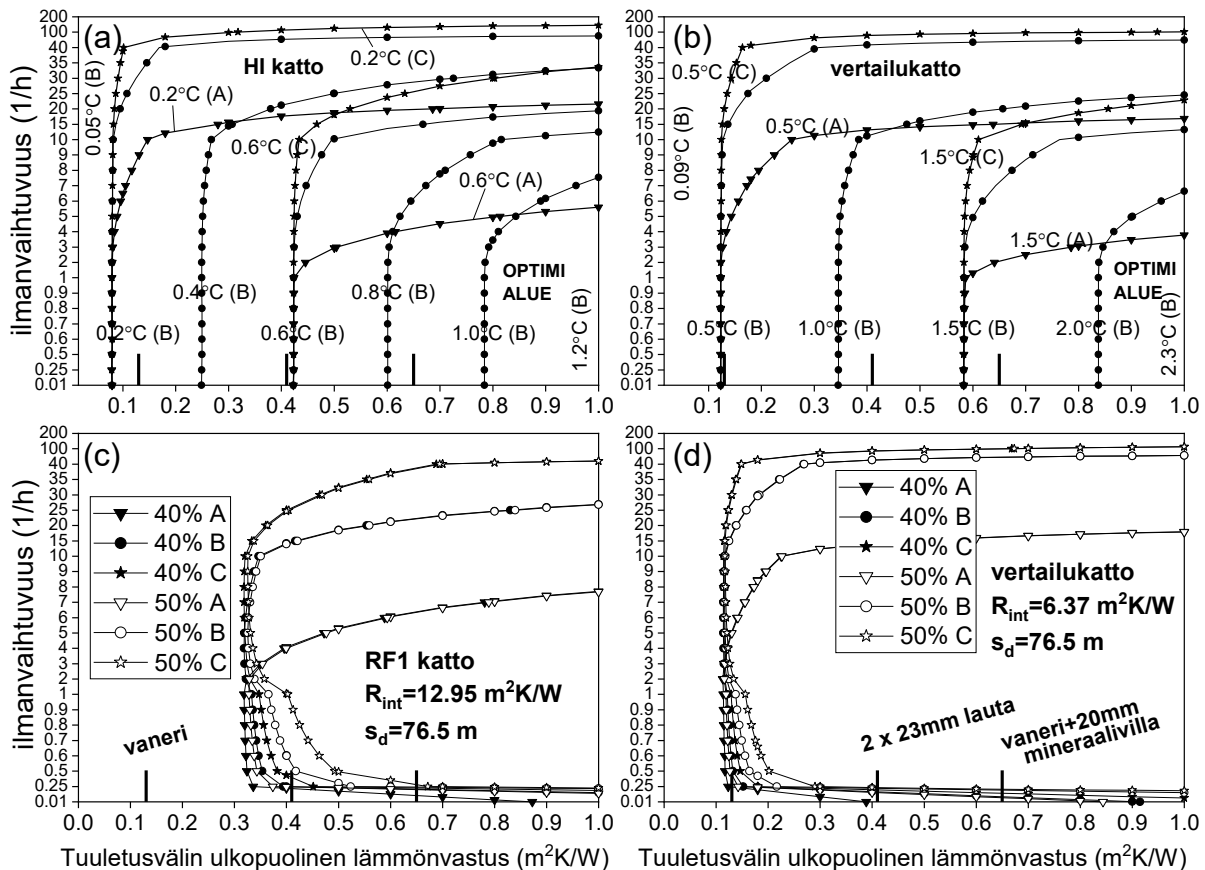
Kuva 3. Mitattu absoluuttisen kosteuden ero tuuletusvälin pisteen B ja ulkoilman välillä [3,4].

3.2 Tuuletusvälin laskentatarkastelujen tulokset

Mittauksissa havaittu alhainen lämpötilaero hyvin eristetyin katon tuuletusvälin ja ulkoilman välillä vastaa laskentamallin tuottamaa lämpötilaeroa (kuva 4a). Selkeän lämpötilaeron saavuttaminen katossa edellyttää tuuletusvälin ulkopuolista lämmöneristämistä 20 mm paksuisella mineraalivillalla, jolloin lämpötilaero on 0,8–0,9 °C. Vertailukatossa (U 0,15 W/(m²K)) vastaava rakenne tuottaa yli 1,6 °C lämpötilaeron (kuva 4b).

Kuvissa 4c ja 4d on esitetty tasa-arvokäyrät, jotka kuvaavat ilmvälin suhteellisen kosteuden ja homeen kasvun edellyttämän RH-rajaa-arvon erotusta siten, että homeen kasvu on mahdollista vain käyrien vasemmalla puolella [5]. Katon U-arvon laskiessa tasolta 0,15 W/(m²K) tasolle 0,08 W/(m²K) tyypillinen vesikattorakenne, vanerialusta ja bitumikate, ei enää eristä lämpöä riittävästi riippumatta tuuletusvälin ilmanvaihtuvuudesta. Hyvin eristetyssä katossa homeen kasvun riski tuuletusvälissä poistuu, jos tuuletusvälin ulkopuolinen lämmönvastus on vähintään 0,35 (m²K)/W. Vastaavan tyypillinen tarkastelu ulkoseinärakenteille osoitti, että hyvin eristettyjen,

puuverhoiltujen ulkoseinien ($U\ 0,12\ \text{W}/(\text{m}^2\text{K})$) kosteustekninen toiminta on hyväksyttävää pois lukien pisteen A alue, jossa tuuletusilma tyypillisesti viilentää rakennetta merkittävästi johtaen homekasvun mahdollisuuteen. Seinärakenteen höyrinsulun vesihöyrytiiveydellä voidaan parantaa tuuletusvälin kosteusturvallisuutta vain, jos välin ilmanvaihtuvuus on erittäin alhainen, luokkaa 2 l/h. Kattorakenteissa höyrinsulun vesihöyrytiiveyden merkitys on laskennan mukaan pieni, mutta koetulosten perusteella on suositeltavaa minimoida sisäilmasta kattoon siirtyvä kosteusvirta käyttämällä rakenteen sisäosassa vähintään tavanomaista polyeteenihöyrinsulkua.



Kuva 4. Kattorakenteiden laskennallinen analyysi [5]; (a) hyvin eristetyin katon ja (b) vertailurakenteen tuuletusvälin lämpötilan ja ulkoilman lämpötilan erotus riippuen tuuletusvälin ulkopuolisesta lämmönvastuksesta ja välin ilmanvaihtuvuudesta; (c) ja (d): tasa-arvokäyrät, jossa tuuletusvälin suhteellinen kosteus vastaa homeen kasvun edellyttämää vähimmäistasoa. Käyrien vasemmalla puolella homeen kasvu on mahdollista. Lämmönvastuksen R_{int} -arvot kuvaavat tuuletusvälin sisäpuolista rakennososaa ja s_d -arvot koskevat höyrinsulkua.

Koetulosten ja kuvan 4 mukaisten laskentatarkastelujen perusteella seinien ja kattojen tuuletusmäärät talvisin ovat hieman optimaalista tasoa korkeammat. Painehäviötarkastelun mukaan tuuletusvälin kitkاپainehäviö nousee merkittäväksi vasta tuuletusvälin paksuudella 22 mm, kun taas tuuletusvälin paksuus 52 mm vaikutti virtaukseen lähes vastaavasti kuin paksummat 98 mm ja 200 mm tuuletusvälit [5]. Tuuletusaukossa olevan hyönteisverkon vaikutus ilmavirtaukseen oli alhainen. Seinän tuuletusvälin toteutus ristikoolauksella ei kasvata painehäviötä verrattuna pystykoolaukseen.

Jos yksikerroksisen rakennuksen seinärakenteiden tuulettavuus halutaan rajoittaa tasolle 3–25 l/h, riittävä painehäviö saavutetaan 5 mm tai 10 mm paksulla tuuletusvälillä tai käyttämällä tuuletusaukossa reikäpeltiä, jossa on halkaisijaltaan 12 mm reikiä yhteensä noin 10 kappaletta

jokaisessa pystykoolausten rajaamassa ilmapälissä. Korkeissa julkisivuissa, missä tuuletusväli on toteutettu tuulettuvilla hattulistoilla, reikien aiheuttama painehäviö tuuletusreitillä kasvaa moninkertaiseksi, kun koolausväli on luokkaa 400–600 mm, joten reikäkoko tulee olla yli 12 mm. Kattorakenteissa luonnollista konvektiota aiheuttava paine-ero on seinärakenteita alhaisempi, joten tuuletusaukkojen kuristaminen tulee kysymykseen lähinnä tuulisilla alueilla, missä pakotetun konvektion osuus katon vuotuisesta tuuletuksesta on merkittävä. Muilla alueilla tavanomainen 20 mm korkea, hyönteisverkotettu tuuletusaukko räystäällä on suositeltava ratkaisu. Kattojen tuuletuksessa tulee pyrkiä noin 20–40 l/h ilmanvaihtuvuuteen, jolloin lumen sulamisriski on vähäinen, mutta ilmanvaihtuvuus ei kuitenkaan viilennä tuuletusväliä liiallisesti.

4. Yhteenveto

Tulosten perusteella hyvin eristettyjen ulkoseinien tuuletusvälin olosuhteet ovat heikoimmat välin alaosassa, johon kylmä ulkoilma tyypillisesti virtaa. Hyvin eristettyjen kattorakenteiden tuuletusvälien toiminta on vielä tätä heikompaa johtuen monesta tekijästä, kuten rakenteiden erittäin alhaisesta lämmönläpäisykertoimesta ja säteilylämmönsiirrosta taivaan välillä. Yläpohjarakenteiden tuuletusvälissä ja seinärakenteiden tuuletusvälin alaosassa nykyilmastossa esiintyvä lievä homeenkasvun riski voi kasvaa merkittäväksi, jos ilmasto muuttuu ennustetusti.

Koetulosten ja laskennallisten analyysien perusteella tuuletusvälien toimivuutta voidaan parantaa muodostamalla tuuletusväli kosteudelle vähemmän herkistä materiaaleista, kuten pinnoitetusta tuulensuojalevystä mineraalivillaeristeellä ja höylätystä puusta. Lisäksi on suositeltavaa käyttää vesihöyrytiivitä höyrynsulkumateriaaleja ulkovaipparakenteen sisäosassa. Ilmaston ennustettuun muuttumiseen on suositeltavaa varautua optimoimalla tuuletusvälien ilmanvaihtuvuutta siten, että varmistetaan rakenteen riittävä kuivumiskyky viilentämättä liiallisesti rakennetta. Tuuletuksen määrää voidaan arvioida esimerkiksi virtausreitien painehäviötarkastelulla. Tuuletusvälin ulkopuolisen rakenneosan lämmönvastuksen kasvattaminen tavanomaiselta tasolta on myös tehokas keino parantaa tuuletusvälin lämpö- ja kosteusolosuhteita. Erityisesti kattorakenteissa on tarpeen arvioida tuuletusvälin ulkopuolisen rakenteen lämmönvastuksen maltillista nostamista tuuletusvälin kosteusturvallisten olosuhteiden varmistamiseksi.

Lähdeluettelo

- [1] RIL 107-2022. 2022. Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet. RIL ry.
- [2] SINTEF. 2021. Skrå, luftede tretak med isolerte takflater. Byggforskserien 525.101.
- [3] Viljanen, K. 2023. Puurunkoisten, mineraalivillaeristeisten ja vähän lämpöä läpäisevien seinä- ja kattorakenteiden lämpö- ja kosteustekninen toiminta. Väitöskirja. Aalto-yliopisto.
- [4] Viljanen, K., Lü, X. ja Puttonen, J. 2020. Hygrothermal behaviour of ventilation cavities in highly insulated envelopes. E3S Web of Conferences 172, 07003.
- [5] Viljanen, K., Lü, X. ja Puttonen, J. 2021. Factors affecting the performance of ventilation cavities in highly insulated assemblies. Journal of Building Physics 45(1), 67-110.
- [6] Hens, H. 2007. Building Physics – Heat, air and moisture: Fundamentals and engineering methods with examples and exercises. Leuven: Ernst & Sohn Verlag.
- [7] Nevander, L. E. ja Elmarsson, B. 2008. Fukthandbok: praktik och teori. Solna: Svensk byggtjänst.
- [8] Hukka, A. ja Viitanen, H. 1999. A Mathematical model of mould growth on wooden material. Wood Science and Technology 33(6), 475-485.
- [9] Tang, W., Kuehn, T. H. ja Simcik, M. F. 2015. Effects of temperature, humidity and air flow on fungal growth rate on loaded ventilation filters. Journal of Occupational and Environmental Hygiene 12(8), 525-537.

Tarpeenmukaisen tuuletuksen vaikutus loivan katon kuivumiskykyyn ja rakenteen kesäaikana läpäisevään lämpövirtaan

Klaus Viljanen
Ramboll Finland Oy

Tiivistelmä

Loivien kattorakenteiden tuuletus Suomessa toteutetaan yleensä lämmöneristeen tuuletusurilla ja alipainetuulettimilla. Artikkelissa arvioidaan, voidaanko tarpeenmukaisella tuuletuksella parantaa katon kosteusteknistä toimivuutta ja saavuttaa energiansäästöä vähentämällä sisätiloihin kohdistuvaa lämpökuormaa. Tulosten perusteella tarpeenmukainen tuuletus poistaa katosta ylimääräisen kosteuden selvästi alipainetuulettimesta nopeammin vähentäen kosteusvaurion todennäköisyyttä. Tarpeenmukaisella tuuletuksella voidaan vähentää sisätilojen lämpökuormaa 12–21 % ja pienentää viilennysenergian tarvetta kasvattamalla kesäaikana rakenteen ulko-osan ilmanvaihtuvuutta.

1. Johdanto

Kattorakenteiden ulko-osan tuuletuksella on Suomessa perinteisesti varmistettu rakenteiden riittävä kuivumiskyky. Loivien kattojen kuivumiskyky perustuu tavanomaisesti pääosin tuulen ja nostevoiman aiheuttamaan paine-eroon tuuletusreitien eri päissä. Tuuletus toteutetaan usein käyttämällä uritettua lämmöneristettä (kuva 1). Nostevoiman hyödyntämiseksi tuuletusurat suunnitellaan tyypillisesti katon kaltevuuksien mukaan. Loivien kattojen tuulettavuus vaihtelee kuitenkin voimakkaasti tuuliolojen mukaan ja tuulettuminen voi olla vähäistä tuulettomalla säällä. Katon tuulettotarve voi olla tavanomaista suurempi esimerkiksi uudessa rakennuksessa rakennuskosteuden kuivumisvaiheessa tai jos katto vuotaa. Kesäaikana katon tuulettavuus vaikuttaa katon läpäisevään lämpövirtaan ja näin ollen myös rakennuksen energiankulutukseen.

Artikkelissa tutkitaan Vilpe Oy:n kattojen ja ryömintätilojen tarpeenmukaiseen tuuletukseen tarkoitetun Sense-järjestelmän vaikutusta loivien kattorakenteiden rakennusfysikaaliseen toimintaan. Tarkastelussa arvioidaan katon tarpeenmukaisen tuulettavuuden vaikutusta rakennuskosteuden kuivumiseen ja katon kesäaikana läpäisevään lämpövirtaan.



Kuva 1. Tuuletusuritetun mineraalivillakaton rakentaminen käynnissä.

2. Laskentamalli

Laskentatarkastelun tavoitteena oli selvittää, voidaanko tarpeenmukaisella loivan katon tuuletuksella parantaa rakenteen kosteusteknistä toimivuutta verrattuna alipainetuuletukseen, jos rakenteessa on ylimääräistä kosteutta. Toisessa tarkastelussa tavoitteena oli viilennysenergian säästön kannalta selvittää, voiko tarpeenmukainen tuuletus merkittävästi vähentää katon läpi alaspäin siirtyvää lämpömäärää kesäaikana.

Tuuletetun loivan vesikattorakenteen toimintaa arvioitiin aikariippuvalla laskentatarkastelulla. Yksiulotteinen numeerinen laskentamalli tehtiin kaupallisen laskentaohjelman avulla (Wufi Pro 5.3). Laskenta-aika oli kolme vuotta alkaen tammikuun ensimmäisenä päivänä. Tutkittava rakenne oli loiva uratuuletettu kattorakenne, jonka lämmönläpäisykerroin (U-arvo) oli $0,09 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Kantavana rakenteena oli 40 mm paksuinen TT-laatan laattaosa. Laatan päällä oli höyrünsulkuna bitumikermi. Lämmöneristeenä oli yläpinnastaan tuuletusuritettu 370 mm paksu mineraalivilla ja sen päällä 30 mm paksu pintavilla.



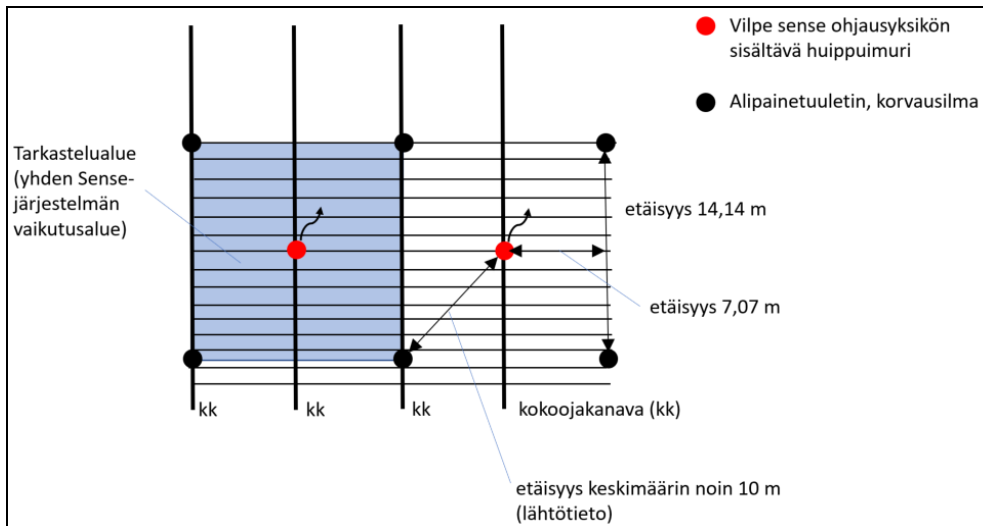
Kuva 2. Wufi Pro 5.3-laskentaohjelmaan tehty vesikattorakenteen laskentamalli. Lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja homeindeksin tarkastelupisteet 1–3 sijaitsivat lämmöneristekerroksessa.

Mineraalivillan alkukosteutena käytettiin kuivumistarkastelussa arvoa $30 \text{ kg}/\text{m}^3$, joka vastaa heikosti tuulettuvaa kattoa, jossa on ollut vesivuotoja. Kesäajan tarkastelussa kaikkien materiaalien suhteellinen kosteus laskennan alussa oli 80 %. Mineraalivillan alkukosteus oli tässä tapauksessa $0,99 \text{ kg}/\text{m}^3$, joka vastaa kenttämittauksissa todettua tavanomaista tasoa.

Tuuletusurien koko oli $20 \times 30 \text{ mm}^2$, ja urien jakoväli oli 200 mm. Katon tuuletusurat mallinnettiin 5 mm paksuna ilmakerroksena, jonka vaikutus ilmanvaihtokertoimeen huomioitiin vertaamalla 5 mm tuuletusvälin poikkipinta-alaa urien vastaavaan alaan. Ilmanvaihtokerroin ($1/\text{h}$) laskettiin suhteuttamalla puhaltimen ilmamäärä sen vaikutusalueeseen katolla (kuva 3). Alipainetuulettimen aiheuttama ilmamäärä muutettiin laskentamallin ilmanvaihtuvuudeksi olettamalla tuulettimen vaikutusalueeksi 150 m^2 [1].

Katon tuulettuvuuden huomioiminen laskentamallissa perustui Sense-järjestelmän ohjauslogiikkaan ja Vilpe Oy:n tekemiin kenttä- ja laboratoriomittauksiin kattorakenteen tuuletusmääristä, kun tuuletus perustuu alipainetuuletukseen tai tarpeenmukaiseen tuuletukseen. Mittausten perusteella alipainetuulettimen ilmamäärä riippuu lähes lineaarisesti tuulennopeudesta. Alipainetuulettimen ilmanvaihtuvuus ratkaistiin olettamalla alipainetuulettimeen vaikuttava tuulennopeus säädatan mukaiseksi. Todellisuudessa tuulen nopeus katolla riippuu rakennuksen geometriasta ja rakennuksen ympäristöstä.

Koska katon älyohjattu tuuletus mittaa samanaikaisesti ulkoilman ja rakenteen eristetilan olosuhteita, laskentatarkastelu tehtiin iteratiivisesti. Ilmanvaihtuvuus ratkaistiin ensin säädatan perusteella olettamalla rakenteen tuuletusura $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ ulkoilmaa lämpimämmäksi ja käyttämällä



Kuva 3. Laskentatarkastelussa oletettu älyohjatun puhaltimen vaikutusalue.

rakenteen suhteellisena kosteutena arvoa 100 %. Ajasta riippuva ilmanvaihtuvuus laskettiin uudelleen kolmen vuoden simuloinnin mukaisilla tuuletusurien kohdan olosuhteilla.

Sisäilman kosteuslisä oli talvella 3 g/m^3 ja kesällä 1 g/m^3 kosteusluokan 3 mukaisesti [2]. Sisäilman lämpötila oli vakio $21 \text{ }^\circ\text{C}$. Ulkoilman olosuhteina käytettiin Vantaan 2017 nykysään rakennusfysiikan testivuoden olosuhteita.

Laskennassa oletettiin, että rakenteen ulkopuolelta ei pääse vettä rakenteeseen. Auringon säteilyn absorptiokerroin oli 0,88 ja pitkäaaltoisen säteilyn emissiokerroin oli 0,9. Maan pitkäaaltoisen emissiokerroin oli 0,9 ja maan pitkäaaltoisen säteilyn heijastuskerroin 0,1. Pilvisyysindeksi oli 0,66. Katon ilmansuunta oli etelään päin ja kallistuskulmaksi oletettiin 0° .

Lämpö- ja kosteusolosuhteiden mukaista homeenkasvun riskiä katon lämmöneristekerroksessa arvioitiin suomalaisen homemallin avulla [3,4]. Rakenteen mineraalivillalämmöneristeen mukaiset laskentaparametrit olivat: kasvunopeuden ja homeen maksimimäärän herkkyysluokka 3, eli kohtalaisen herkkä ja taantumaluokka 4, eli vähäinen taantuma.

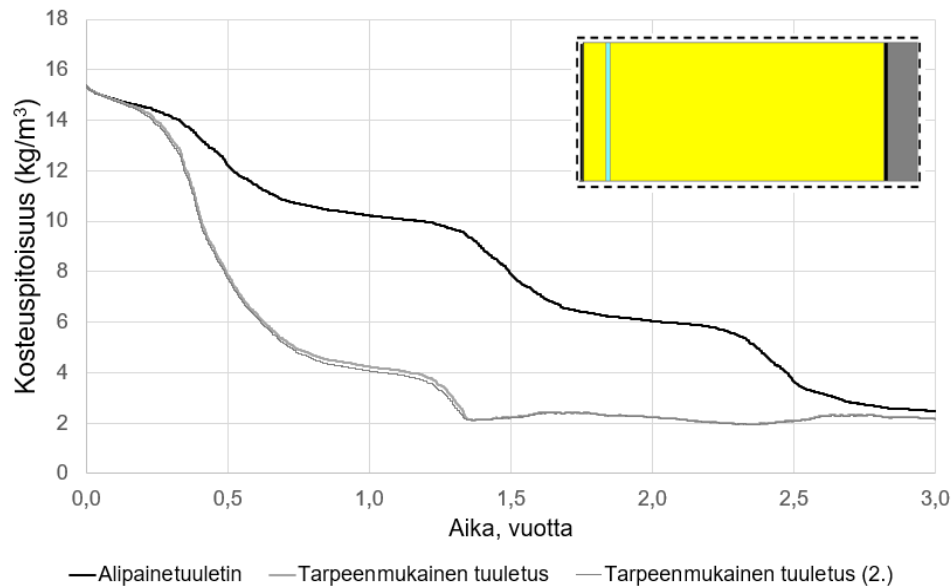
Tarpeenmukaisen tuuletuksen vaikutusta katon läpäisemään lämpövirtaan yhden vuoden aikana tutkittiin pääosin vastaavalla kattorakenteella kuin kuivumistarkastelussa (kuva 2), mutta alemman lämmöneristeen paksuutena käytettiin arvoja 200 mm ja 130 mm, joita vastaavat rakenteen U-arvot ovat $0,16 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ja $0,22 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Tämä valinta perustui oletukselle, että tuuletuksella voitaisiin aikaansaada viilennysenergian säästöä erityisesti vanhemmissa, vähemmän eristetyissä kattorakenteissa.

3. Tulokset

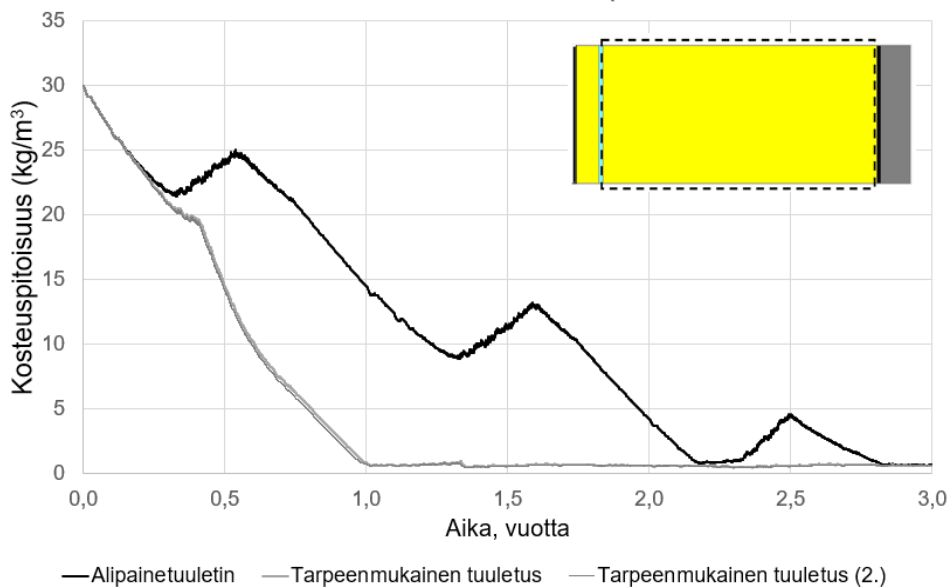
Tarpeenmukainen katon tuuletus johti selvästi korkeampaan rakenteen tuulettavuuteen kuin alipainetuuletus erityisesti lämpimänä vuodenaikana. Alipainetuulettimella katon tuuletusurien ilmanvaihtuvuus oli vuodenaikasta riippumatta luokkaa 20–40 1/h, kun tarpeenmukaisella tuuletuksella ilmanvaihtuvuus oli kylmänä vuodenaikana 20–80 1/h ja lämpimänä vuodenaikana 60–140 1/h.

Rakenteen kokonaiskosteuspitoisuus ja alemman villakerroksen kosteuspitoisuus laskivat kolmen vuoden tarkasteluajana tasapainotilaan kummallakin tuuletusratkaisulla (kuvat 4 ja 5).

Tarpeenmukaisella tuuletuksella rakenteen kuivuminen oli selvästi nopeampaa (kuva 4). Villakerros kuivui tällä ratkaisulla tasapainotilaan noin vuodessa, kun alipainetuuletuksella vastaavan kosteustason saavuttamiseen meni lähes kolme vuotta (kuva 5).



Kuva 4. Kattorakenteen kokonaiskosteuspitoisuus 3 vuoden laskenta-ajalla. Tarpeenmukaisen tuuletuksen toisen iteraatiokierroksen tulokset on esitetty 2.-käyrällä.

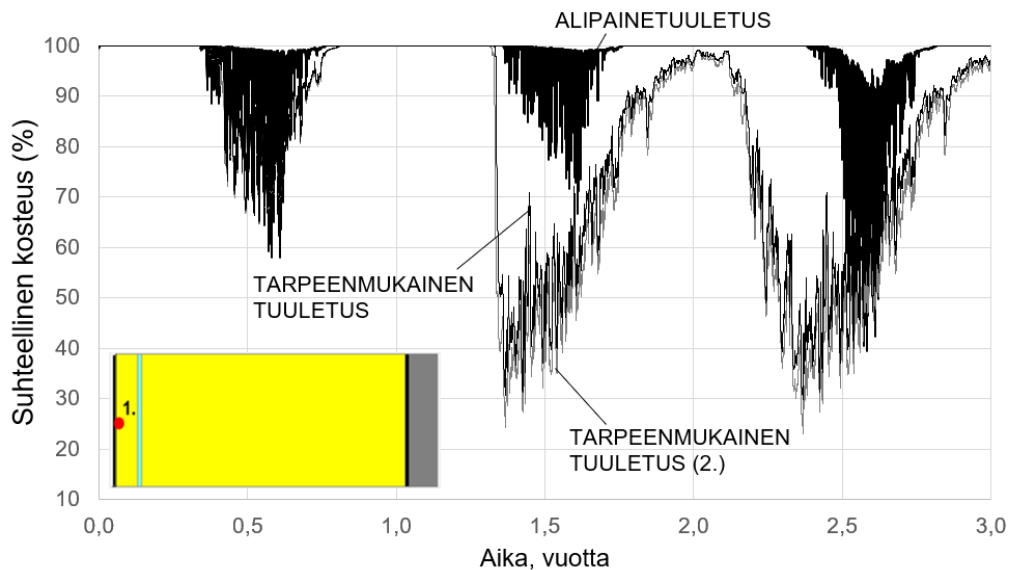


Kuva 5. Alemman villakerroksen kosteuspitoisuus 3 vuoden laskenta-ajalla. Tarpeenmukaisen tuuletuksen toisen iteraatiokierroksen tulokset on esitetty 2.-käyrällä.

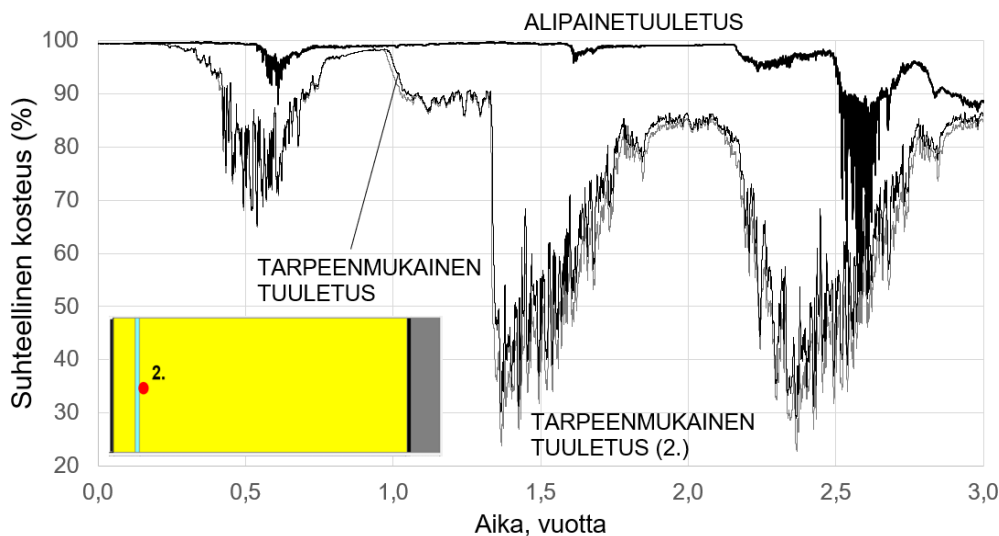
Pintavillan yläosan suhteellinen kosteus pysyy korkeana koko laskenta-ajan, jos kattoa tuuletetaan alipainetuuletuksella (kuva 6). Tarpeenmukaisella tuuletuksella suhteellinen kosteus laskee tässä pisteessä selvästi laskenta-ajan keskivaiheilla.

Tarpeenmukaisella tuuletuksella alemman villalevyn yläosassa suhteellinen kosteus laskee alle 98–100 % tason jo ensimmäisen kesän aikana (kuva 7). Alipainetuuletuksella suhteellinen kosteus tässä pisteessä laskee alle 95–100 % tason vasta kolmannen kesän aikana. Lämmöneristekerroksen alaosassa pisteessä 3 suhteellinen kosteus oli kummallakin

tuuletusratkaisulla selvästi pisteiden 1 ja 2 suhteellista kosteutta alempi vaihdellen vuodenajan mukaan. Kesäaikaan suhteellinen kosteus nousi tässä pisteessä tasolle 90–100 % (alipainetuuletus) ja 50–70 % (tarpeenmukainen tuuletus) toisena ja kolmantena laskentavuotena.



Kuva 6. Suhteellinen kosteus tarkastelupisteessä 1 eri tuuletusvaihtoehdoilla. Tarpeenmukaisen tuuletuksen toisen iteraatiokierroksen tulokset on esitetty 2.-käyrällä.



Kuva 7. Suhteellinen kosteus tarkastelupisteessä 2 eri tuuletusvaihtoehdoilla. Tarpeenmukaisen tuuletuksen toisen iteraatiokierroksen tulokset on esitetty 2.-käyrällä.

Alipainetuuletetun loivan katon homeindeksin arvot (1,4–3,3) ovat selvästi korkeammat verrattuna tarpeenmukaiseen tuuletukseen vastaaviin arvoihin (0,3–0,7; taulukko 1). Alipainetuuletuksella korkea rakennuskosteuden määrä johtaa homeenkasvun riskiin erityisesti lämmöneristekerroksen yläosassa, mutta lämmöneristekerroksen alaosassa homekasvun riski on verrattain vähäinen.

Taulukko 1. Laskennalliset homeindeksit tarkastelupisteissä 1–3.

Tuuletusmenetelmä	Tarkastelupiste		
	Piste 1	Piste 2	Piste 3
Alipainetuuletus	3,3	3,2	1,4
Tarpeenmukainen tuuletus	0,7	0,5	0,3

Taulukossa 2 on esitetty tuuletuksen vaikutus tutkitun kattorakenteen aiheuttamaan sisäilman lämpökuormaan vuoden aikana. Tehokkaammin lämmöneristetyssä katossa ($U\ 0,16\ \text{W}/(\text{m}^2\text{K})$) tuuletusratkaisulla voidaan vähentää sisätilan lämpökuormaa 12–21 %. Vähemmän lämmöneristetyssä katossa ($U\ 0,22\ \text{W}/(\text{m}^2\text{K})$) vastaava lämpökuorman vähennys on 4–12 %. Tarpeenmukaista tuuletusmäärää kasvattamalla lämpökuormaa voidaan vähentää vielä esitettyjä arvoja enemmän. Tarkastelussa ei huomioitu puhaltimen kuluttamaa energiaa.

Taulukko 2. Katon läpi rakennuksen sisäilmaan siirtynyt lämpömäärä vuodessa.

Katon U-arvo 0,16 W/(m²K)		
	kWh / katto-m²	muutos
tuulettamaton rakenne	1,38	
alipainetuuletettu rakenne	1,21	-12 %
tarpeenmukaisesti tuuletettu rakenne	1,09	-21 %
Katon U-arvo 0,22 W/(m²K)		
	kWh / katto-m²	muutos
tuulettamaton rakenne	2,65	
alipainetuuletettu rakenne	2,54	-4 %
tarpeenmukaisesti tuuletettu rakenne	2,33	-12 %

4. Yhteenveto

Katteeseen tai sen liittyisiin syntyvät vuotokohdat voivat aiheuttaa loiviin kattoihin merkittäviä kosteuskuormia. Vesivuotojen todennäköisyys riippuu monesta tekijästä, kuten asennustyön ja katteen laadusta. Korkea kosteuspitoisuus voi loivassa vesikatossa aiheuttaa lämmöneristekerroksen homeaurioitumisen ja nopeuttaa mineraalivillaeristeen pintaosan pehmenemistä lumen painosta. Lämmöneristeen pintaosien painuminen voi heikentää rakenteen tuuletusta tuuletusurien painuessa kasaan.

Tulosten perusteella loivan katon alipainetuuletus ja tarpeenmukainen tuuletus ovat molemmat tehokkaita ratkaisuja rakenteessa olevan ylimääräisen kosteuden poistamiseksi. Tarpeenmukaisella tuuletuksella voidaan nopeuttaa kastuneen katon kuivumista, ja joissain tapauksissa sillä voidaan välttää rakenteen laajempi korjaaminen. Tarpeenmukaisen tuuletusjärjestelmän antureita voidaan myös hyödyntää vesivuotokohtien paikallistamisessa. Tarpeenmukaisella tuuletuksella voidaan lisäksi vähentää katon aiheuttamaa sisätilojen lämpökuormaa 12–21 % verrattuna tuulettamattomaan kattoon. Tarpeenmukaisella tuuletuksella voidaan toisaalta optimoida rakenteen tuuletusta parantaen tuuletusvälien lämpö- ja kosteusolosuhteita, minkä merkitys on korostunut hyvin eristetyissä ulkovaipparakenteissa [5].

Lähdeluettelo

- [1] Kattoliitto ry. 2022. Toimivat katot 2022.
- [2] RIL 107-2022. 2022. Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet. RIL ry.
- [3] Viitanen, H., Vinha, J., Peuhkuri, R., et al. 2008. Development of an improved model for mould growth: Modelling. 8th Nordic symposium on building physics, Kööpenhamina, Tanska, 16-18 Kesäkuu 2008, Vol 2, pp. 927-934.
- [4] Lähdesmäki, K., Vinha, J., Viitanen, H. et al. 2008. Development of an improved model for mould growth: Laboratory and field experiments. 8th Nordic symposium on building physics, Kööpenhamina, Tanska, 16-18 Kesäkuu 2008, Vol 2, pp. 935-942.
- [5] Viljanen, K. 2023. Puurunkoisten, mineraalivillaeristeisten ja vähän lämpöä läpäisevien seinä- ja kattorakenteiden lämpö- ja kosteustekninen toiminta. Väitöskirja. Aalto-yliopisto.

Tuulettuvien yläpohjakoerakenteiden laskennalliset vertailutarkastelut

Petteri Huttunen ja Juha Vinha
Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka

Tiivistelmä

BusinessFinlandin rahoittamassa FutureSpaces-tutkimushankkeessa (2020–2023) rakennettiin sekä mineraali- että puukuitupohjaisilla puhalluseristeillä eristettyjä tuulettuvia yläpohjakoerakenteita, jotka asennettiin Tampereen yliopiston rakennusfysikaalisiin koerakennuksiin. Koerakenteilla pyritään edelleen saamaan jatkuvatoimisilla lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittauksilla tutkimustietoa tuulettuvien yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisesta toiminnasta Suomen ilmastossa. Yhtenä tutkimuskysymyksenä on myös, kuinka lämpöä eristävä aluskate vaikuttaa olosuhteisiin tuuletustilassa. Tässä artikkelissa esitellään koerakenteisiin liittyviä rakennusfysikaalisia vertailusimulointeja, joita tehtiin Comsol Multiphysics -laskentaohjelmalla. Useista toisiinsa kytketyistä komponenteista rakennetut mallit tuottivat pääasiassa hyvin mittauksia vastaavia tuloksia. Laskennan ja mittausten vertailu tehtiin vuoden 2022 osalta, jolloin yhdessäkin tutkituista koerakenteista ei esiintynyt homeen kasvulle otollisia olosuhteita. Lämpöä eristävällä aluskatteella oli etenkin talvella pieni vaikutus tuuletustilojen olosuhteisiin, mutta aihe vaatii vielä lisää tutkimusta.

1. Johdanto

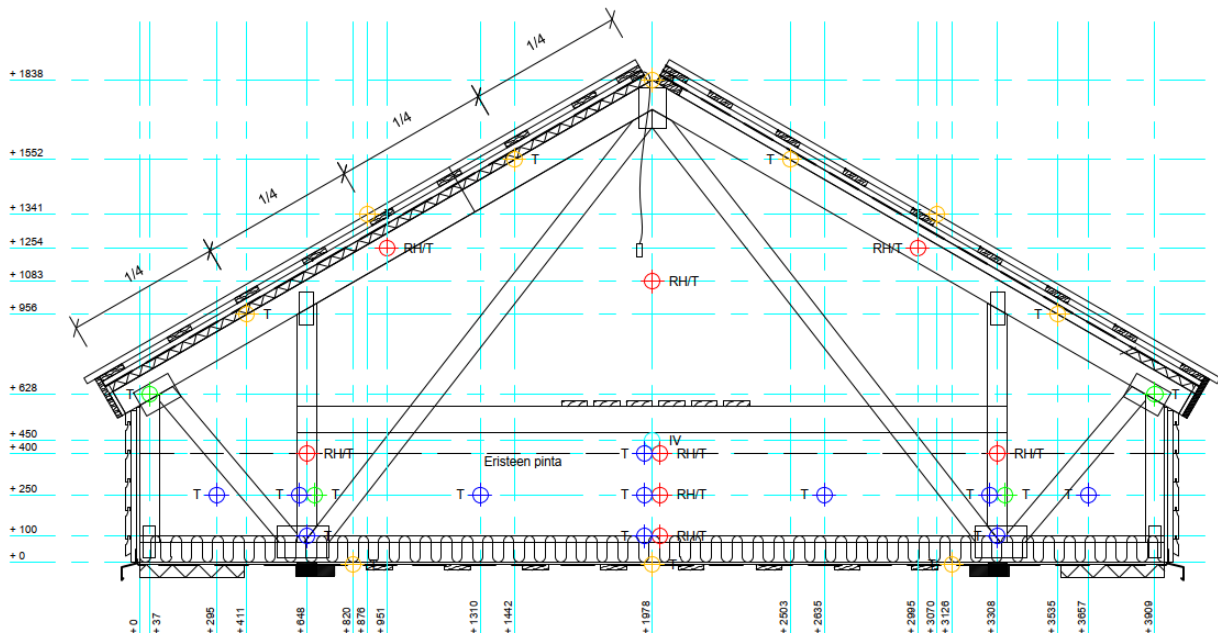
Vuosina 2020–2023 toteutetussa BusinessFinlandin rahoittamassa tutkimushankkeessa nimeltä FutureSpaces pyrittiin luomaan uudenlaista palvelukonseptia korjausrakentamiseen sekä saamaan uutta tutkimustietoa rakenteiden kosteusteknisestä toiminnasta [1]. Hankkeen aikana rakennettiin kahdella eri eristemateriaalilla – kivivillalla ja puukuitueristeellä – eristettyjä harjakaton muotoisia yläpohjakoerakenteita, jotka asennettiin Tampereen yliopiston Hervannan kampuksella sijaitseviin rakennusfysikaalisiin koerakennuksiin. Molemmilla materiaaleilla eristetyistä koerakenteista tehtiin kaksi versiota, joista toisessa oli tavanomainen kalvoaluskate ja toisessa lämpöä eristävä 30 mm paksu XPS-levy aluskatteena. Tässä artikkelissa käsitellään näiden neljän koerakenteen lämpö- ja kosteusteknisiä mittauksia vuoden 2022 ajalta sekä niihin liittyviä lämpö- ja kosteusteknisiä vertailusimulointeja.

2. Koerakenteiden esittely

Rakennusfysikaaliset koerakennukset on sijoitettu siten, että niiden seinäkoerakenteita sisältävät pitkät julkisivut sekä yläpohjakoerakenteisiin liittyvät kattojen lapheet ovat suunnattuna pohjoiseen ja etelään. Kuvassa 1 on esitetty rakenneleikkaus sekä anturointipiirustus yksittäisestä koerakenteesta. Jokaiseen koerakenteeseen asennettiin kymmeniä joko lämpötilaa tai sekä lämpötilaa että suhteellista kosteutta jatkuvatoimisesti mittaavia antureita. Koerakenteet pyrittiin suunnittelemaan ja toteuttamaan rakenteellisilta yksityiskohdiltaan siten, että ne vastaisivat tuulettuvuudeltaan mahdollisimman hyvin vallitsevien ohjeiden mukaisia kattorakenteita. Koerakenteet yksilöidään tässä artikkelissa seuraavasti:

- YP1.1: Kivivilla, lämpöä eristävä aluskate (30 mm XPS)
- YP1.2: Kivivilla, kalvoaluskate
- YP2.1: Puukuitueriste, lämpöä eristävä aluskate (30 mm XPS)

- YP2.2: Puukuitueriste, kalvoaluskate



Kuva 1. Rakenneleikkaus ja anturointipiirustus yläpohjakoerakenteesta.

Kuvassa 2 on esitetty valokuva yläpohjakoerakenteesta ennen vesikatteen asentamista ja rakenteen asentamista paikoilleen koerakennukseen sekä valokuva koerakennuksesta ulkopuolelta kuvattuna.



Kuva 2. Valokuva yläpohjakoerakenteesta ennen asentamista koerakennukseen (vasemmalla) ja valokuva koerakennuksesta (oikealla).

Kaikissa koerakenteissa on sisäpuolella PE-höyrynsulkukalvo, jonka yläpuolella 100 mm paksu kivivilla- tai puukuitueristelevy. Levyeristeiden päällä on puhallettuna 300 mm paksu kerros kivivilla- tai puukuitueristettä.

3. Laskentamallit

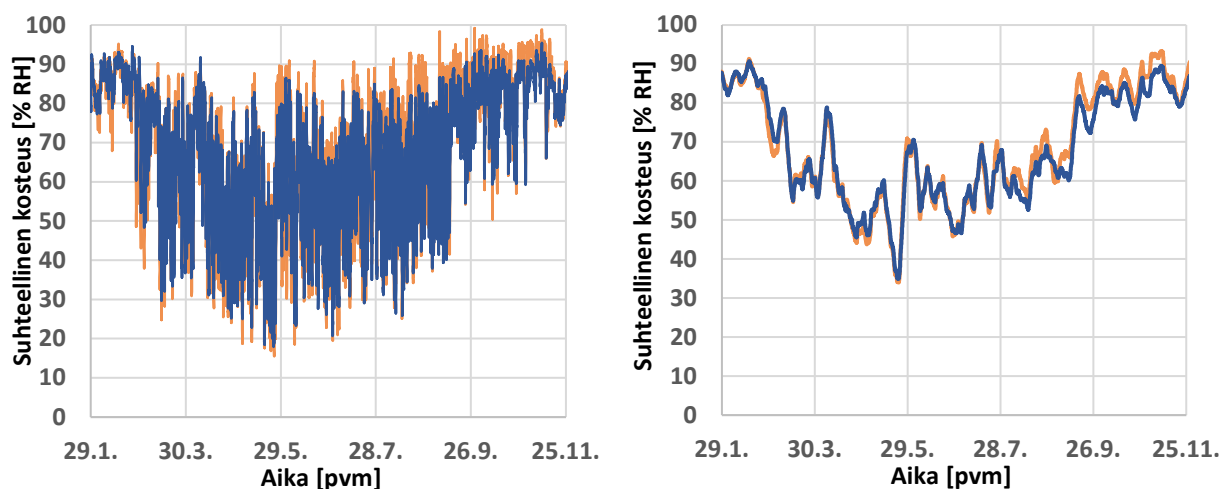
Tarkasteluissa oletetaan tuuletustilan ilman olevan täysin sekoittunutta, jolloin yksi lämpötilan ja yksi suhteellisen kosteuden arvo riittää kuvaamaan olosuhteita tuuletustilassa. Laskentamallit toteutettiin käyttämällä Comsol Multiphysics -ohjelmaa (versio 6.1), jonka sisäänrakennetulla Building Materials -moduulilla voidaan simuloida yhdistettyä lämmön ja kosteuden siirtymistä vastaavasti kuin WUFI-ohjelmalla [2,3]. Ohjelmassa on lisäksi mahdollista simuloida

yhtäaikaisesti monta fysikaalisesti toisiinsa kytkettyä geometrista komponenttia, jota hyödynnettiin tässä tutkimuksessa tekemällä pohjois- ja eteläpuolen vesikattolappeita sekä tuuletustilan ja sisäilman toisistaan erottavaa vaakasuuntaista eristettyä osaa varten kolme 1D-geometriaa, jotka kytkettiin reunaehtojen osalta tuuletustilan sekoittuneeseen ns. 0D-malliin. Tuuletustilan matemaattinen malli koostui kahdesta ajasta riippuvasta tavanomaisesta differentiaaliyhtälöstä, jotka johdettiin perustuen energian ja massan säilymiseen ottaen huomioon ilman termodynaamiset ominaisuudet sekä tuuletustilan tilavuus ($3,12 \text{ m}^3/\text{m}$) ja 1D-komponenttien pinta-alat, joiden kautta tapahtuu lämmön ja vesihöyryn siirtymistä tuuletustilan ja vesikatto-osien sekä päeristeosan välillä (vesikatto-osat: $2,3 \text{ m}^2/\text{m}$ molemmat lappeat, päeristeosa: $3,9 \text{ m}^2/\text{m}$). Vuotamattomiksi oletetuissa vesikatto-osissa mallinnettiin ainoastaan lämmön johtuminen ruodelautojen vaikutusta kuvaavissa puusta koostuvissa yhtenäisissä materiaalikerroksissa sekä XPS-aluskatteessa. Päeristekerroksissa mallinnettiin yhdistettyä lämmön ja kosteuden siirtymistä ja varastoitumista huokoisessa materiaalissa.

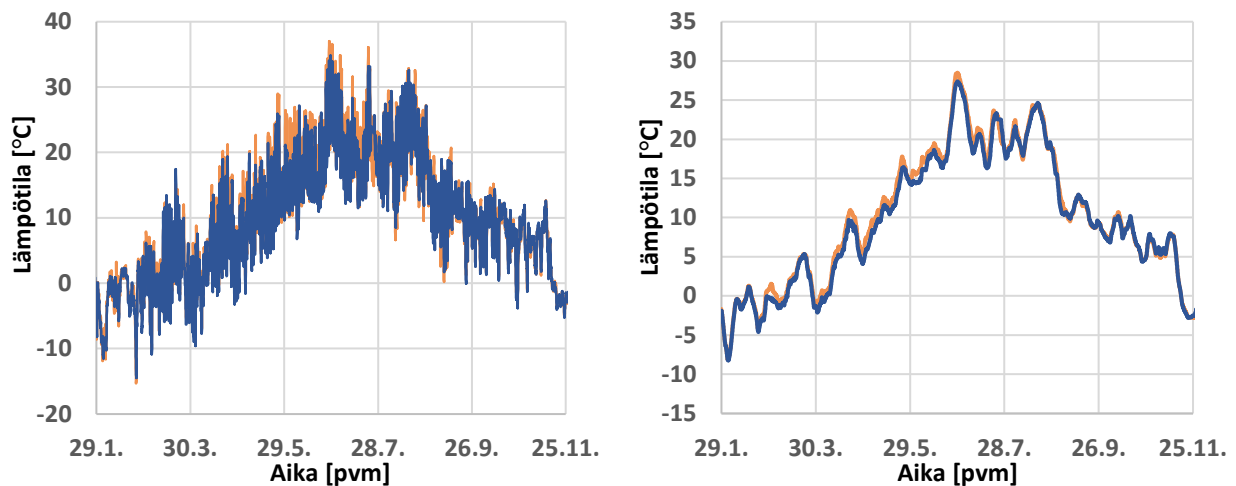
Höyrynsulkukalvon ($S_d = 50 \text{ m}$) vaikutus otettiin huomioon sisäpuolen reunaehdoissa. Laskennassa tarvittava reunaehtodata saatiin koerakennuksen omista mittauksista vuoden 2022 sisä- ja ulkoilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden osalta, mutta vesikaton lappeisiin kohdistuvana Auringon lyhytaaltoisena säteilynä jouduttiin käyttämään Ilmatieteen laitoksen tietokannasta saatavaa dataa Jokioisista, joka on noin 70 km Tampereen Hervannasta etelään päin. Laskentaohjelma WUFI:a hyödynnettiin säteilyn lappeisiin kohdistuvien normaalikomponenttien laskemisessa. Vesikaton ulkopinnan säteilyn absorptiokertoimena käytettiin arvoa 0,8. Ulkopinnan pintavastuksena käytettiin arvoa $0,04 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$. Tuuletustilan sisällä oleville pinnoille sekä päeristekerroksen sisäpuolen pinnalle käytettiin pintavastusta $0,13 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$. Tuuletustilan energia- ja massataseeseen vaikuttavana ilmanvaihtuvuutena käytettiin vakioarvoa 5 1/h.

4. Tulokset

Johtuen tämän tutkimuksen kaltaisista numeerisista tarkasteluista saatavasta suuresta tulosdatan määrästä tässä artikkelissa voidaan esittää ainoastaan pieni osa kaikista tuloksista. Tässä luvussa esitetään vertailuja vuoden 2022 osalta (tarkastelujakso 29.1.–25.11.) koerakenteiden tuuletustiloissa ja 300 mm paksun puhalluseristekerrosten puoliväleistä. Kuvassa 3 on esitetty vertailu mittaus- ja laskentatuloksista tuuletustilan suhteellisen kosteuden osalta koerakenteessa YP1.1 (kivivilla, XPS-aluskate) ja kuvassa 4 on esitetty vastaavat tulokset lämpötilojen osalta.



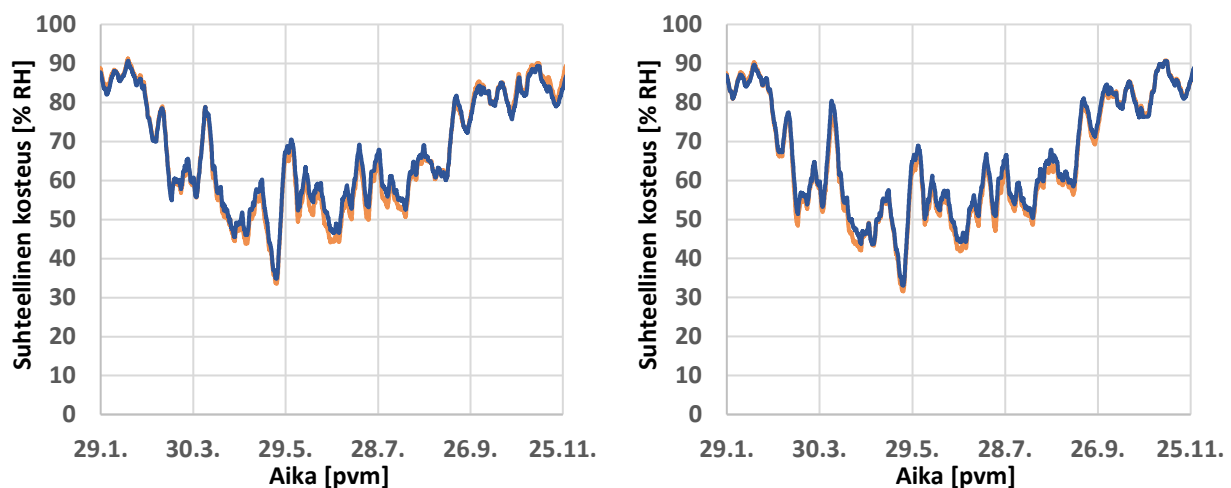
Kuva 3. Suhteellinen kosteus rakenteen YP1.1 tuuletustilassa. Sininen: Mitattu, Oranssi: Laskennallinen. Vasemmalla tunnittaiset arvot, oikealla 5 päivän liukuva keskiarvo.



Kuva 4. Lämpötila kivivillalla eristetyin rakenteen YP1.1 tuuletustilassa. Sininen: Mitattu, Oranssi: Laskennallinen. Vasemmalla tunnitset arvot, oikealla 5 päivän liukuva keskiarvo.

Kuvasta 3 nähdään, että lasketut ja mitatut suhteellisen kosteuden liukuvat keskiarvot ovat varsin lähellä toisiaan, mutta tunnitaisissa arvoissa on suurempaa poikkeamaa. Erot kasvavat kohti vuoden loppua. Laskentatulosten mukainen vuorokausittainen vaihtelu suhteellisessa kosteudessa on mitattua voimakkaampaa, jonka yksi merkittävä syy voi olla tuuletustilassa sijaitsevat puiset vesikattoa kannattelevat rakenneosat, joiden jonkin verran kosteusvaihteluita vaimentavaa vaikutusta ei ollut laskentamalleissa mukana. Kuvasta 4 nähdään, että vastaavuus laskennan ja mittauksen välillä tuuletustilan lämpötilojen osalta on myös varsin hyvä, vaikka laskennassa käytettiin eri paikkakunnalta mitattua lyhytaaltoista Auringon säteilyä.

Kuvassa 5 on esitetty vertailu mitatuista suhteellisista kosteuksista tuuletustiloissa kaikkien koerakenteiden osalta (5 päivän liukuva keskiarvo). Tulosten mukaan suhteellinen kosteus käy kalvoaluskatteisissa rakenteissa jonkin verran matalammalla kesäisin, jolloin Auringon säteily nostaa tuuletustilan lämpötilaa enemmän kalvoaluskatteellisessa rakenteessa. Talvisin erot ovat pieniä.



Kuva 5. Vasemmalla: YP1.1 ja YP1.2 rakenteista mitatut suhteelliset kosteudet tuuletustilasta (5 päivän liukuva keskiarvo). Oikealla: vastaavat tulokset rakenteista YP2.1 ja YP2.2. Sininen: XPS-aluskate, Oranssi: Kalvoaluskate.

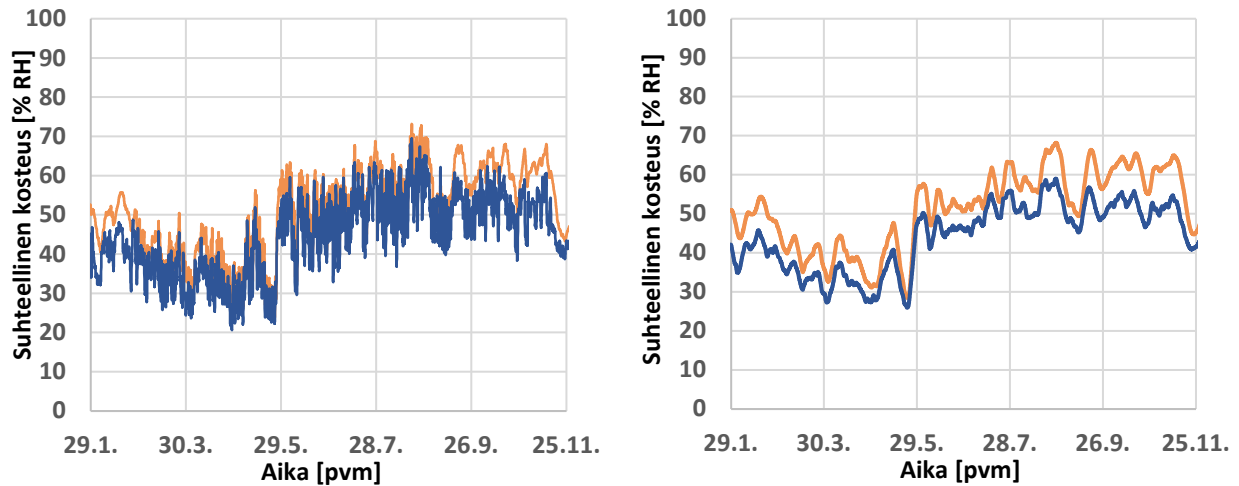
Taulukossa 1 on esitetty kaikista tarkastelutapauksista mittaus- ja laskentatulosten mukaiset minimi- ja maksiarvot sekä laskennan ja mittauksen poikkeamia kuvaavia arvoja. Korkein mitattu

ulkoilman lämpötila koerakennuksella vuoden 2022 tarkastelujakson aikana oli 31,5 °C ja matalin -17,3 °C. Taulukosta 1 nähdään, että molempien eristemateriaalien tapauksessa XPS-aluskatteella korkein lämpötila vuoden aikana on 4–5 °C matalampi kalvoaluskatetapaukseen verrattuna. Eristävän aluskatteen vaikutus tuuletustilan kylmimpään lämpötilaan vuoden aikana on pienempi, enimmillään noin 1 °C, mikä johtuu siitä, että kylmimpinä kausina vesikatteeseen kohdistuva Auringon säteily on vähäistä, jolloin tuulettumisen kautta tapahtuva lämmönsiirto pitää tuuletustilaa lähellä ulkoilman lämpötilaa eikä sisäilmasta pääeristekerroksen läpi vuotava lämpö juurikaan nosta tuuletustilan lämpötilaa. Tuuletustilan lämpötila oli äärimmillään hetkellisesti noin 12 °C ulkoilmaa lämpimämpi XPS-aluskatetapauksissa ja kalvoaluskatteilla noin 14 °C. Nämä erot toteutuivat elokuun puolessa välissä illalla, jolloin Auringon säteily on noston lämpötilan päivällä korkeaksi, mutta ulkoilman lämpötila jäähtyy tuuletustilaa nopeammin. Keskimääräinen mitattu lämpötilaero ulkoilman ja tuuletustilan välillä laskettuna kaikista tapauksista koko tarkastelujakson ajalta oli noin 2 °C.

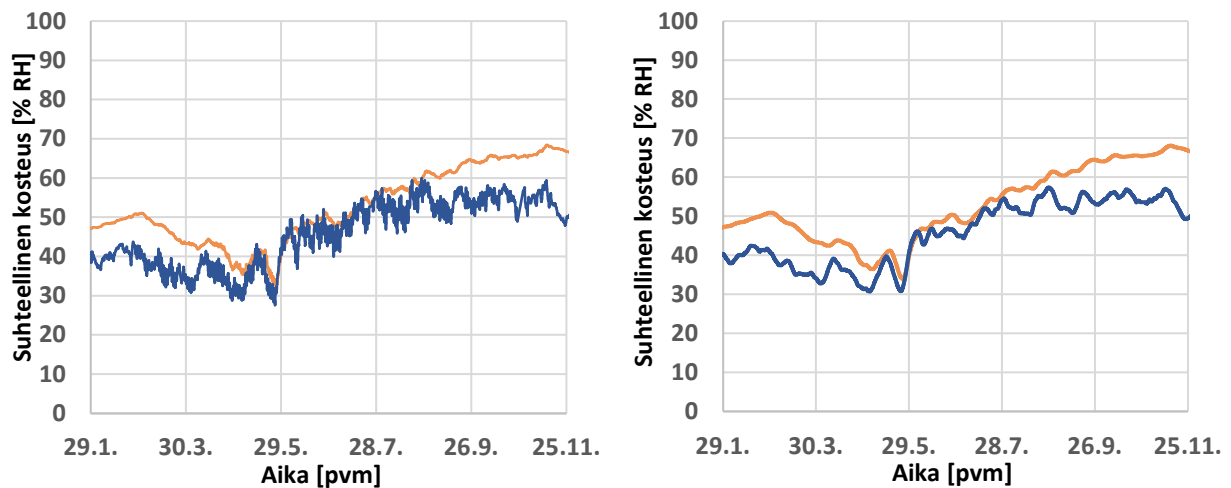
Taulukko 1. Lämpötilojen ja suhteellisten kosteuksien maksimi- ja minimiarvot kaikista tarkastelluista tapauksista sekä mittauksen ja laskennan eroja kuvaavia suureita, jossa ε = mitattu – laskennallinen. Tunnisteen loppuosassa numero 1 viittaa tuuletustilaan ja 2 puhalluseristeen puoliväliin.

Tunniste	max mit.	min mit.	max lask.	min lask.	$\varepsilon_{\text{mean}}$	$ \varepsilon _{\text{mean}}$	ε_{max}	ε_{min}
YP1.1-1-T	34,8	-14,5	37,0	-15,3	-0,5	1,2	7,8	-7,4
YP1.1-1-RH	95,5	17,9	99,2	15,5	-1,0	4,5	27,9	-28,9
YP1.1-2-T	28,5	2,6	29,2	-1,7	1,7	1,8	5,3	-2,1
YP1.1-2-RH	69,4	20,6	73,2	23,6	-7,0	7,0	4,4	-21,0
YP1.2-1-T	39,9	-16,8	42,5	-16,0	-1,0	1,9	10,1	-12,5
YP1.2-1-RH	95,9	13,8	99,4	11,7	0,4	5,5	30,6	-34,6
YP1.2-2-T	30,7	2,1	31,8	-1,4	1,2	1,5	5,1	-3,5
YP1.2-2-RH	70,6	19,6	71,7	20,6	-5,2	5,5	8,1	-20,5
YP2.1-1-T	36,4	-14,1	36,1	-14,4	-0,1	1,5	12,3	-9,7
YP2.1-1-RH	97,1	16,5	95,1	18,4	-1,7	4,5	34,4	-30,9
YP2.1-2-T	28,3	2,4	27,2	1,7	1,1	1,3	5,4	-2,7
YP2.1-2-RH	59,9	27,6	68,4	32,7	-7,1	7,3	4,3	-18,9
YP2.2-1-T	41,2	-14,2	41,9	-15,5	-0,7	2,2	15,4	-14,5
YP2.2-1-RH	95,8	13,1	95,5	14,0	-0,5	5,6	34,5	-36,0
YP2.2-2-T	29,0	0,0	29,4	0,6	-0,2	1,3	5,5	-5,3
YP2.2-2-RH	61,0	25,6	68,3	31,2	-5,8	6,4	7,1	-18,3

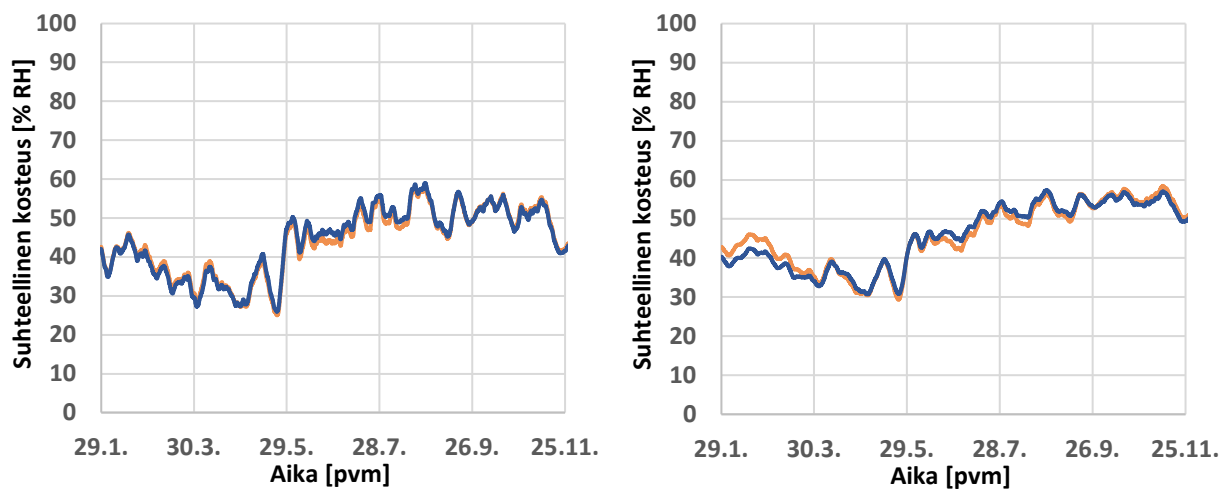
Kuvissa 6 ja 7 on esitetty lasketut ja mitatut suhteelliset kosteudet puhalluseristeen puolivälissä XPS-aluskatteella varustetuista yläpohjista. Päivittäinen suhteellisen kosteuden vaihtelu kivivillaeristeen sisällä on jonkin verran voimakkaampaa kuin puukuitueristeessä, joka selittyy puukuitueristeen suuremmalla kosteuskapasiteetilla. Laskennallinen malli tuotti mittauksiin verrattuna kuitenkin päivittäisen suhteellisen kosteuden vaihtelun osalta selvästi tasaisemman käyrän kuin mittaukset, jonka syynä voi olla se, että puukuitu- eli selluloosapohjaisten materiaalien kosteuskapasiteetti on hystereettistä ja lämpötilariippuvaa [4]. Kyseisten ominaisuuksien huomioon ottaminen rakennusfysikaalisissa simuloinneissa on nykyhetkellä vielä harvinaista johtuen näihin ilmiöihin liittyen huonosti tunnetuista materiaaliominaisuuksista sekä monimutkaisuuden lisääntymisestä numeerisissa malleissa ilmiötä mallinnettaessa. Kaikissa tarkasteluissa laskennallisesti määritetyt suhteelliset kosteudet eristeen sisällä olivat keskimäärin jonkin verran korkeammalla kuin mitatut.



Kuva 6. Suhteellinen kosteus rakenteen YP1.1 puhalluseristeen puolivälissä. Sininen: Mitattu, Oranssi: Laskennallinen. Vasemmalla tunnitaiset arvot, oikealla 5 päivän liukuva keskiarvo.



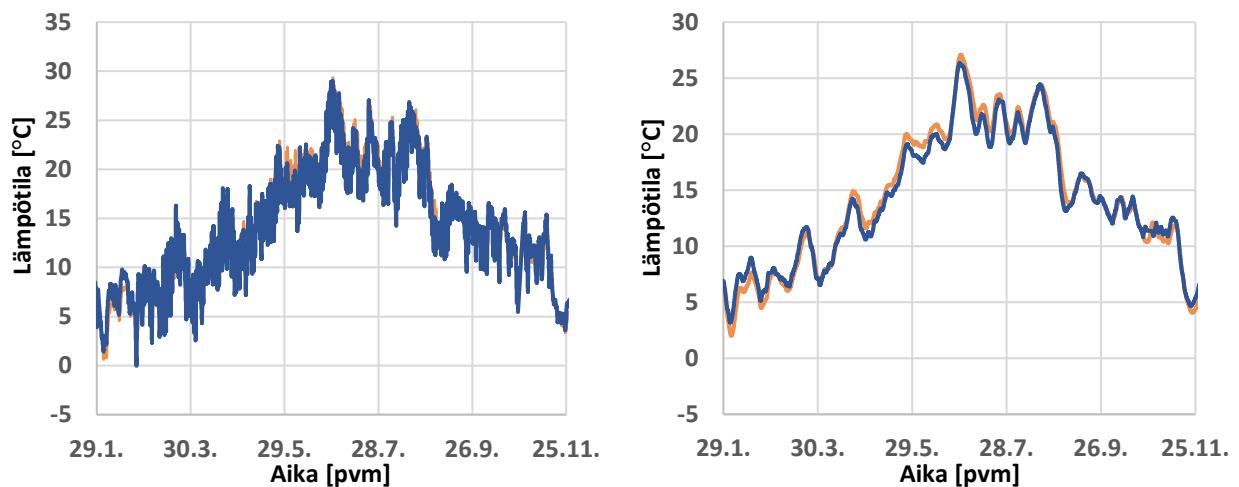
Kuva 7. Suhteellinen kosteus rakenteen YP2.1 puhalluseristeen puolivälissä. Sininen: Mitattu, Oranssi: Laskennallinen. Vasemmalla tunnitaiset arvot, oikealla 5 päivän liukuva keskiarvo.



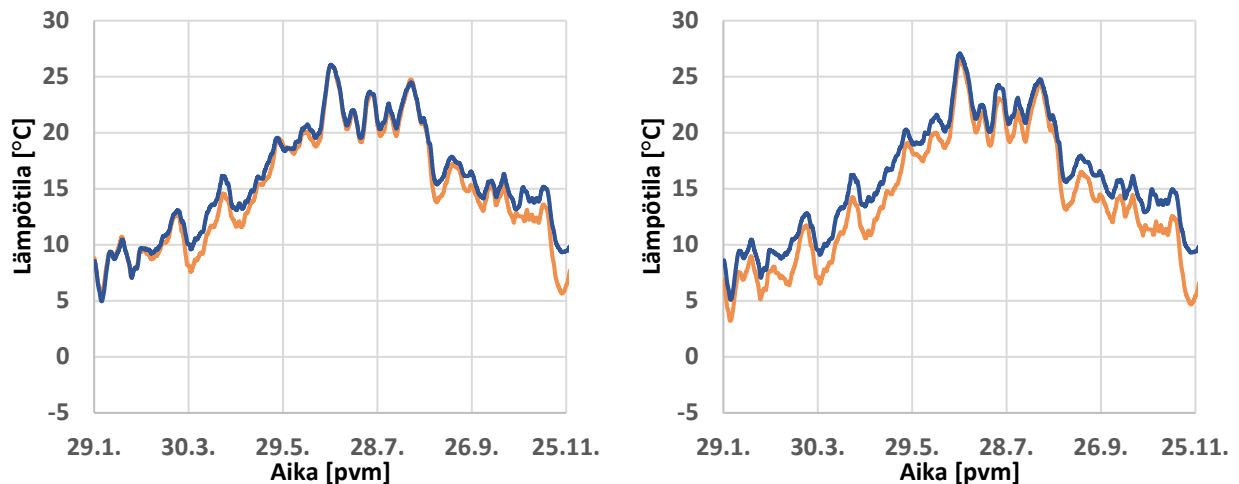
Kuva 9. Mitattujen suhteellisten kosteuksien vertailu (5 päivän liukuva keskiarvo) puhalluseristeiden puolivälissä. Sininen: Kivivilla, Oranssi: Puukuitueriste. Vasemmalla XPS-aluskatteella varustetuista koerakenteista (YP1.1 ja YP2.1), oikealla kalvoaluskatteella varustetuista koerakenteista (YP1.2 ja YP2.2).

Kuvassa 9 on esitetty vertailu puhalluseristekerrosten sisältä mitatuista suhteellisista kosteuksista. Kuvasta nähdään, että molemmilla eristemateriaaleilla suhteellinen kosteus eristeen sisällä käyttäytyy hyvin samalla tavalla aluskatemateriaalista riippumatta. Sekä mitatut että lasketut suhteelliset kosteudet eristeiden sisällä pysyivät selvästi alle 80 % RH tason, jolloin homeen kasvu ei ole mahdollista. Myöskään tuuletustiloissa ei käytännössä esiintynyt homeen kasvulle otollisia olosuhteita. Vaikka suhteellinen kosteus käy talvisin korkealla tuuletustiloissa, kylmä lämpötila estää homeen kasvua.

Kuvassa 10 on esitetty mitatut ja lasketut lämpötilat kalvoaluskatteella varustetun puukuitueristeisen koerakenteen puhalluseristekerroksen puolesta välistä (YP2.2). Laskennan ja mittausten keskinäinen vastaavuus kaikilla tarkastelluilla rakenteilla oli vastaavalla tasolla eli hyvä eristeen sisällä.



Kuva 10. Lämpötila rakenteen YP2.2 puhalluseristeen puolivälissä. Sininen: Mitattu, Oranssi: Laskennallinen. Vasemmalla tunnittaiset arvot, oikealla 5 päivän liukuva keskiarvo.



Kuva 11. Mitattujen lämpötilojen vertailu (5 päivän liukuva keskiarvo) puhalluseristeiden puolivälissä. Sininen: Kivivilla, Oranssi: Puukuitueriste. Vasemmalla XPS-aluskatteella varustetuista koerakenteista (YP1.1 ja YP2.1), oikealla kalvoaluskatteella varustetuista koerakenteista (YP1.2 ja YP2.2).

Kuvassa 11 on esitetty vertailu pelkästään mittaustuloksista lämpötilojen osalta kaikkien koerakenteiden puhalluseristekerrosten puolivälissä. Kuvasta nähdään, että puukuitueristeessä lämpötilat ovat sekä XPS-aluskatteella että kalvoaluskatteella lähes jatkuvasti hiukan alhaisempia

kuin kivivillassa. Erot johtuvat osittain eristemateriaalien lämmönjohtavuuksien eroista, mutta koska kyseessä on jatkuvasti ajan suhteen muuttuva tilanne lämpötilojen ja kosteuspitoisuuksien osalta niin pelkistä lämpötilamittauksista ei voida tehdä selkeitä johtopäätöksiä liittyen eri koerakenteiden energiatehokkuuteen.

5. Yhteenveto

Rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen mallintamiseen liittyy aina lukuisia virhelähteitä, joiden vaikutusten suuruusluokkaa mallinnuksen tarkkuuteen on vaikea arvioida. Tuulettuva yläpohjarakenne on lämpö- ja kosteusteknisesti lukuisten rakenteen mittoihin, materiaaleihin ja ilman virtaukseen liittyvien yksityiskohtien muodostama monimutkainen kokonaisuus, jonka laskennallisessa mallintamisessa ei voida ottaa tarkasti huomioon kaikkia tiedettyjä tekijöitä. Tässä tutkimuksessa tehtiin yläpohjakoerakenteisiin liittyviä rakennusfysikaalisia vertailusimulointeja malleilla, joissa tuuletustilan ilma oletettiin täysin sekoittuneeksi ja johon kytkeytyvät lämmöneristekerrokset ja vesikaton osat mallinnettiin yksiulotteisina. Näistä yksinkertaistuksista sekä muista lähtötietojen epätarkkuuksista huolimatta laskentatulosten vastaavuus lämpö- ja kosteusteknisiin mittauksiin nähden oli keskimäärin hyvällä tasolla. Laskentatulokset suhteellisen kosteuden osalta eri tarkastelupisteissä olivat lähes jatkuvasti hiukan korkeampia mittauksiin verrattuna, jonka perusteella laskennan voidaan ajatella olevan kuitenkin varmalla puolella vastaavissa kosteusteknisissä tarkasteluissa.

Tuuletustilojen ilmanvaihtuvuutena käytettiin laskennassa vakioarvoa 5 l/h, jolla saatiin paras vastaavuus laskenta- ja mittaustulosten välillä. Vaihtuvuuden arvo vastaa suuruusluokaltaan käsitystä tuuletettujen yläpohjien todellisesta ilmanvaihtuvuudesta, joka on kuitenkin vaihtelevista tuuliolosuhteista riippuvaa. Rakenteiden puisten ristikko-osien hygroskooppinen kosteuskapasiteetti saattaa vaimentaa jonkin verran tuuletustilan suhteellisen kosteuden vaihtelua päivätasolla, jonka huomioon ottaminen laskennassa edellyttäisi raskaampia laskentamalleja. Ilmanvaihdosta aiheutuvat konvektiiviset lämpö- ja kosteusvirrat ovat selvästi tuuletustilojen olosuhteiden kannalta merkittävimpiä tekijöitä. Lämpöä eristävän aluskatteen vaikutukset olosuhteisiin olivat mittausten ja laskentatulosten mukaan talvisin pieniä. Kesäisin lämpöä eristävä aluskate vähentää jonkin verran tuuletustilan lämpötilan nousua. Lämpöä eristävän aluskatteen vaikutuksista tarvitaan kuitenkin lisää tutkimusta rakenteilla, joissa ilmanvaihtuvuutta tuuletustiloissa pyritään rajoittamaan, jolloin sillä voi olla suurempi vaikutus.

Lähdeluettelo

- [1] FutureSpaces-hankkeen internet-sivut: <https://www.futurespace.fi/> (Viitattu 25.9.2023)
- [2] Comsol Multiphysics Documentation: <https://doc.comsol.com/6.1/docserver/> (Viitattu 25.9.2023)
- [3] WUFI-laskentaohjelman internet-sivut: <https://wufi.de/en/> (Viitattu 25.9.2023)
- [4] Dinwoodie, J. M. (2000). Timber: Its Nature and Behavior. Second Edition. E & Fn Spon.

Sisälämpötilan laskun vaikutus homeriskiin puurunkoisten pientalojen yläpohjarakenteissa

Eero Saleva ja Iina Maso
AFRY Rakennusfysiikka

Tiivistelmä

Tässä artikkelissa esitellään kokeellisia ja laskennallisia tuloksia puurunkoisten pientalojen yksittäisten tilojen lämpötilan laskuun liittyvän yläpohjarakenteen homeriskin tutkimuksesta. Artikkelin perustuu Eero Salevan vuoden 2023 diplomityöhön ja sisältää tätä täydentäviä lisätarkasteluja. Tutkimuksen laskennallisen mallinnuksen pohjana käytettiin koekohteissa tehtyjä mittauksia ja havaintoja. Olosuhdemittausten perusteella kosteuslisä tiloissa, joiden käyttöä on rajoitettu, on $0,5 \text{ g/m}^3$ pienempi kuin normaalikäytössä olevissa tiloissa. Tilojen kosteuslisä alitti KL3 kosteusluokan arvon. Laskennallisessa mallinnuksessa havaittiin, että talvikaudella tehokas yläpohjatilan ilman vaihtuvuus nosti yläpohjan suhteellista kosteutta, mutta kevätkaudella se laski sitä. Tutkimuksessa tehtiin pitkäaikaistarkasteluja suomalaisella homemallilla. Sisätilojen sisäpinnan homeindeksin muodostumista tarkasteltiin viiden vuoden aikavälillä kosteusluokkien KL2 ja KL3 kosteuslisillä. Lisäksi tarkasteltiin kylmäsiltojen vaikutusta sisäpinnan homeindeksiin. Tarkastelujen perusteella homeindeksi ei ylitä arvoa 1, jossa homerihmasto on havaittavissa mikroskoopilla, kun sisälämpötila on KL3 kosteusluokassa vähintään $15,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ja KL2 kosteusluokassa $18 \text{ }^\circ\text{C}$.

1. Johdanto

Vuonna 2022 Venäjä aloitti hyökkäyssodan Ukrainaan, jonka vastatoimena Venäjälle asetetut talouspakotteet ovat vaikuttaneet laajasti koko Euroopan energiamarkkinoihin. Ostoenergian hinta on noussut huomattavasti, mikä on aiheuttanut paineita energiankulutuksen vähentämiselle erityisesti pientaloissa asuville. Yhdeksi tehokkaaksi energiansäästötoimeksi on osoittautunut sisälämpötilojen laskeminen. Asuinrakennuksen sisälämpötilojen laskuun liittyy kuitenkin kasvanut homeutumisen riski lämpötilan laskun aiheuttaman ilman suhteellisen kosteuden muutoksen sekä kasvavan kondensoitumisriskin takia. Lämpötilan laskemisen vaikutusten arvioimiseksi Ympäristöministeriö julkaisi vuoden 2023 tammikuussa selvityksen lämpötilan laskun vaikutuksesta rakenteiden homeriskiin tyypillisten pientalojen ulkoseinä- ja yläpohjarakenteissa [1]. Selvitys perustui laskennalliseen mallintamiseen. Selvityksessä havaittiin, että sisätilojen kosteustuotolla on sisälämpötilaa merkittävämpi vaikutus ulkoseinä- ja yläpohjarakenteiden homeriskille.

Tämä artikkeli perustuu Eero Salevan diplomityön tutkimuksiin ja tuloksiin [2]. Työn tutkimusten tavoitteena oli tutkia kosteuslisää rakennuksissa, joiden yksittäisten huoneiden lämpötilaa lasketaan ja käyttöä rajoitetaan, sekä selvittää miten tällaisten tilojen kosteuslisä eroaa normaaliolosuhteissa olevista tiloista. Tutkimuksia varten kerättiin olosuhdemittausdataa koekohteista, joiden pohjalta kosteuslisä laskettiin. Mittauksen tulokset toimivat pohjana homeriskin laskentaa varten kehitetylle laskentamallille. Diplomityön tuloksia on täydennetty erillisellä kylmäsilta-vaikutuksen lisätarkastelulla. Tutkimuksen tuloksia voidaan hyödyntää puurakenteisten pientalojen lämpötilan laskemisen riskien arvioinnissa sekä laskemiseen liittyvässä päätöksenteossa.

2. Tutkimusmenetelmät

Tutkimuksia varten kerättiin olosuhdeseurantadataa kuudesta puurunkoisesta pientalorakennuksesta neljän kuukauden ajalta Etelä-Suomessa talven 2022–2023 lämmityskauden aikana. Mittaukset kohdistettiin normaalissa käytössä ja olosuhteissa olevaan tilaan, käytöltään rajoitettuun ja lämpötilaltaan madallettuun tilaan, tuulettuvaan yläpohjatilaan sekä ulkoilmaan. Mittauksessa käytettiin jatkuvatoimista Testo 174H -mittalaite-tiedonkerääjäyhdistelmää. Mittaustulosten pohjalta laskettiin tilojen kosteuslisä.

Olosuhdeseurannan mittaustuloksia käytettiin reunaehtoina pitkäaikaistarkastelun laskentamallin muodostamisessa. Laskentamalli muodostettiin WUFI Pro 6.6 -ohjelmassa, joka on yksiulotteinen FVM (Finite Volume Method) -kontrollitilavuusmenetelmään perustuva laskentaohjelma. Pitkäaikaistarkastelun laskennassa käytettiin ulkoilman olosuhteina Jokioinen 2017 nykyilmastoa. Laskentamallin toimivuus varmistettiin vertaamalla laskentatuloksia olosuhdeseurannan mittaustuloksiin.

Pitkäaikaistarkastelun tuloksia tarkasteltiin suomalaisella homemallilla. Suomalainen homemalli huomioi materiaaliominaisuuksien vaikutuksen homeen kasvunopeuteen ja homekasvuston taantumaan. Homemallissa homeindeksi saa arvoja välillä 0–6, joista arvo 0 merkitsee puhdasta pintaa, jossa ei ole homerihmaston kasvua ja arvo 6 erittäin runsasta homerihmaston kasvua, joka peittää lähes 100 % pinnasta [3]. Haitallisen homekasvun toimenpiderajaksi on asumisterveysasetuksen 545/2015 soveltamisohjeessa määritetty rakennuksen sisäpinnoilla tai lämmöneristekerroksessa, joka ei ole yhteydessä ulkoilmaan tai maaperään, näkyvä home tai materiaalinäytteessä todettu mikrobikasvu [4]. Homeindeksin arvo 1 merkitsee homerihmaston alkavaa kasvua, joka on havaittavissa mikroskoopilla. Homerihmaston alkavan kasvun voidaan olettaa olevan todettavissa materiaalinäytteen mikrobianalyysillä, joten homeindeksin arvoa 1 voidaan pitää asumisterveysasetuksen toimenpiderajan ylityksenä, kun tarkastellaan sisäilmaan ilmayhteydessä olevia rakenneosia.

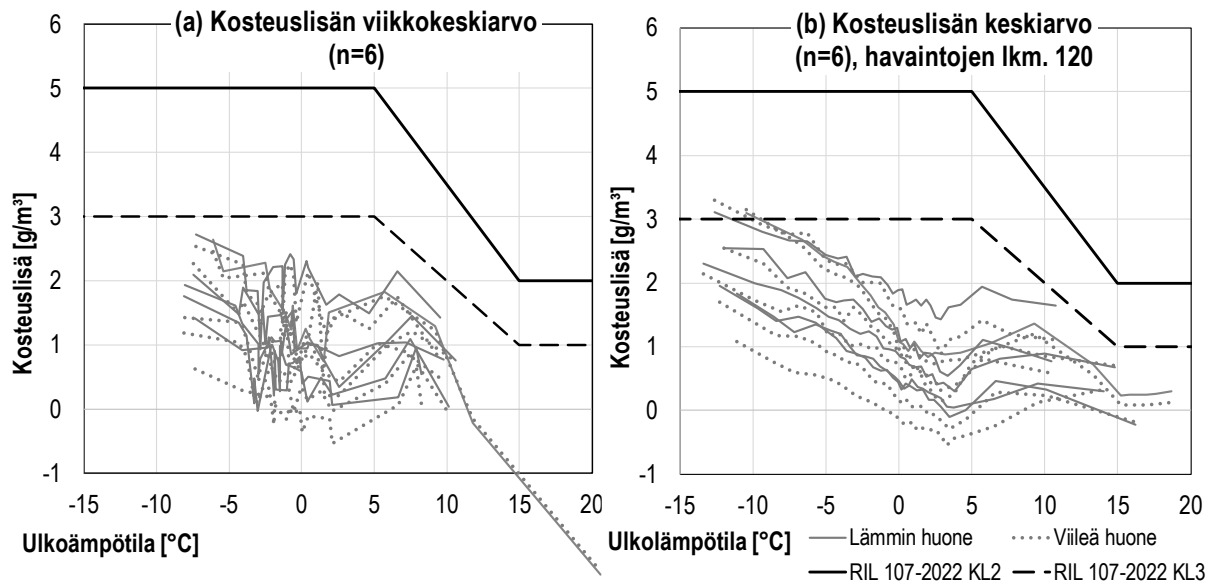
3. Tulokset ja tulosten tarkastelu

3.1 Lämpötilan ja kosteuslisän mittaustulokset

Tutkimuksissa lämpötilaero mittauskohteiden käytössä olevien ja käytöltään rajoitettujen ja lämpötilaltaan madallettujen tilojen välillä oli 1–2 °C. Laskennallisten tulosten perusteella viileämmän, rajoitetussa käytössä olevan tilan kosteuslisä oli noin 0,5 g/m³ alhaisempi kuin tilan, jonka lämpötila pidettiin tyypillisellä tasolla ja jonka käyttö pysyi normaalina. Kosteuslisä pysyi mittauksissa alhaisempana, jos tilan ovi pidettiin kiinni. Tulokset osoittavat, että rajoitetulla käytöllä olevien huonetilojen kosteustuotto on vähäisempää kuin normaalikäytössä olevien tilojen, ja kyseisten tilojen kosteustuottoa arvioitaessa voidaan soveltaa 0,5 g/m³ alhaisempaa kosteuslisän arvoa.

Mittaus- ja laskentatulosten perusteella koekohteiden kosteuslisä oli merkittävästi pienempi kuin niiden käyttötarkoituksen mukainen RIL 107-2022 -kosteusluokan KL2 mitoitusarvo $\Delta v = 2\text{--}5 \text{ g/m}^3$ [5] ja pienempi kuin kosteusluokan KL3 mitoitusarvo $\Delta v = 1\text{--}3 \text{ g/m}^3$. Alhainen kosteuslisä johtui todennäköisesti siitä, että koekohteiden ilmanvaihto oli toteutettu koneellisesti ja ilmanvaihto oli niissä riittävää. Mitatun kosteuslisän viikkokeskiarvot sekä 120 havainnon keskiarvot ovat esitetty kuvassa 1 ulkolämpötilan funktiona. Kuvan 1 perusteella kosteuslisän riippuvuus ulkolämpötilasta näyttäisi tulevan selkeämmin esille, kun havainnot järjestetään ensin ulkolämpötilan mukaan. Toisaalta RIL 107-2022 kosteuslisän mitoituskäyrästä perustuvat

Vinhan ym. [6] viikkokeskiarvoina esitettiin kosteuslisän mittaustuloksiin, minkä takia laskennallisissa pitkäaikaistarkasteluissa käytettävän RIL 107-2022 kosteusluokan valinta tehtiin viikkokeskiarvojen pohjalta.



Kuva 1. Kosteuslisän viikkokeskiarvot. Kukin viiva kuvaa yhden koekohteen mittaustuloksia.

Tulosten perusteella RIL 107-2022 kosteusluokan KL3 kosteuslisää voidaan siis käyttää pientalojen tarkastelussa, joiden ilmanvaihto on toteutettu koneellisesti ja joissa ei havaita viitteitä korkeasta kosteuslisästä. Muissa tapauksissa on suositeltavaa noudattaa RIL 107-2022 -ohjeessa esitettyä rakennusten jaottelua eri kosteusluokkiin. Kosteusluokkaa KL3 sovellettiin laskennallisten pitkäaikaistarkastelujen reunaehtojen muodostamisessa.

3.2 Pitkäaikaistarkastelun laskentamallin herkkyytstarkastelu

Laskentamallin herkkyytstarkastelussa yläpohjatilasta mitattuja lämpö- ja kosteusolosuhteita verrattiin eri ilmanvaihtoluvuilla mallinnettuihin olosuhteisiin. Herkkyytstarkasteluiden perusteella ilmanvaihtoluvut 10–20 1/h vastasivat parhaiten koekohteiden olosuhdeseurannan mittaustuloksia.

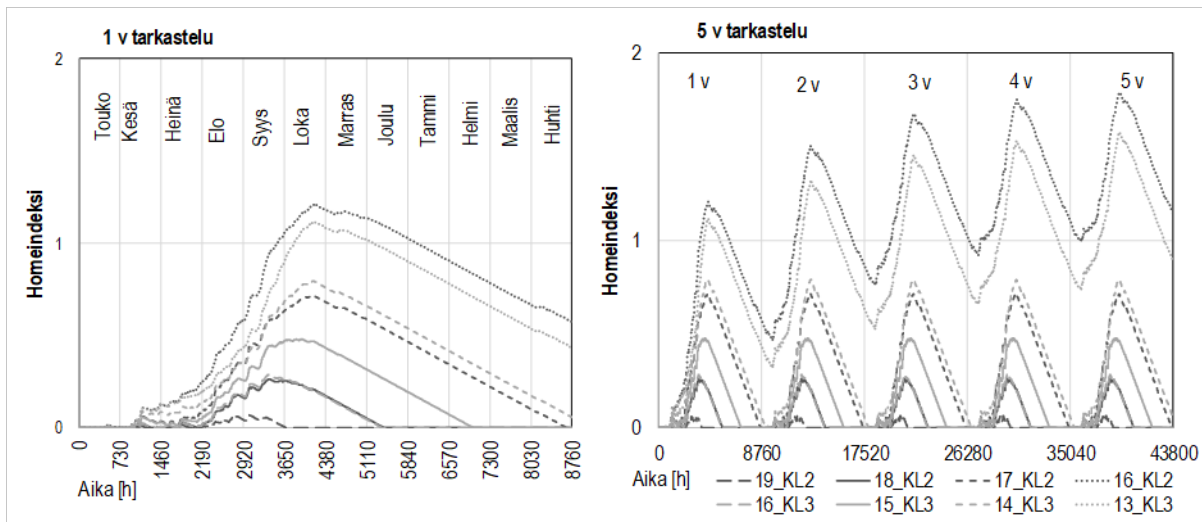
Herkkyytstarkastelun ohessa havaittiin, että tuulettuvan yläpohjatilan suhteellinen kosteus vaihteli talvikaudella ilmanvaihtolukuun verrattuna siten, että ilmanvaihdon ollessa vähäisintä, 1 1/h, suhteellinen kosteus oli myös matalimmillaan. Samankaltaisia tutkimustuloksia ovat saaneet myös Viljanen ym. [7], Sekki ym. [8] ja Vinha ym. [9]. Aiemmistä tutkimuksista poiketen tämän tutkimuksen mittaustulosten ilmatiiveys vaihteli hyvästä $q_{50}=1 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ huonoon $q_{50}=8 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$, mutta ilmatiiveyden tasosta huolimatta, yläpohjan suhteellinen kosteus pysyi matalimpana pienimmällä ilmanvaihtoluvulla. WUFI:lla tehdyssä tarkastelussa ilmanvaihtoluvun vaikutus tuulettuvan yläpohjatilan lämpötilaan oli merkityksetön, joten suhteellisen kosteuden vaihtelun voidaan katsoa johtuneen pelkästään ulkoilman kosteuden kulkeutumisesta. Tulosten perusteella yläpohjan suuri ilmanvaihtuvuus vaikutti siis ennemminkin kerryttävän kosteutta rakenneosaan talvikaudella sen yleisesti ajatellun kuivattavan vaikutuksen sijasta, johon on voinut kuitenkin vaikuttaa tarkastellun talven sateisuus. Herkkyytstarkastelussa havaittiin, että kevätkaudella vaikutus oli päinvastainen, kun yläpohjan puumateriaali luovutti tilaan kosteutta, ja

hyvä ilmanvaihto tälle ajankohdalle oli edelleen kosteusteknisen toimivuuden kannalta toivotumpaa.

3.3 Pitkäaikaistarkastelu suomalaisella homemallilla

Pitkäaikaistarkastelun laskentatuloksia tarkasteltiin suomalaisella homemallilla kolmessa kohdassa yläpohjarakenteessa: sisätilan sisäpinnassa, höyrynsulun sisäpuolisessa rakennekerroksessa ja tuulettuvassa yläpohjatilassa. Tarkastelussa sisäpinnan homeindeksi muodostui määrääväksi kaikkien koekohteiden osalta. Tarkastelussa ei havaittu merkittäviä eroja sisäpinnan homeindeksissä tutkimuksen eri kohteiden välillä, vaikka niiden rakenneratkaisut ja -materiaalit poikkesivat toisistaan. Sisälämpötilojen vähentämiseen liittyvää homeriskiä voidaan siis arvioida koko yläpohjarakenteen kannalta pelkän sisäpinnan homeriskin perusteella. Tulosten perusteella viileänä pidettävien huoneiden $0,5 \text{ g/m}^3$ lämpimiä huoneita pienempi kosteuslisä on homeriskin ehkäisyn kannalta edullinen. Tulosten perusteella viileänä pidettävien huoneiden ei voida kuitenkaan katsoa kuuluvan muita asuinhuoneita matalamman kosteuslisän kosteusluokkaan ja homeriskitarkastelussa suositellaan käyttämään samaa kosteuslisän mitoitusarvoa kuin kiinteistön muissa asuinhuoneissa.

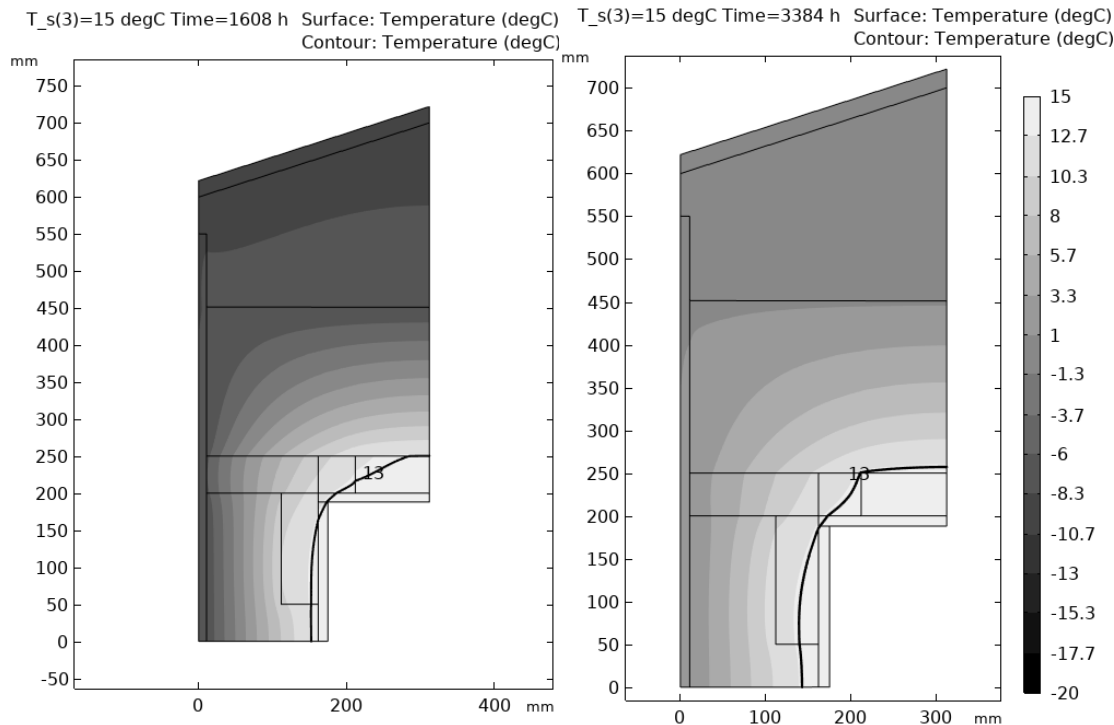
Sisäpinnan homeindeksin muodostumista tarkasteltiin lisäksi viiden vuoden aikavälillä RIL 107-2022 kosteusluokkien KL2 ja KL3 kosteuslisillä. Tarkastelu tehtiin yhden asteen välein $19 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilasta lähtien, kunnes homeindeksi ylitti arvon yksi. Tarkastelun perusteella kosteusluokassa KL2 homeindeksin arvo yksi ylittyy $16 \text{ }^\circ\text{C}$ sisälämpötilassa ja kosteusluokassa KL3 arvo ylittyy $13 \text{ }^\circ\text{C}$ sisälämpötilassa. Vertailun perusteella homeindeksin suhteellinen kasvu on suurempaa lämpötilaa laskettaessa, kun kosteuslisä on korkeampi. Tulosten perusteella turvallisen sisälämpötilan minimiarvo kosteusluokassa KL2 on $17 \text{ }^\circ\text{C}$ ja kosteusluokassa KL3 se on $14 \text{ }^\circ\text{C}$. Lisäksi on huomionarvoista, että homeindeksin jyrkin kasvu ajoittuu syksyn kosteaan ajanjaksoon, jonka jälkeen homeindeksin taso alkaa laskemaan kaikilla tutkituilla sisälämpötiloilla ja kosteuslisillä.



Kuva 2. Kosteuslisän vaikutus homeindeksiin verrattuna tyypillisessä 1990-luvun rivitalon puurakenteisessa yläpohjarakenteessa. Käyrien KL2 ja KL3 edellä esitetyt arvot tarkoittavat laskennassa käytettyä sisälämpötilaa ($19_KL2 = 19 \text{ }^\circ\text{C}$ sisälämpötila KL2 kosteuslisällä).

Tulosten tarkastelussa on huomioitava, että pitkäaikaistarkastelut edustavat tilannetta yläpohjarakenteiden kohdassa, jossa lämmöneristekerros on jatkuva. Ympäristöministeriön vuonna 2023 julkaistun tutkimuksen perusteella rakenteiden kylmäsilta-kohtat ja sisäpuolinen

eristävä materiaali, kuten kiintokalusteet ja ryijyt, ovat sisäpinnan homeriskiä kasvattavia tekijöitä [1]. Homeindeksi voi siis nousta esimerkiksi yläpohjaliittymän muodostamassa kylmäsilta kohdassa tutkittua korkeammaksi. Kuvassa 3 on esitetty Comsol 2D mallinnus yläpohjaliittymän yläohjauspuun kylmäsilta vaikutuksesta rakenteen lämpötilajakaumaan. Kuvan 3 perusteella kylmäsilta laskee rakenteen pintalämpötilaa paikallisesti 1–2 °C riippuen rakenteen ylitse vallitsevasta lämpötilaerosta. Mallinnuksen tuloksia tarkasteltiin nurkkapisteestä osalta suomalaisessa homemallissa. Tarkastelun perusteella jatkuvan eristekerroksen kohdalta määritettyä turvallisen sisälämpötilan minimiarvoa RIL 107-2022 kosteusluokassa KL3 tulee korottaa 1,5 °C, jotta homeindeksi ei ylitä nurkkapisteesä arvoa 1. Vastaavasti RIL 107-2022 kosteusluokassa KL2 tarvittava korotuksen suuruus on 1 °C.



Kuva 3. Yläpohjaliittymän yläohjauspuun kylmäsilta vaikutus sisäpinnan lämpötilaan. Kuvassa on korostettu 13 °C tasa-arvokäyrä.

Turvallinen sisälämpötila tulee aina arvioida kokonaisuus huomioiden ja tässä artikkelissa esitettyjen seikkojen ohella voi olla myös muita homeriskiä lisääviä tekijöitä. Raja-arvoja tulee siis pitää viitteellisinä. Jos sisälämpötilaa aiotaan laskea lähelle tutkimuksessa määritettyjä minimiarvoja, tulee erityisesti rakenteiden kylmäsilta kohtia seurata. Yleisestikin kosteuden kondensoitumista tulee pitää merkinä liian alhaisesta sisälämpötilasta, jolloin sisälämpötila tulee nostaa ja kastuneet pinnat kuivata. Lisäksi on huomioitava, että tämän tutkimuksen tulokset edustavat tilannetta pelkästään yläpohjarakenteiden osalta ja todellisessa käyttötilanteessa sisälämpötilan lasku voi aiheuttaa riskejä myös muissa rakennuksen vaipan osissa.

4. Yhteenveto

Tutkimuksessa havainnoitiin sisälämpötilan laskun vaikutusta homeriskiä puurunkoisten pientalojen yläpohjarakenteissa koekohteissa suoritettavilla mittauksilla ja laskennallisella mallintamisella. Tutkimuksessa tehtiin olosuhdeseurantamittauksia puurakenteisissa pientaloissa, joiden perusteella selvitettiin kosteuslisä tiloissa, joiden lämpötilaa on laskettu ja käyttöä rajoitettu. Kosteuslisä tällaisissa tiloissa oli 0,5 g/m³ pienempi kuin normaalikäytössä ja -

olosuhteissa olevissa tiloissa.

Tutkimuksessa muodostettiin pitkäaikaistarkastelua varten laskentamalleja, jotka muodostettiin koekohteista kerättyjen lähtötietojen ja kokeellisten mittausten tulosten perusteella.

Laskentamallien herkkyystarkasteluissa yläpohjan 10–20 l/h ilmanvaihtoluku vastasi parhaiten olosuhdeseurannan mittaustuloksia. Herkkyystarkastelussa havaittiin yläpohjan suhteellisen kosteuden nousevan ilmanvaihtoluvun noustessa talvikaudella, jolloin vähempi ilmanvaihtuvuus on toivotumpaa yläpohjan kosteusteknisen toimivuuden kannalta.

Pitkäaikaistarkastelulla tutkittiin yläpohjarakenteiden homeindeksiä sisäpinnassa, höyrönsulun sisäpuolisessa rakennekerroksessa ja yläpohjarakenteen tuuletusvälissä. Tulosten perusteella yläpohjan sisäpinta muodostuu rakenteessa homeriskin perusteella määrääväksi ja pitkäaikaistarkastelu voidaan kohdistaa pelkästään tähän pisteeseen. Pitkäaikaistarkastelujen tuloksia täydennettiin yläpohjaliittymän yläohjauspuusta muodostuvan kylmäsilan 2D tarkastelulla, jonka perusteella jatkuvan eristekerroksen kohdalta määritettyjä sisälämpötilan minimiarvoja korotettiin. Tulosten perusteella 15,5 °C sisälämpötilassa homeindeksi ei ylittänyt arvoa yksi RIL 107-2022 KL3 kosteuslisällä, joka vastasi koekohteiden kosteuslisän mittaustuloksia. Vastaavasti korkeammalla RIL 107-2022 KL2 kosteuslisällä sisälämpötilaa voidaan laskea 18 °C:n.

Lähdeluettelo

- [1] Ympäristöministeriö. 2023. Selvitys sisälämpötilan laskun vaikutuksesta rakenteiden homeutumiseen. Helsinki, Ympäristöministeriö.
- [2] Saleva, E. 2023. Sisälämpötilan laskun vaikutus homeriskisiin puurunkoisten pientalojen yläpohjarakenteissa. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Espoo. 97 s.
- [3] Vinha, J., Viitanen, H., Peuhkuri, R., Lähdesmäki, K., Ojanen, T. ja Salminen, K. 2013. VTT–TTY homemallin toimintaperiaatteet ja käyttö rakenteiden kosteusteknisen toiminnan tarkasteluissa. Rakennusfysiikka 2013, s. 67-76. Tampere, Rakennusfysiikka 2013.
- [4] Valvira. 2016. Asumisterveysasetuksen soveltamisohje osa IV. Helsinki, Valvira.
- [5] RIL 107-2022. 2022. Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet. Helsinki, RIL ry.
- [6] Vinha, J., Korpi, M., Kalamees, T., Eskola, L., Palonen, J., Kurnitski, J., . . . Jokisalo, J. 2005. Puurunkoisten pientalojen kosteus- ja lämpöolosuhteet, ilmanvaihto ja ilmatiiviys. Tutkimusraportti 131. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere
- [7] Viljanen, K., Xiaoshu, L. ja Puttonen, J. 2021. Factors affecting the performance of ventilation cavities in highly insulated assemblies. Journal of Building Physics, s. 67-110. doi: <https://doi.org/10.1177/1744259121995221>
- [8] Sekki, P., Saleva, E. ja Laamanen, P. 2023. Study of ventilated low-slope and large span wooden element roofs in the current and future climate. Aalborg, Nordic Building Physics Symposium.
- [9] Vinha, J., Laukkarinen, A., Mäkitalo, M., Nurmi, S., Huttunen, P., Pakkanen, T., Kero, P., Manelius, E., Lahdensivu, J., Köliö, A., Lähdesmäki, K., Piironen, J., Kuhno, V., Pirinen, M., Aaltonen, A., Suonketo, J., Jokisalo, J., Teriö, O., Koskenvesa, A., ja Palolahti, T. 2013. Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristykseen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tutkimusraportti 159. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere. 405 s.

Hyvin alaspäin kuivuva maanvastainen kantava teräsbetonilaatta

Jani Kallio¹ ja Sami Niemi²

¹ Konsulttitoimisto Kolona Oy

² AFRY Rakennusfysiikka

Tiivistelmä

Betonin riittävää kuivumisaikaa ei aina ymmärretä tai osata arvioida niin, että kuivumiselle saadaan järkevin toimenpitein riittävästi aikaa. Liian kostean betonin päälle tehty lattia aiheuttaa joskus ongelmia, joiden korjaus jälkeensä voi olla kallista. Pelkkä korjaustyö ei itsessään ole välttämättä kallista, mutta kun huomioidaan mahdollisen vaurion aiheuttamat muut seuraukset ja kustannukset, voivat kokonaiskustannukset – ja vaikutukset olla jo huomattavan suuria. Artikkelissa esitellään esimerkkikohteen avulla normaalisti yhteen suuntaan kuivuvan alapohjan betonilaatan kuivumista, kun se muutettiin hyvin alaspäin kuivuvaksi. Kuivumista seurattiin betonilaatasta tehtävin rakennekosteusmittauksin. Lopputuloksena 180 mm vahvuinen betonilaatta saatiin kuivumaan tasoon RH 81 % kymmenessä viikossa, kun normaali kuivumisaika on laskennallisesti hyvissä olosuhteissa noin 18 viikkoa.

1. Johdanto

Rakentamisessa aikataulut ovat hyvin tärkeitä työn jaksottamista ja koko projektin tehokasta toteuttamista ajatellen. Työmaiden aikataulut ovat kuitenkin laadittu usein liian tiukoiksi, etenkin kun työmaille ei välttämättä pystytä ylläpitämään tehokkaan kuivumisen mahdollistavia olosuhteita, jonka vuoksi kuivumisaika-arviot ovat hyvin suuntaa antavia, koska niissä ei useinkaan huomioida työmaiden oikeita olosuhteita. Kuivumisaika-arvioita on tehty esimerkiksi Betoniyhdistyksen Excel-pohjaisella työkalulla sekä Betoniyhdistyksen vuonna 2020 julkaistulla by 2020 Betonin kuivumisaika-arvio -ohjelmalla. Edelleenkin työmailla kuulee toisinaan kuivumisajoista keskusteltaessa esitettävän arvion ”sentti per viikko”, joka ei millään tasolla pidä paikkaansa, etenkin kun puhutaan paksummista betonivaluista. Rakentamisessa yritetään parantaa tuottavuutta, missä pyritään lyhentämään rakentamisaikoja esimerkiksi tahtituotannolla.

Vesi on olennainen osa betonin valmistusta, vesi notkeuttaa betonia sekä käynnistää hydrataation, eli reaktion, jossa sementti reagoi veden kanssa ja alkaa kovettua. Vain osa betonin valmistuksen käytetystä vedestä sitoutuu kemiallisesti hydrataatiossa, osa vedestä sitoutuu fysikaalisesti betonin huokosrakenteeseen ja osa on vesihöyryn muodossa betonin huokosilmassa. Betoniin fysikaalisesti sitoutunut vesi on haihtumiskykyistä vettä. Betonin lämpötila ja huokosrakenteessa oleva vesihöyry muodostavat betonin suhteellisen kosteuden. Betonin suhteellisen kosteuden mittaussessa mitataan siis ainoastaan huokosilmassa olevaa kosteutta [1]. Betoni on huokoinen ja hygroskooppinen materiaali, joten se voi imeä itseensä vettä nestemäisessä muodossa, kun se on kosketuksissa vapaaseen veteen tai vastaavasti sitoa tai luovuttaa kosteutta vesihöyryn muodossa, kosteuden liikkumissuunta riippuu betonirakennetta ympäröivistä olosuhteista. Betonin muita kosteuslähteitä ovat rakennusaikainen kastuminen esimerkiksi puutteellisista sääsuojauksista tai vesivahingosta johtuen [1].

Betonivalun jälkeen betonin suhteellinen kosteus on 100 %, jolloin vettä siirtyy suuria määriä kapillaarisesti ja kuivuminen on nopeaa. Kun betonin pinta kuivuu, hidastuu myös kuivuminen, koska siirtymistapa muuttuu kapillaarisesta diffuusioksi, eli vesi liikkuu vesihöyryn muodossa. Mitä kuivempaa betoni on, sitä hitaampaa on myös sen kuivuminen. Vakio-olosuhteissa betoni

pyrkii saavuttamaan tasapainotilan ympäröivän ilman kanssa, eli betoni kuivuu niin kauan, kunnes sen kosteuspitoisuus on sama kuin ympäröivällä ilmalla tai rakenteella [1]. Vaikka betonirakenteen ympärillä suhteellinen kosteus olisikin korkeampi kuin itse betonissa, voi kosteusvirta olla edelleen betonista pois päin, mikäli niiden välillä on lämpötilaero. Absoluuttinen kosteus määrittää kosteusvirran kulkusuunnan. [2]

Betonin alhainen vesi-sideainesuhde tekee betonista yleensä tiiviimpää, jolloin myös sen kosteudensiirtokyky hidastuu. Esimerkiksi kuukauden vanhan betonivalun kastuminen vesivahingon seurauksena pidentää kuivumisaikaa huomattavasti. Betonin lämpötilan nostaminen aiheuttaa huokosiin sitoutuneen veden höyrystymistä huokosilmaan, jolloin huokosilman absoluuttinen kosteus kasvaa ja diffuusiovirtaus voimistuu [1]. Betonin huokosilman kosteuspitoisuus voi nousta hyvinkin korkeaksi, Kylliäisen tutkimusten perusteella kuivan alapohjan betonilaatan huokosilman kosteuspitoisuus oli yli 80 g/m³ rakenteen keskiosilla, kun rakennetta lämmitettiin noin 65 °C:een [3].

Tässä artikkelissa käsiteltävä hyvin alaspäin kuivuva maanvastainen kantava teräsbetonilaatta syntyi työmaan aikataulujen pohjalta. Esimerkkikohteena oli Helsingin Esplanadilla sijaitseva ravintola kappeli, joka peruskorjattiin 11/2021–04/2022. Paviljonkien alapohjat olivat osin kantavia maanvastaisia teräsbetonilaattoja (150 ja 180 mm), jotka uusittiin kokonaisuudessaan. Työmaan edetessä ja edelleen rakenteiden purkuvaiheessa havaittujen yllätysten takia oli selvää, että suunnitellut rakenteet eivät tule kuivumaan pinnoituskuntoon suunnitellussa aikataulussa, jolloin tarvittiin innovatiivista ajattelua. Artikkelissa tarkastellaan uudenlaista rakennetta kuivumisen tehostamiseksi. Tarkastelu suoritettiin kosteusmittauksin ja lisäksi pohdittiin uuden rakenteen kosteusmittausten arviointisyvyyskysymyksiä.

2. Tutkimusmenetelmät ja materiaalit

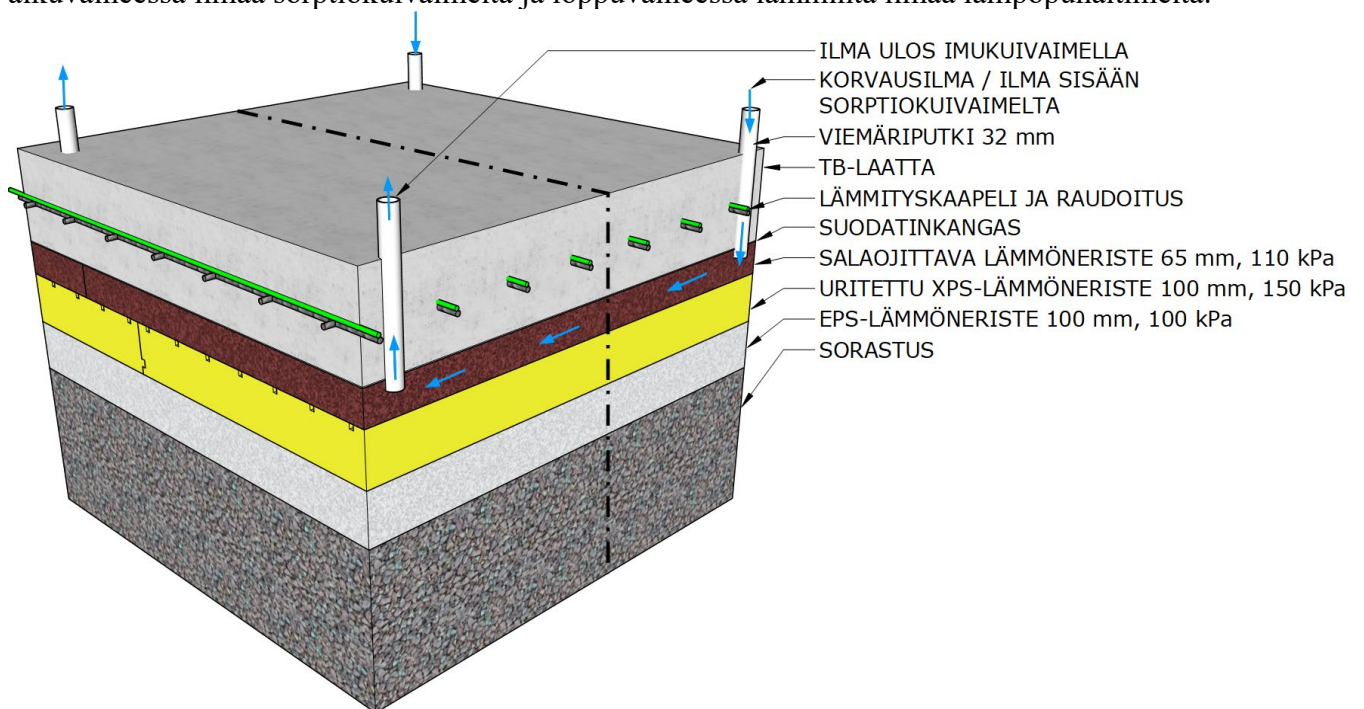
2.1 Tutkittavan rakenteen betoni

Esimerkkikohteessa käytetty betoni oli NK-betonia, jonka vesi-sideainesuhde oli < 0,4. Nopeasti kuivuva (NK) betoni sisältävät huokostinta, jolla betonin sisään saadaan ilmahuokosia, jotka edelleen parantavat betonin kuivumista. Lisäksi NK-betonin lujuuden kehitys on huomattavasti nopeampaa kuin normaalin betonin. Betonin kuivattamisen voi aloittaa lämmittämällä, kun nimellislujudesta on saavutettu noin 75–85 %.

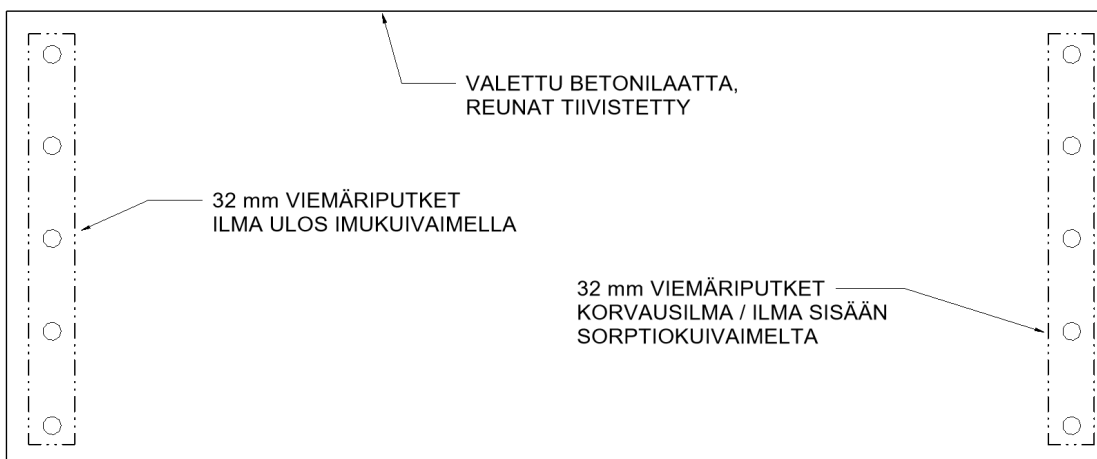
Maanvastaisen betonilaatan kuivumista voidaan tehostaa alipaineistamalla alapuolinen täyttökerros samalla tavalla kuin hallittaessa maaperän radonia. Eniten kuivumiseen vaikuttaa lämmöneristeen vesihöyrynvastus [4]. Esimerkkikohteessa rakenteen kuivumisen tehostamiseksi rakenne muutettiin hyvin alaspäin kuivuvaksi, koska normaalisti maanvastainen betonilaatta ajatellaan kuivuvan vain yhteen suuntaan, eli ylöspäin. Betoniraudoitukseen asennettiin sähköiset lämmityskaapelit, jolloin betonin keskiosiin saatiin lämmönlähde, joka on tehokkain tapa kuivata betonia. Betonirakennetta lämmittäessä betonihuokosten pintaan fysikaalisesti sitoutunut vesi höyrystyy tehokkaasti huokosilmaan, jolloin huokosilman absoluuttinen kosteuspitoisuus kasvaa, joka edelleen tehostaa diffuusiovirtausta [5]. Betonilaatan keskellä sijaitseva lämmönlähde muuttaa normaalia kosteusjakaumaa, jolloin arvostelusyvyyskysymysten kosteusmittaukset eivät pidä täysin paikkaansa.

2.2 Esimerkkirakenne ja mittaussyvytydet

Betonilaatan alle oli alun perin suunniteltu yhteensä 200 mm EPS-eristettä. Alimmainen eristekerros jätettiin suunnitelluksi EPS-eristeeksi, jonka päälle asennettiin uritettu XPS-eriste, joka mahdollistaa ilman kierrättämisen eristekerroksessa. XPS-eristeen päälle asennettiin salaojittava lämmöneriste (Isodrän), joka läpäisee hyvin ilmaa. Salaojittavan lämmöneristeen päälle asennettiin suodatinkangas ennen valua. Työmaanaikaista kuivumista tehostettiin asentamalla raudoitukseen lämmitinkaapeli, jonka teho oli noin 100 W/m², lisäksi raudoitukseen sidottiin pystyyn betonin läpi tulevat kiinni 32 mm viemäriputket, joiden yläpäät teipattiin umpeen ja tiivistettiin suodatinkankaaseen, jotta putkiin tai eristekerrokseen ei valussa pääse betonia. Viemäriputkien päät ulottuivat salaojittavan lämmöneristekerroksen puoleen väliin. Viemäriputkiin asennettiin 2 viikkoa valun jälkeen toiseen päähän putkilinjaa imukuivain, joka imee ilmaa laatan alapuolelta eristetilasta. Imulinjan vastakkaisella puolella putkiin syötettiin alkuvaiheessa ilmaa sorptiokuivaimelta ja loppuvaiheessa lämmintä ilmaa lämpöpuhaltimelta.



Kuva 1. Periaatekuva rakenteesta ja sen kosteusteknisestä toiminnasta. Siniset nuolet kuvaavat ilman liikettä koneellisen kuivauksen aikana.



Kuva 2. Periaatteellinen pohjapiirros putkilinjastojen sijoittamisesta.

2.3 Kosteusmittaukset

Kaikki kosteusmittaukset tehtiin näytepalamenetelmällä RT-kortin 103333 mukaisesti. Lämmityskaapelien sijainnit valokuvattiin ja merkattiin, jotta kaapeleita ei rikottaisi näytepaloja otettaessa, eikä mittauksia tehtäisi suoraan lämmityskaapelien kohdilta. Esimerkkikohteen mittaukset suoritettiin arvostelusyvyyksistä 0,2 ja 0,4 x d, koska laatta ei kuivu luonnollisesti. RT-kortin ”RT 103333, Betonin suhteellisen kosteuden mittaus” mukaisesti arvostelusyvyys (A) on yhteen suuntaan kuivuvassa laatussa 0,4 x d (d = laatan kokonaispaksuus) ja kahteen suuntaan kuivuvassa laatussa 0,2 x d. Pintaosien mittaussyvyudet ovat molemmissa tapauksissa 0,4 x A [6].

Ensimmäinen seurantamittaus tehtiin 2 viikkoa valun jälkeen viikolla 4. Seuraavat kaksi seurantamittauksia tehtiin kahden viikon välein viikoilla 6. ja 8. Viimeinen seurantamittaus tehtiin viikon päästä edellisestä seurantamittauksesta viikolla 9 ja loppumittaus taas viikon päästä viimeisestä seurantamittauksesta viikolla 10.

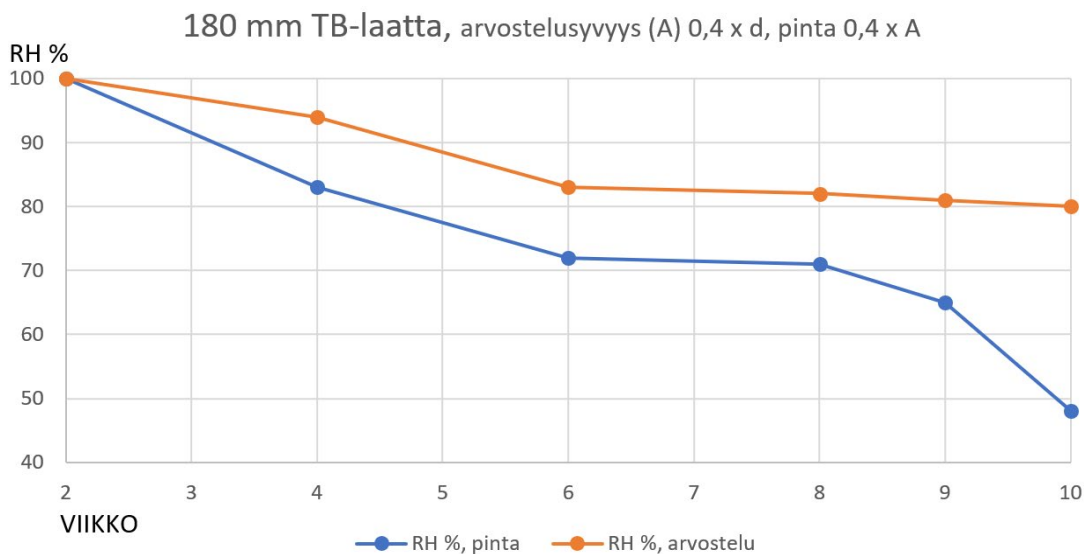
3. Tulokset ja kustannukset

3.1 Mittaustulokset

Tutkittava rakenne saatiin kuivatettua 10 viikossa tasoon RH 77...80 % mittaussyvyiden mukaan.

Arvostelusyvyydellä (0,2*d) lukemat olivat tasoa RH 77 % ja pinnasta tasoa RH 45 %.

Arvostelusyvyydellä (0,4*d) lukemat olivat tasoa RH 81 % ja pinnasta tasoa RH 46 %.



Kuva 3. 180 mm TB-laatan kuivuminen. Rakennekosteusmittaukset 4, 6, 8, 9 ja 10 viikon kohdalla.

Pintaosien lukemat ovat huomattavasti kuivemmat (~ RH 45 %) kuin vaaditut, eli periaatteessa lukemat saisivat olla arvostelusyvyydellä korkeampia, koska pintaosissa on varaa tasata suurempia määriä kosteutta esimerkiksi päällysteen liimasta. Lisäksi betonilaatan sisällä oleva lämmityskaapeli on kuivattanut betonin keskiosia normaalia tehokkaammin, joten kosteus pääsee tasaantumaan myös laatan keskiosien suuntaan kuivumisen loppuvaiheessa.

3.2 Kustannukset

Kustannusten laskennassa on käytetty 30 m²:n kokoista aluetta, joka oli yksi esimerkkikohteen valuista. Kustannukset sisältävät arvonlisäveron. Kaikki hinnat ovat rautakauppahintoja, eikä niissä ole huomioitu mahdollisia alennuksia.

Alla olevan taulukon mukaisesti 30 m²:n kokoisen alueen kuivattamiseen kuluu kahdessa kuukaudessa noin 7 632 kWh sähköä, josta 0,2 €:lla per kWh, tulee euromääräksi 1 526 €/kk. Materiaalit ja laitevuokrat ovat yhteensä 30 m²:n alueella 3 648 €. Alkuperäisen rakenteen kustannuksista jää pois 100 mm EPS, jonka kustannus on 30 m²:n esimerkkialueella 300 €. Kokonaiskustannukset ovat yhteensä 5 174 €, joka tekee noin 170 € / m². Todelliset kustannukset riippuvat aina toteutettavan kohteen koosta, sekä kaluston ja materiaalien sisäänostohinnoista. Suurin kustannuserä on salaojittava lämmöneriste, joka on noin 26 % kokonaiskustannuksista ja noin 37 % materiaalikustannuksista.

Taulukko 1. Kustannuserittely.

Laite	Teho, W	kWh/vrk	€/vrk (0,2 €/kWh)	kWh/2 kk	€/2 kk (0,2 €/kWh)
Imukuivain	1100	26,4	5,28	1584	316,8
Sorptiokuivain	1200	28,8	5,76	1728	345,6
Lämmityskaapeli (150 m)	3000	72	14,4	4320	864
Yhteensä	5300	127,2	25,44	7632	1526,4
Materiaali, laite	€				
Uritettu XPS-eriste	600				
Salaojittava lämmöneriste	1350				
EPS-eriste	-300				
Viemäriputki 32 mm, (6 m)	18				
Lämmityskaapeli (150 m)	300				
Imukuivain (vuokra 1 kk)	840				
Sorptiokuivain (vuokra 1 kk)	840				
Yhteensä	3648				

4. Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset

Mikäli työmaan aikataulut ovat tiukkoja, voidaan suhteellisen pienillä muutoksilla säästää paljon aikaa sekä varmistua siitä, että lopputulos on suunnitellun mukainen. Kuivumisaika-arvioihin ei voida sokeasti luottaa, koska työmaan olosuhteet vastaavat vain harvoin optimiolosuhteita, joissa betonirakenteiden kuivuminen olisi mahdollisimman tehokasta. By2020 Betonin kuivumisaika-arvio-ohjelmalla laskettiin 180 mm vahvan betonilaatan kuivumisaika-arvio yhteen suuntaan kuivuvana tasoon RH 85 % / 20 °C kahdella eri betonilaadulla, jotka olivat A (C30/37 v/s 0.6) ja B (C35/45 v/s 0.45). Kuivumisen laskettiin alkavan yhden viikon jälkihoidon jälkeen olosuhteissa RH 35 % / 20 °C, jolloin A:n tulos oli noin 35 viikkoa ja B:n tulos noin 18 viikkoa. Artikkelissa esitellyn ratkaisun kuivumisaika tasoon RH 81 % / 20 °C, oli 10 viikkoa, eli 8 viikkoa nopeammin kuin yhteen suuntaan kuivuvana. Lisäksi perustavoite, joka on arviolusluvultaan RH 85 % ja pinnasta RH 75 %, saavutettiin kuudessa viikossa. Lisäksi käytetty lattiapäällyste ei ole äärimmäisen tiivis, jolloin betoni pääsee kuivumaan myös jonkin verran ylöspäin.

Artikkelissa esitelty ratkaisu, jossa maanvastainen kantava teräsbetonilaatta saatiin kuivumaan tehokkaasti myös alaspäin, vaatii vielä lisätutkimusta, jotta betonin kosteusjakaumasta saadaan

parempi käsitys. Betonilaatta, joka on koneellisesti myös alaspäin kuivatettu ja sisältä lämmityskaapelilla lämmitetty, muuttaa rakenteen kosteusjakaamaa, jolloin päällystettävyyssmittausten normaalit syvyydet eivät ota huomioon saavutettua päällystämisen kannalta positiivista kuivumisnopeutta ja päällysteiden toimivuuden hyvää varmuutta. Poikkeava kosteusjakauma huomioiden, voidaan mittaussyvyyyksiä madaltaa, jolloin kuivumisajat ”uudella” arviointisyvyydellä mitattuna ovat lyhyempiä.

Tarkemmilla seurantamittauksilla, jossa mitataan erityisesti laatan kosteusjakaamaa, saadaan selvitettyä uusi arviointisyvyys, joka pitäisi kuitenkin selvittää aina tapauskohtaisesti erikseen kosteusjakauman kautta, koska laatan paksuus ja kuivattamistapa vaihtelee. Uusi arviointisyvyys olisi arviolta luokkaa $0,3 \times d$, mitattuna betonin kosteimmasta kohdasta, eli lämmityskaapeleiden puolivälistä. Ilman lämmityskaapelia mittaussyvyyttenä voitaisiin käyttää $0,2 \times d$.

Käsitellyn ratkaisun kustannukset ovat vielä turhan korkeat materiaalien osalta, jos kuivatettava ala on suuri. Kustannuserittelyssä kustannukset olivat 30 m^2 :n kokoiselle alueelle materiaalien ja laitteiden osalta $5\,174,4 \text{ €}$, joka on yhteensä noin $170 \text{ €} / \text{m}^2$. Lisäkustannus voi kuitenkin olla perusteltu, koska aikaa säästettiin esimerkkikohteessa vähintään 8viikkoa. Työmaan käyttö- ja yhteiskustannukset ovat projektista riippuen noin $\pm 10 \%$, joka on pienimmilläänkin tuhansia euroja kuukaudessa, mikäli aivan pienimpiä projekteja ei huomioida.

Rakenteen kuivattamista alaspäin voidaan mahdollisesti jatkaa myös päällystämisen jälkeen, mutta silloin kuivatusputkiston sijoittelu tulee ottaa huomioon jo suunnitteluvaiheessa. Tämä mahdollistaisi vielä aikaisemman päällystämisaikakohdan, jolloin tilat saadaan nopeammin käyttöön.

5. Yhteenveto

Uudenlaisella rakenteella alapohjan betonilaatta saadaan kuivumaan merkittävästi nopeammin, kun sitä verrataan normaaliin yhteen suuntaan kuivuvaan rakenteeseen. Rakenteen pinnoitettavuusmittauksissa ei voida suoraan käyttää normaaleja arviointisyvyyyksiä, koska kuivattamisen lopputuloksena rakenteen kosteusjakauma ei ole tavanomainen tasaisesti syvemältä pintaa kohti kuivuva, eikä se jää kuivattamisen jälkeen kuin yhteen suuntaan kuivuvaksi. Rakenteen neliöhinta kasvaa, mutta lisäkustannus saattaa olla projektista riippuen perusteltu.

Lähdeluettelo

- [1] Merikallio, T. 2009. Betonilattian ”riittävän” kuivumisen määrittäminen uudisrakentamisessa. TKK Rakenne- ja rakennustuotantotekniikan laitos. sivut 11–24.
- [2] Kallio, K. 2014. Rakenteiden koneellinen kuivaus. Itä-Suomen yliopisto. sivut 12–15.
- [3] Kylliäinen, K. 2010. Betonirakenteiden VOC-emissiot ja niiden vähentäminen rakennetta lämmittämällä. Itä-Suomen yliopisto. sivut 28–31.
- [4] Ympäristöministeriö. 2022. Muovimatolla päällystetyt betonilattiat - Vauriot, korjaustarpeen arviointi ja korjaaminen. Terveet Tilat 2028. sivu 85.
- [5] Merikallio, T. Niemi, S. Komonen, J. 2007. Betonilattiarakenteiden kosteudenhallinta ja päällystäminen. Suomen Betonitieto Oy. Lattian ja seinäpäällysteliitto. sivu 21.
- [6] Rakennustieto Oy. 2021. Ohjekortti - RT 103333 - Betonin suhteellisen kosteuden mittaust. sivu 29.

A4. Rakennusaikainen kosteudenhallinta ja hyvät työmaakäytännöt

CLT-elementin kosteusmittaustapojen vertailu

Miska Pöysäri
Ramboll Finland Oy

Tiivistelmä

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin eri kosteudenmittausmenetelmien soveltuvuutta CLT-elementin kosteuspitoisuuden määrittämiseen. Kosteudenmittausmenetelmien tuloksia vertailtiin niiden toimivuuden, toteutuksen ja käytännöllisyyden kannalta. Lisäksi arvioitiin menetelmien epävarmuustekijöitä ja niiden vaikutusta tuloksiin. Kosteudenmittausmenetelmät tutkimuksessa olivat piikkimittaus, jatkuvatoiminen piikkimittaus ja kuivaus-punnitus-mittaus. Pääsääntöisesti piikkimittauksen tulokset eivät eronneet paljoa kuivaus-punnitus-mittauksen tuloksista. Jatkuvatoimisten piikkimittareiden tulokset erosivat paljon muiden menetelmien tuloksista. Niitä oli tutkimuskohteessa toisaalta vähän, joten niistä ei voida tehdä tarkkoja johtopäätöksiä. Lähtökohtaisesti tutkituista menetelmistä kuivaus-punnitus-mittaus on tarkin. Siitä huolimatta siihen liittyy paljon mittaustulokseen vaikuttavia tekijöitä, joiden merkitys tulee tarkoin arvioida. Kosteusmittauksissa rinnakkaiset menetelmät tuovat varmuutta ja luotettavuutta mittaustuloksiin. Karkeaan kosteustilan arviointiin piikkimittaus on riittävän tarkka menetelmä. Kuivaus-punnitus-mittauksessa on suunniteltava tarkasti näytepalanottomenetelmä ja minimoida tulokseen vaikuttavat epävarmuustekijät. Jatkuvatoimisen piikkimittauksen yhteydessä kannattaa tehdä rinnakkaisia mittauksia, jotta voi varmistua tulosten luotettavuudesta.

1. Johdanto

CLT-massiivipuulevyteknikka on kasvattanut suosiotaan ja CLT-elementtien käyttö on yleistynyt rakentamisessa [1]. CLT:n kosteusteknisen toimivuuden varmistamiseksi tarvitaan sen kosteusominaisuuksista, kosteuskäyttäytymisestä ja kosteudenmittaamisesta lisää tietoa.

Tämä artikkeli käsittelee opinnäytetyön [2] tuloksia, jossa tutkittiin ja vertailtiin eri CLT-elementin kosteudenmittausmenetelmiä keskenään. Tutkimuksen tavoitteena oli vertailla mittausten menetelmiä suhteessa toisiinsa, sekä saada tietoa mittausten menetelmien soveltuvuudesta CLT-elementin kosteuden mittaamiseen. Kosteudenmittausmenetelmien tuloksia, menetelmien epävarmuustekijöitä ja menetelmien käytännöllisyyttä analysoitiin. Tutkitut mittausten menetelmät olivat piikkimittaus, jatkuvatoiminen piikkimittaus ja kuivaus-punnitus-mittaus.

Kosteusmittaukset tehtiin runkorakennusvaiheessa olleen oppilaitoksen ulkoseinien CLT-elementeistä sisäpuolelta. Piikkimittaukset tehtiin TAMK:n rakennuslaboratorion Gann Hydromette Compact S puunkosteusmittarilla, jatkuvatoimisessa piikkimittauksessa hyödynnettiin CLT-elementteihin kiinnitettyjen Wiiste Oy:n WM1-WAN-mittarien tuloksia ja kuivaus-punnitus-mittausta varten CLT-elementeistä sahattiin näytepaloja ja kuivaus-punnituskokeet tehtiin TAMK:n rakennuslaboratoriossa.

2. CLT-elementin kosteusmittaustapojen vertailun toteutus

2.1 Yleistä CLT-levystä

CLT-levy koostuu ristiin liimatuista lautakerroksista. Sen raaka-aineina on tavallisimmin kuusta

tai mäntyä ja näkyvissä pinnoissa voidaan käyttää myös muita puulajeja. CLT-levyjen valmistustekniikoita on useita. Levyt voidaan liimata kahdella tavalla, kun liimaus tehdään puristamalla prässien avulla. Syrjäliimatuissa levyissä lautakerrokset liimataan syrjistään ja sen jälkeen päällekkäin tasot ristiin ladottuna. Syrjäliimaamattomissa levyissä syrjäliimaus jätetään pois ja levyt liimataan ainoastaan lautojen lappeista. Syrjäliimaamattomassa levyssä kosteuseläminen tapahtuu saumojen kohdalla, kun taas syrjäliimatussa levyssä kuivuminen voi aiheuttaa lautojen halkeilua. Liimaustavasta riippumatta CLT-levy toimii yleensä höyrynsulkurakenteena. CLT-levyn mitat vaihtelevat valmistajan mukaan. CLT-levy voi olla 60–400 mm paksu, enintään 2,95–4,8 m leveä ja enintään 12–20 m pitkä. [3] CLT:n ristikkäisistä kerroksista koostuva rakenne pienentää sen tasossa tapahtuvia kosteusvaihteluiden aiheuttamia mittamuutoksia, kun taas paksuussuunnassa se kutistuu ja turpoaa kuten sahatavara. [4]

2.2 Mittausten suoritus

Mittauksia tehtiin yhteensä 18:a eri kohdassa mittauskohteessa. Kaikki mittaukset tehtiin CLT-elementin sisäpinnasta. Piikkimittaus ja kuivaus-punnitus-mittaus tehtiin jokaisessa mittauskohdassa. Tutkimuksen aikaan mittauskohteessa oli vain kolme WM1-WAN-mittaria ja näistä kahden vierestä voitiin tehdä piikkimittaus ja punnitus-kuivaus-mittaus. Niiden vierestä tehtiin mittaukset neljä kertaa, joten mittauskohdista neljä oli WM1-WAN-mittarien vierestä.

Piikkimittaukset tehtiin Gann Hydromette Compact S puunkosteusmittarilla CLT-elementtiseinän pinnasta, sekä näytepaloista, jotka otettiin kuivaus-punnitus-mittausta varten. Mittaukset seinän pinnasta tehtiin kolme kertaa jokaisessa mittauskohdassa. Piikkimittari ilmoittaa puun kosteuspitoisuuden painoprosentteina ja sen mittaus tehtiin 0–8 mm syvyydeltä. Puunkosteuden mittausalue mittarissa oli 10–50 p-% lämpötilan ollessa 15–25 °C. [5]

Mittauskohteen WM1-WAN-mittarit mittasivat kosteutta 12 mm ja 50 mm syvyydestä. Mittarien eristetyt kiinnitysruuvit toimivat niiden mittauselektrodeina ja ne mittasivat kosteutta ruuvien päästä ja ilmoittivat tuloksen myös painoprosentteina. Niiden mittausalue oli 6–30 p-%. [6]



Kuva 1.a ja b. Gann Hydromette Compact S puunkosteusmittarilla (a) ja WM1-WAN-mittari (b).

Kuivaus-punnitus-mittausta varten CLT-elementeistä sahattiin 51 mm reikäsahalla näytepaloja. Mittauskohdan, näytepalojen ja sahan lämpötiloja mitattiin infrapunälämpömittarilla, jotta voitiin arvioida sahauksen lämmön mahdollista vaikutusta punnitustuloksiin. Näytepalat punnittiin heti työmaalla, jotta laboratorioon kuljetuksen aikana näytepaloista mahdollisesti haihtuva kosteus ei vaikuttaisi tuloksiin. Säilytystavan vaikutusta tuloksiin tutkittiin ja vertailtiin siten, että osa näytepaloista säilytettiin kuljetuksen aikana tiiviisti suljetuissa Minigrip-pusseissa ja osa vain kangaskassissa. Näytepalat kuivattiin TAMK:n rakennuslaboratorion kuivausuunissa ja loput punnitukset suoritettiin siellä. Kaikkiin punnituksiin käytettiin samaa vaakaa.

2.3 Mittausmenetelmien vertailun toteutus

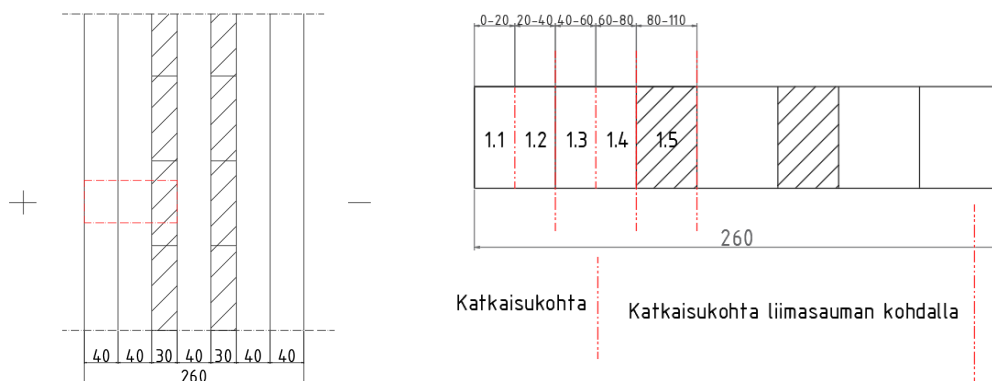
Piikkimittausta ja kuivaus-punnitus-mittausta vertailtiin jatkuvatoimiseen piikkimittaukseen siten,

että sekä piikkimittaukset, että kuivaus-punnitus-mittaus tehtiin aivan WM1-WAN-mittarien vierestä. Kuivaus-punnitus-mittauksen näytepalat otettiin samasta kohdasta kuin piikkimittaukset. Vain samasta kohdasta tehtyjä mittauksia vertailtiin keskenään. Esimerkiksi mittauskohdassa 1 tehtyjä mittauksia vertailtiin keskenään eikä niitä vertailtu muiden mittauskohtien tuloksiin.

Kuivaus-punnitus-mittausta varten otetut näytepalat jaettiin pienempiin osiin kuvan 2 mukaan, jotta piikkimittauksia, sekä jatkuvatoimista piikkimittauksista voitiin vertailla kuivaus-punnitus-mittaukseen. Piikkimittaukset tehtiin seinän pinnan lisäksi siis pienempiin osiin jaetuista näytepaloista. Näin mittausten vertailu oli tarkempaa, kun samasta syvyydestä olevia mittauksia vertailtiin keskenään. Esimerkiksi kuvassa 2 näkyvän näytepalan 1.2 kuivaus-punnitus-mittausta verrattiin siitä tehtyyn piikkimittaukseen, WM1-WAN mittarin 12 mm syvyyden mittaustulosta verrattiin näytepalan 1.1 mittaustuloksiin ja WM1-WAN mittarin 50 mm syvyyden mittaustulosta verrattiin näytepalan 1.3 mittaustuloksiin.

Kuivaus-punnitus-mittauksella ja piikkimittauksella saadaan tietoa puun kosteuspitoisuudesta koko näytteen tai vastaavasti piikkien pituudelta, jollei piikkimittarin piikkejä ole eristetty, kuten WM1-WAN-mittarin piikit ovat. Viipaloimalla CLT:stä sahattua näytepalaa, voidaan kosteuspitoisuus mitata tarkemmin halutulta syvyydeltä. Koska WM1-WAN mittari mittasi kosteutta 12 mm ja 50 mm syvyydeltä, viipaloitiin CLT:stä poratut puulieriöt vastaavasti, jotta kosteuspitoisuus piikkimittarilla ja kuivaus-punnitus-mittauksella saataisiin mitattua samalta syvyydeltä kuin mitä WM1-WAN-mittari mittasi.

Lisäksi näytepalat viipaloitiin CLT-levyn liimasaumojen ja kerroksellisen rakenteen takia. Kosteuspitoisuutta ei ole luotettavaa mitata liimasauman yli tai läpi sillä liimasauman eri puolilla on kaksi eri lamellia ja joiden mahdollisesta halkeilusta, oksaisuudesta tmv. ei ole tietoa mittausta tehtäessä. Lisäksi liimasauma voi vaikuttaa mittarin antureihin, jos ne ovat eristämättömät. Näin menetellen voitiin ottaa huomioon CLT:n liimasaumat ja kerroksellisuus.



Kuva 2. CLT-levyn poikkileikkaus sivustapäin katsottuna ja näytepalan viipalointi.

3. Tulokset

3.1 Mittausmenetelmien arviointi

Piikkimittaukseen vaikuttaa mittarin kalibrointi. Mittauksissa on huomioitava, että piikkimittaus perustuu konduktanssin mittaamiseen, joka on epäsuora menetelmä. Eri mittareilla on erilaisia mittarikohtaisia ominaisuuksia, kuinka ne ottavat huomioon esimerkiksi puulajin ja tiheyden. CLT:ssä voi olla useampaa puulajia, mikä voi aiheuttaa vaihtelua tuloksiin. Piikkimittauksissa on otettava huomioon CLT-levyn liimasaumat ja kerroksellinen rakenne. Lisäksi on huomioitava,

että CLT:tä mitattaessa syvemmältä, ei voida tietää osuuko piikki esimerkiksi oksakohtaan tai halkeamaan, mikä lisää omalta osaltaan mittauksen epävarmuutta.

WM1-WAN-mittarien toimintaperiaate on sama kuin piikkimittauksessa, minkä takia niiden tuloksiin liittyy samoja epävarmuuksia. Myös WM1-WAN-mittarilla on huomioitava liimasaumat. Jos kiinnitysruuvit on eristetty, voidaan sillä mitata liimasaumojen yli. WM1-WAN-mittareilla mitattaessa kannattaa tehdä rinnakkaisia mittauksia muilla menetelmillä ja näin hakea luotettavuutta sen tuloksiin vertailemalla sen tuloksia muiden menetelmien tuloksiin.

Kuivaus-punnitus-mittauksessa on mietittävä tarkkaan mittauksen toteutus. Tässä tutkimuksessa näytepalat otettiin sahaamalla poralieriö ja sahauksen vaikutusta tutkittiin. Pääsääntöisesti sahan lämpötila oli sahauksen jälkeen 70–90 °C:ta ja tutkimuksen aikana se nousi kerran yli 100 °C:een. Näytepalojen lämpötila oli pääsääntöisesti sahauksen jälkeen 30–50 °C:ta ja suurimmillaan 58 °C:ta. Sekä sahan että näytepalojen lämpötilan nousuun vaikutti merkittävästi sahan laatu ja kuluminen. Sahan on oltava riittävän tehokas ja sen terien teräviä, jotta sahauksesta aiheutuva puun lämpötilan nousu saadaan minimoitua.

Näytepalat on hyvä punnita jo mittauskohteessa, jotta kuivaukseen kuljetuksen aikana näytepaloista haihtuva kosteus ei vaikuta tuloksiin. Tällöin on huomioitava, että samaa vaaka on käytettävä kaikissa punnituksissa, sillä vaa'alla saattaa esiintyä tarkkuuseroja. Myös vaa'an kalibroinnista tulee huolehtia. Kuljetuksen aikaisella säilytystavalla on jonkin verran vaikutusta näytepalojen massaun. Tiiviisti Minigrip-pusseissa ja vapaasti kangaskassissa säilytetyillä näytepaloilla ero oli kuitenkin varsin pieni. Minigrip-pusseissa säilytetyissä näytepaloissa massan muuttui keskimäärin 0,09 % ja kangaskassissa säilytetyissä 0,24 %. Suurin yksittäinen muutos Minigrip-pusseissa säilytetyissä oli 0,38 % ja kangaskassissa 0,83 %. Näytepalat kannattaa kuitenkin säilyttää tiiviisti pakattuna, koska silloin saa tarkempia ja luotettavampia tuloksia.

Kuivaus-punnitus-mittaukseen vaikuttaa myös näytepalojen oksaisuus, pihkaisuus, pihkataskut ja muut puun luonnolliset ominaisuudet. Näytepaloja ottaessa tällaisia kohtia kannattaa välttää. CLT-levyissä vain pintalamellissa tällaisia kohtia voi välttää, sillä näytepalaa ottaessa ei voida tietää minkälaisia sen takana olevat lamellit ovat.

Kosteusmittauksissa rinnakkaiset menetelmät tuovat varmuutta tulosten tulkintaan. Jos mittauksissa on paljon eroa, niin voidaan arvioida mistä erot johtuvat, kun mittauksia tehdään usealla eri menetelmällä. Sen lisäksi että arvioidaan rakenteen todellista kosteutta, jatkuvatoimisella piikkimittauksella voidaan seurata reaaliaikaisesti rakenteen kosteuspitoisuutta ja kuivumista, sekä saada tietoa kuivumisolosuhteista ja -kapasiteetista. Jos kuivumista ei tapahdu, voidaan tutkia mistä se johtuu ja tarvittaessa puuttua tilanteeseen. Piikkimittauksissa varmuutta tuloksiin voi hakea tekemällä mittauksia myös toisella piikkimittarilla.

3.2 Mittaustuloksien vertailun tulokset

Muilla menetelmillä kuin WM1-WAN-mittarilla, mittaustulokset olivat varsin kuivia koko tutkimuksen ajan, kuten taulukosta 1 nähdään. CLT oli tutkimuksessa tasaisesti kuiva eri syvyyksillä, paitsi syvyyalueella 80–110 mm, jolla CLT oli hieman kuivempaa kuin muilla alueilla. Kuivaus-punnitus-mittauksien keskiarvo alueella oli 8,91 % ja mediaani 9,20 %. Piikkimittauksien keskiarvo alueella 80–110 mm oli 7,09 % ja mediaani 7,50 %.

Näytepalan kuivaus-punnitus-mittauksen kosteuspitoisuutta verrattiin samasta näytepalasta tehtyyn piikkimittaukseen (taulukko 2). Näytepalasta tehdyn piikkimittauksen ero kuivatus-punnitus-mittaukseen oli keskimäärin 1,41 prosenttiyksikköä ja mediaani 1,23 prosenttiyksikköä.

Merkittävä osa (95 %) piikkimittausten tuloksista olivat pienempiä kuin vastaavat kuivaus-punnitus-mittauksen tulokset. Tämä on voinut johtua piikkimittarin kalibroinnista, sillä se antoi tasaisesti alhaisempia tuloksia, verrattuna kuivaus-punnitus-mittaukseen.

Taulukko 1. Kuivaus-punnitus-mittaukset ja piikkimittaukset koko tutkimuksen ajalta.

	Kuivaus-punnitus-mittaus	Piikkimittaus näytepalasta	Piikkimittaus pinnasta	WM1-WAN
Keskiarvo (%)	10,11	8,70	9,23	12,66
Mediaani (%)	10,12	8,90	9,65	14,08
Suurin (%)	12,76	11,70	10,90	18,59
Pienin (%)	6,73	4,20	6,80	7,29

Taulukko 2. Kuivaus-punnitus-mittaus verrattuna piikkimittaukseen näytepalasta.

Suurin yksittäinen ero	3,56 prosenttiyksikköä
Ero alle 1 prosenttiyksikköä	37 %
Ero 1–2 prosenttiyksikköä	37 %
Ero yli 2 prosenttiyksikköä	25 %
Ero yli 3 prosenttiyksikköä	7 %
Keskiarvo ero	1,41 prosenttiyksikköä
Mediaani ero	1,23 prosenttiyksikköä

Kunkin mittauskohdan ensimmäisen näytepalan (alueen 0–20 mm) kuivaus-punnitus-mittauksen tulosta verrattiin saman mittauskohdan piikkimittauksiin pinnasta (taulukko 3). Piikkimittauksen ero kaikista pinnalla olevimman näytepalan kuivaus-punnitus-mittaukseen oli keskimäärin 1,50 prosenttiyksikköä ja mediaani 1,36 prosenttiyksikköä. Näissä mittauksissa kaikki piikkimittaus tulokset olivat pienempiä, kuin kuivaus-punnitus-mittauksen tulokset.

Taulukko 3. Piikkimittaus pinnasta ero kuivaus-punnitus-mittaukseen.

Suurin yksittäinen ero	2,80 prosenttiyksikköä
Ero alle 1 prosenttiyksikköä	30 %
Ero 1–2 prosenttiyksikköä	46 %
Ero yli 2 prosenttiyksikköä	24 %
Keskiarvo ero	1,50 prosenttiyksikköä
Mediaani ero	1,36 prosenttiyksikköä

Piikkimittauksen tulosta seinän pinnasta verrattiin piikkimittaukseen kaikista lähinnä pintaa olevasta näytepalasta (0–20 mm) (taulukko 4). Mittaus on tehty siis samasta kohdasta, mutta välissä on ollut näytepalojen sahaus. Mittausten ero oli keskimäärin 0,33 prosenttiyksikköä ja mediaani 0,20 prosenttiyksikköä. Mittauksissa 83 %:ssa ero oli alle 0,5 prosenttiyksikköä. Näiden tulosten perusteella sahaus ei ole vaikuttanut merkittävästi tulokseen.

Taulukko 4. Piikkimittaus pinnasta ero piikkimittaukseen näytepalasta.

Suurin yksittäinen ero	1,60 prosenttiyksikköä
Ero alle 0,5 prosenttiyksikköä	83 %
Ero yli 0,5 prosenttiyksikköä	17 %
Ero yli 1 prosenttiyksikköä	9 %
Keskiarvo ero	0,33 prosenttiyksikköä
Mediaani ero	0,20 prosenttiyksikköä

WM1-WAN-mittareiden ero sekä kuivaus-punnitus-mittaukseen, että piikkimittaukseen (taulukko 5) vaihteli paljon. Erot kuivaus-punnitus-mittaukseen olivat 0,46–7,36 prosenttiyksikköä ja erot piikkimittaukseen (pinnasta ja näytepalasta) 1,81–8,99 prosenttiyksikköä. Osa eroista oli varsin suuria ja WM1-WAN-mittarit mittasivat selkeästi kosteampia tuloksia kuin muut menetelmät.

Taulukossa 5 -merkkiset tulokset tarkoittavat, että WM1-WAN-mittari on mitannut pienemmän tuloksen kuin verrattu mittaus. Vertailussa piikkimittaukseen pinnasta on kolme tulosta, koska seinän pinnasta tehdyt piikkimittaukset tehtiin kolme kertaa jokaisessa mittauskohdassa.

Taulukko 5. WM1-WAN-mittarien tulokset verrattuna muihin mittausmenetelmiin.

Mittauskohta ja WM1-WAN mittausvyvyys	WM1-WAN kosteuspiitoisuus	Ero kuiv.pun. (prosentti)	Ero piik.mit. pinnasta (prosentti)	Ero piik.mit. näytepalasta (prosentti)
Mittauskohta 1 12 mm	14,17 %	1,79	4,27; 4,27; 4,27	4,07
Mittauskohta 1 50 mm	18,59 %	7,36		8,99
Mittauskohta 2 12 mm	11,61 %	0,46	1,81; 1,81; 2,31	1,91
Mittauskohta 2 50 mm	14,03 %	3,39		3,73
Mittauskohta 14 12 mm	14,13 %	3,09	4,23; 4,33; 4,33	4,23
Mittauskohta 14 50 mm	7,29 %	-4,30		-2,21
Mittauskohta 15 12 mm	14,13 %	2,41	3,33; 3,33; 3,23	3,03
Mittauskohta 15 50 mm	7,29 %	-5,26		-3,51

4. Yhteenveto

Piikkimittauksen erot kuivaus-punnitus-mittaukseen eivät pääsääntöisesti olleet suuria. WM1-WAN-mittarin erot muihin menetelmiin olivat ajoittain suuria, mutta koska niiden otanta oli pieni, ei niiden tuloksista voida tehdä tämän tutkimuksen perusteella tarkempia johtopäätöksiä.

Kuivaus-punnitus-mittaus on lähtökohtaisesti tarkin tämän tutkimuksen mittausmenetelmistä, mutta siihen liittyy paljon mahdollisia virhetekijöitä, jotka on huomioitava mittauksissa näytepalanottomenetelmästä lähtien. Vaikka mittauksissa saha ei aiheuttanut yli 100 °C:n lämpötilan kuin kerran, sahauksen vaikutusta kosteuspiitoisuuteen on vaikea arvioida tarkasti. Näytepalojen säilytystavalla kuljetuksen aikana ei ollut suurta vaikutusta mittaus tulokseen. Näytepalat kannattaa punnita jo mittauskohteessa ja kaikissa punnituksissa käyttää samaa vaakaa.

CLT:n kosteusmittauksissa on huomioitava rakenteen liimasaumat, kerroksellinen rakenne ja se, että pintalamellia lukuun ottamatta ei voida tietää minkälainen mittauskohta on. Mittauskohdissa kannattaa välttää oksia, pihkataskuja ja muita poikkeavia kohtia. CLT:tä jätetään paljon näkyväksi pinnaksi, mikä vaikuttaa paljon siihen, mistä kosteusmittauksia voi suorittaa.

Lähdeluettelo

- [1] Rakentaja. n.d. Talon rakentaminen CLT:stä – mitä CLT tarkoittaa ja mitä se mahdollistaa? Talon rakentaminen CLT:stä – mitä CLT tarkoittaa ja mitä se mahdollistaa? (rakentaja.fi)
- [2] Pöysäri, M. 2022. CLT-elementin kosteusmittaustapojen vertailu.
- [3] Puuinfo. 2023. Monikerroslevy (CLT). <https://puuinfo.fi/puutieto/insinööri tuotteet/monikerroslevy-clt/>
- [4] Puuinfo. 2020. Puun kosteuskäyttäytyminen. <https://puuinfo.fi/suunnittelu/ohjeet/tekniset-tiedotteet/puun-kosteuskayttaytyminen/>
- [5] Gann. n.d. Gann Hydromette Compact S. Käyttöohje.
- [6] Wiiste Oy. 2020. WM1-WAN Internetiin integroitu puun kosteusmittari. Tuotekortti.

CLT-rakenteiden kosteudenhallinta ja kuivumisen aiheuttama halkeilu

Topi Moisio, Lauri Lepikonmäki ja Teemu Vanha-Viitakoski
Sweco Finland Oy

Tiivistelmä

Puurakentamisen kosteudenhallinta vaatii hankkeen osapuolilta perehtymistä puumateriaalin ominaispiirteisiin. CLT-rakenteiden kosteusteknistä toimintaa on tutkittu, mutta alalta puuttuu tutkimustulokset yhdistävä ohjeistus, joka ohjaa kosteudenhallinnan suunnittelua sekä seurantaa. Artikkelissa kuvataan CLT-rakenteiden kosteudenhallinnassa huomioitavia asioita.

1. Johdanto

Puurakentamisen yleistymisen seurauksena hankkeiden eri osapuolien palvelukseen siirtyy eri rakennusmateriaalien parissa työskennelleitä henkilöitä, joille massiivipuurakentamisen kosteuteen liittyvät ilmiöt eivät ole arkipäivää. Puu on kosteudelle ja kosteuspitoisuuden muutoksille monessa suhteessa herkkä materiaali. Niin tilaajan, rakennuttajan, suunnittelijan, urakoitsijan kuin loppukäyttäjänkin on olennaista tuntee puun kosteuskäyttäytymiseen vaikuttavat asiat, jotta valmis rakennus täyttää sille asetetut vaatimukset.

Massiivipuurunkoisissa rakennushankkeissa kosteudenhallinta nousee ensimmäisenä esille, kun keskustellaan työmaan järjestelyistä. Hankkeiden alkuvaiheessa tehtävät kosteudenhallintaan liittyvät päätökset saattavat vaikuttaa merkittävästi rakenneratkaisuiden tai toteuttajien valintaan sekä rakentamisaikatauluun, joten niiden vaikutuksia on hyvä tuoda esille. Tässä artikkelissa esitellään CLT-rakenteiden kosteusteknistä toimintaa ja asioita, joihin tulee kiinnittää huomiota jo hankkeen alkuvaiheesta lähtien, jotta rakennuksesta saadaan toimiva. Artikkelissa esitellään myös yksikertaisilla laskennallisilla tarkasteluilla halkeilun esiintymistä Suomen ilmasto-olosuhteissa.

Rakennuksen kosteudenhallinta on kokonaisuus, joka koostuu kosteusteknisesti turvallisista suunnitteluratkaisuksista, rakennusaikaisesta kosteussuojauksesta, rakenteiden hallitusta kuivattamisesta sekä rakennuksen oikeanlaisesta käytöstä ja huollosta [1]. Puset rakenneosat, erityisesti massiivipuiset rakenneosat, aiheuttavat kosteudenhallintaprosessille erityisiä vaatimuksia, kun ongelmana ei olekaan yksinkertaisesti kosteuden pääsyn estäminen rakenteeseen tai kosteuden poistaminen rakenteesta vaan lisäksi kosteuspitoisuuden muutosten nopeuteen tulee kiinnittää huomiota.

2. CLT ja kosteustekninen toiminta

CLT (Cross Laminated Timber) on massiivipuinen rakennusmateriaali, joka koostuu vähintään kolmesta ristikkäin liimatusta lamelli- eli puulevykerroksesta. CLT:tä valmistetaan kahdella eri liimaustavalla, syrjäliimattuna tai syrjäliimaamattomana. CLT-levyjen saatavilla olevat koot, paksuudet sekä lamellien lujuuDET, koot ja ladontasuunnat vaihtelevat valmistajan mukaan. CLT-rakenteet on tarkoitettu käyttöluokkiin 1 ja 2 niin käyttö- kuin rakentamisaikana.

Massiivipuusta koostuva CLT on hygroskooppinen materiaali eli se luovuttaa ja sitoo kosteutta ympäröivästä ilmasta. Puun solurakenteen takia sen dimensiot vaihtelevat kosteuspitoisuuden

mukaan ja puun otrooppisuudesta johtuen kosteuspitoisuuden vaihtelusta johtuvat muodonmuutokset ovat erilaista puun syiden, säteen ja tangentin suunnassa. Materiaalin 1 %-m kosteuspitoisuuden muutos CLT-levyssä aiheuttaa 0,01 % muodonmuutoksen levyn kantavassa suunnassa (ϵ_{\parallel}) ja keskimäärin 0,24 % muodonmuutoksen levyn muissa suunnissa (ϵ_{\perp}) [2].

Vapaat muodonmuutokset muuttavat materiaalin dimensioita, kun taas estetyt muodonmuutokset aiheuttavat materiaaliin jännityksiä. Ristikkäisen ladonnan ja liimauksen takia CLT-levyn lamellien muodonmuutokset ovat estettyjä liimapinnoilla, mikä aiheuttaa CLT-levyjen lamelleihin jännityksiä. CLT-rakenteiden kosteuspitoisuuden muutosten aiheuttamien jännitysten ulkoisia merkkejä ovat mm. pintojen halkeilu sekä aaltoilu ja rakenteiden kaareutuminen.

CLT-rakenteissa halkeamien vaikutus rakenteiden esteettisyyteen on merkittävä ja pahimmassa tapauksessa hallitsematon halkeilu voi johtaa elementtien kuormituskapasiteetin heikkenemiseen. Kosteusmuodonmuutoksilla on myös havaittu olevan vaikutusta rakennuksen ilmanpitävyyteen [3]. CLT-rakenteiden halkeilu on ilmiönä väistämätön, koska sisäilman suhteellisen kosteuden vaihtelut aiheuttavat CLT-rakenteiden pintoihin puun poikittaista vetokestävyttä suurempia jännityksiä. CLT-rakenteiden kosteudenhallinnalla voidaan kuitenkin vaikuttaa halkeamien määrää sekä kokoon. Edellä mainituiden syiden takia CLT-rakentamisessa tulee kiinnittää erityistä huomiota kosteuden hallintaan ja siten halkeamien muodostumisen ehkäisemiseen.

3. CLT-rakenteiden kosteudenhallinta

CLT-rakenteiden kosteudenhallinnan suunnitteluun ei ole olemassa yleistä ohjeistusta. CLT-rakenteiden kosteudenhallinnan suunnittelussa joudutaan soveltamaan esimerkiksi liimapuukurakenteiden kosteudenhallintaan tarkoitettua suunnitteluohjetta ”RIL 244-2007, Puurakenteiden jäykistyksen ja halkeilun hallinta” [4]. CLT-rakentamisen kosteudenhallintaa on tutkittu mm. Karelia-ammattikorkeakoulun tutkimuksissa [5,6]. Karelia-ammattikorkeakoulun tutkimuksissa on todettu, että suunnitteluohjeen periaatteet pätevät myös CLT-rakenteiden kohdalla.

CLT-rakenteiden kosteuspitoisuuteen ja siten halkeamien muodostumiseen voidaan vaikuttaa rakentamisen eri vaiheissa. Tässä artikkelissa rakentamisen vaiheet on jaettu kolmeen osaan:

- | | |
|--------------------------------|------------------------------------|
| 1. Asennusta edeltävät vaiheet | Valmistus, kuljetus, varastoinnit |
| 2. Asennusaika | Työmaan runkovaihe |
| 3. Asennusta seuraavat vaiheet | Rakennuksen käyttöönotto ja käyttö |

Massiivipuukurakenteiden kosteudenhallinnassa tulee erityisesti huomioida paikalliset olosuhteet. CLT-rakentaminen on tullut Suomeen Keski-Euroopasta, mutta rakenneratkaisuissa ja kosteudenhallinnassa on huomioitava, että Keski-Euroopassa toimivat ratkaisut eivät välttämättä sellaisenaan toimi Suomen olosuhteissa.

3.1 Valmistus, kuljetus ja varastointi

CLT-levyjen valmistuksessa halkeamien muodostumiseen voidaan vaikuttaa merkittävästi käyttämällä riittävän kuivaa puutavaraa. Puutavaran kosteuspitoisuuden tulisi olla mahdollisimman lähellä käyttötilanteen kosteuspitoisuutta. Mikäli CLT-levyjä varastoidaan tehtaalla, tulee myös varastointiolosuhteiden vastata käyttötilanteen lämpötila ja kosteusolosuhteita.

CLT-levyjen lamellien kosteuspitoisuus on tuotannossa noin 12 % +/- 2 % ja näkyviin jäävien

lamellien 9 % +/- 2 % [7]. Näkyväksi pinnaksi suunniteltujen CLT-levyn lamellien tasapainokosteuspitoisuus vastaa 20 °C lämpötilassa noin 50 % suhteellista kosteutta. Lopputilanteen kannalta mahdollisimman pintalamellien kuivaaminen mahdollisimman kuivaksi olisi perusteltua, mutta liimauksen onnistumiseksi pintalamellien kosteuspitoisuus ei voi käytännössä olla alhaisempi kuin 9 % +/- 2 %.

Syrjäliimaamattoman CLT-levyn pinnassa muodonmuutokset tapahtuvat pintalamellien saumoissa, jolloin saumojen raot kasvavat kuivumisen seurauksena. Pintalamellien välisten rakojen syntymistä voidaan vähentää lamellien syrjäliimauksella, mikä toisaalta lisää halkeamien syntymistä lamellien keskelle. Halkeamien syntymistä voidaan hallita myös CLT-levyn pinnan urituksella.

Puutavaran valinnalla ja lamellien ladonnalla voidaan osaltaan vaikuttaa halkeamien muodostumiseen. Halkeamien muodostumista voidaan vähentää käyttämällä pintalamelleissa kvarttisahattua puutavaraa tai asettamalla levyn pintalamellit siten, että puutavaran ydin on CLT-levyn ydintä kohti.

CLT-elementit suojataan kuljetuksen ajaksi esimerkiksi yksittäispakattuina muoveihin tai rekan suojapressuilla. CLT tulee varastoida maasta irti niin, että alla ei ole vesilammikkoja. CLT tulee suojata suurilta kosteusrasituksilta ja ultravioletivalolta. Pitkäaikainen muovin kääriminen voi kostuttaa CLT:tä.

3.2 Kosteudenhallinta työmaalla

Työmaan kosteudenhallintaan CLT-rakennuksissa on kaksi pääsuuntaa, koko rakennuksen suojaaminen teltalla ja sääsuojaamaton rakentaminen.

Sääsuojaamattomassa rakentamisessa vaakarakenteiden päälle ja liitoksiin kertyvää kosteutta tulee hallita suunnittelu- ja työmaaratkaisuin. Rakennuksessa ei saa käyttää vaurioituvia materiaaleja kosteudelle alttiina aikana. Liitoksiin kertyvää vettä voidaan ehkäistä teippauksin ja rakenteellisin ratkaisuin. Välipohjan aukot ja reunat tulee suojata niin, että vesi ei pääse kulkeutumaan alemmille tasoille. Välipohjalle kertyvä vesi tulee ripeästi lastata kaivoihin, jotka johtavat rakennuksen ulkopuolelle. Erityisesti tulee kiinnittää huomiota veden imeytymiseen puun syysuuntaan. Suurin imeytyminen tapahtuu esimerkiksi seinän alareunan vesilammikosta. Suojauksena voidaan käyttää esimerkiksi osien sateelle alttiiden syysuuntaisten pintojen suojausta kosteussulkutuotteilla. Rakenteiden kastumisen ehkäisemisen ohella tulee pitää huolta riittävästi rakenteiden tuulettumisesta, jotta kastuneet osat pääsevät kuivumaan.

Sääsuojatussa rakenteessa erityistä huomiota tulee taas kiinnittää mahdollisiin betoni- ja tasoitevaluihin, jotka aiheuttavat voimakasta kosteusrasitusta teltan sisälle. Teltan sisäpuolen riittävästä tuulettamisesta tulee varmistua. Käytettäessä koko rakennuksen sääsuojausta voidaan sallia herkemmin vaurioituvia materiaaleja ja ratkaisuja runkovaiheessa, jolloin sääsuojan tiiveyteen ja mahdollisiin avaamisista johtuviin kosteusrasituksiin tulee varautua.

Ulkomailla on tutkittu sääsuojatta rakentamisen reunaehtoja. Ruotsalaisessa tutkimuksessa [8] päädyttiin mm. vaatimaan sääsuojausta, kun rakennusaikana on oletettavissa yli 40 mm sademäärä tai rakentamisaika kestää yli kaksi viikkoa. Toisessa Ruotsalaisessa julkaisussa [9] korostettiin yhteistyötä, tarkastuksia ja CLT:n käsittelyä työmaalla sekä annettiin ohjeistusta CLT:n suojaukseen työmaalla, kun rakentamisen aikana ei käytetä koko rakennusta suojaavaa telttaa. Kolmannessa Ruotsalaisessa tutkimuksessa [10] päädyttiin suosittelemaan mieluiten koko

rakennuksen sääsuojausta.

3.3 Rakennuksen käyttöönotto ja käyttö

Sääsuojatusta tai -suojaamattomasta rakennustavasta riippumatta puurakenteet tulee kuivata hallitusti käyttöolosuhteisiin. Puurakenteet saattavat kostua asennusaikana ilmankosteuden ja mahdollisten sateiden vaikutuksesta. Puupintojen liian nopea kuivaaminen aiheuttaa normaalia suurempaa halkeilua. Tämä tulee huomioida erityisesti näkyviin jäävissä puupinnoissa.

Kosteuden poistumista näkyviin jäävien puupintojen lamelleista voidaan rajoittaa kuivumisolosuhteiden hallinnan lisäksi rajoittamalla kosteuden siirtymistä esimerkiksi pintakäsittelyllä tai ohuilla kosteuden siirtymistä hidastavilla kerroksilla. Suurimmat kosteuserot ovat yleensä ensimmäisellä kuivauskerralla, joten se on kriittisin. Massiivipuuelementin sisimmäisten kerrosten kosteustasapainon saavuttamiseen voi kulua muutamakin vuosi, mutta puun pintakerroksissa kuivuminen on sitä vastoin nopeaa.

CLT-rakenteiden kosteuspitoisuutta seurataan kosteusmittauksilla. Kosteusmittaus olisi hyvä tehdä useasta syvyydestä, jotta voidaan selvittää mihin suuntaan kosteus rakenteessa mahdollisesti siirtyy. Homeen kasvun vuoksi CLT:lle ei tulisi sallia 2–3 viikkoa pitempään yli 20 %-m kosteuspitoisuuksia. Pintahome voidaan puhdistaa esimerkiksi hiomalla, jonka jälkeen CLT:tä on tärkeä pitää riittävän kuivassa.

Karelia-ammattikorkeakoulun tutkimuksissa huomattiin esimerkiksi, että lämmittämistä voidaan joutua jaksottamaan, jotta puurakenteet eivät kuivu liian nopeasti. Tutkimuksissa havaittiin myös, että ilmanvaihdon määrään käytön alkuvaiheessa olisi hyvä kiinnittää huomiota, jotta sisäilma ei kuivu liikaa. [5,6]

4. Kuivumisen aiheuttaman halkeilun laskennallinen arviointi

Loppukäyttäjälle näkyvin merkki CLT-rakenteiden kosteudenhallinnan laadusta on näkyvien CLT-rakenteiden pintojen halkeilu. Puun halkeilua voidaan tutkia murtumismekaniikan avulla. Joihinkin laskentaohjelmiin on olemassa materiaalimalleja, jotka huomioivat halkeamisen. Näillä laskentaohjelmilla on tutkittu reunaehtojen vaikutuksia halkeamien muodostumiseen [11]. Halkeamien laskennallinen tutkiminen on kuitenkin vielä työlästä ja suhteellisen vähän tutkittua. Halkeamien muodostumista voidaan kuitenkin arvioida yksinkertaisesti vertaamalla puurakenteen kosteuspitoisuuden muutoksesta johtuvaa jännitystä puun vetokestävyYTEEN.

4.1 Puun tasapainokosteus

Puun tasapainokosteus (Equilibrium moisture content) EMC [%-m], lasketaan yhtälöllä [12]:

$$EMC = \frac{1800}{W} \cdot \left(\frac{K \cdot h}{1 - K \cdot h} + \frac{K_1 \cdot K \cdot h + 2 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K^2 \cdot h^2}{1 + K_1 \cdot K \cdot h + K_1 \cdot K_2 \cdot K^2 \cdot h^2} \right), \quad (1)$$

missä h = suhteellinen kosteus [-]
 T = lämpötila [°C]
 W, K, K_1, K_2 = parametreja, jotka on määritetty alla

$$W = 349 + 1,29 \cdot T + 0,0135 \cdot T^2$$
$$K = 0,805 + 0,000736 \cdot T - 0,00000273 \cdot T^2$$

$$K_1 = 6,27 - 0,00938 \cdot T - 0,000303 \cdot T^2$$

$$K_2 = 1,91 + 0,000736 \cdot T - 0,00000273 \cdot T^2$$

4.2 Jännitys-venymä-yhteys

Kun kosteuspitoisuuden muutoksen ja venymän välinen yhteys ε_{\perp} tunnetaan, niin puuhun syntyvä jännitys σ [MPa], voidaan laskea Hooken lailla:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2)$$

missä E = kimmokerroin [MPa]
 ε = venymä [-]

4.3 Kosteuspitoisuuden muutoksen vertailu vetokestävyyteen

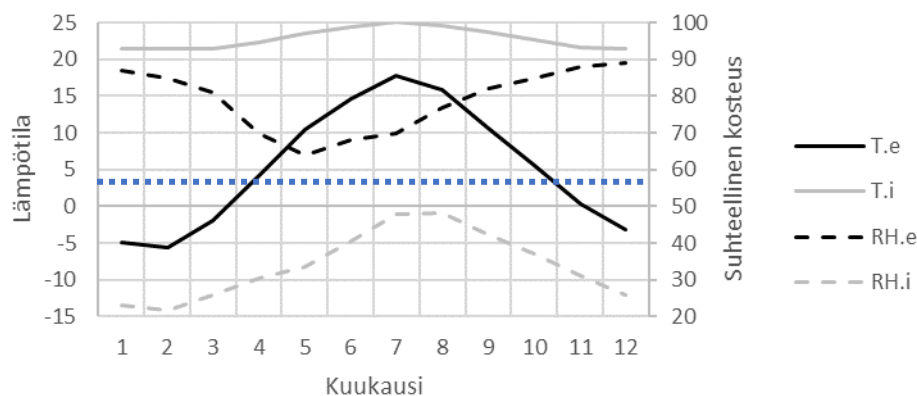
C24 sahatavaran syitä vastaan poikittaissuuntainen kimmomoduuli on keskimäärin 370 MPa. Kuvassa 1 on esitetty C24 sahatavaran kosteuspitoisuuden muutoksen ja muodonmuutoksen aiheuttaman jännityksen välinen yhteys.



Kuva 1. Puun kosteuspitoisuuden ja muodonmuutoksen aiheuttaman jännityksen välinen yhteys.

C24 sahatavaran poikittaisen vetokestävyys on 0,4 MPa (ominaisarvo, 5 % fraktiili). Kuvasta 1 nähdään, että noin 0,5 %-m kosteuspitoisuuden muutos puurakenteessa aiheuttaa yli 0,4 MPa vetojännityksen puuhun.

Kuvassa 2 on esitetty ilmastollisen vertailukauden ulko- ja sisäilman olosuhteet.



Kuva 2. Ulko- ja sisäilman olosuhteet, ilmastollinen vertailukausi (Helsinki-Vantaa 1981–2010), sisäilmaluokka S2 (2018), kosteuslisä 1,5–0,5 g/m³.

Kohdassa 3.1 todettiin, että CLT:n pintalamellien tasapainokosteuspitoisuus vastaa noin 50 % suhteellista kosteutta. Ilmastollisen vertailukauden sisäilman suhteellinen kosteus RH_i on alle 50 % jokaisena kuukautena., joten voidaan todeta, että halkeamien syntyminen on todennäköistä.

5. Yhteenveto

Massiivipuurunkoisissa rakennushankkeissa kosteudenhallinta on merkittävässä roolissa, jotta valmis rakennus täyttää sille asetetut vaatimukset. Hankkeen osapuolten on hyvä tuntea massiivipuुरakentamisen ominaispiirteet, jotta päätösten vaikutukset eivät tule yllätyksenä ja asioihin osataan reagoida hankkeen oikeassa vaiheessa.

CLT-rakenteiden kosteudenhallinta tulee ottaa huomioon jo hankkeen aikaisessa vaiheessa kosteudenhallintaselvityksessä. CLT-rakenteiden kosteudenhallinnan suunnittelun tulisi laatia rakenteille tarkoitettu yleinen ohjeistus. Myös CLT-rakenteiden kosteudenhallinnan seuranta tulisi ohjeistaa yleisellä tasolla, jotta alan toimijat toimisivat yhteisen linjan mukaan. CLT-rakenteiden kosteuspitoisuuden jatkuva seuranta aina tuotannosta käyttöön asti on nykyisillä mittalaitteilla mahdollista, mutta yhteinen linja seurannan toteutuksesta puuttuu.

Loppukäyttäjälle näkyvin merkki CLT-rakenteiden kosteudenhallinnan laadusta on näkyvien CLT-rakenteiden pintojen halkeilu. Pintojen halkeilu on ilmiönä väistämätön, mutta halkeiluun laatuun voidaan vaikuttaa kaikissa rakentamisen vaiheissa, kun osapuolilla on yhteinen tavoitetila.

Lähdeluettelo

- [1] Puuinfo, 2020, Tekniset tiedotteet, Kosteudenhallinta puurakentamisessa.
- [2] The CLT Handbook, CLT structures – facts and planning, Swedish Wood, 2019.
- [3] Air leakages through cross laminated timber (CLT) constructions, Norja.
- [4] RIL 244-2007 Puurakenteiden jäykistyksen ja halkeilun hallinta, Suunnittelu- ja valmistusohjeet, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, 2007.
- [5] Henri Hakkarainen, CLT-rakentamisen työaikainen kosteudenhallinta ja -seuranta, Karelia, 2018.
- [6] Janne Pasanen, CLT-rakenteiden kosteuskäyttäytyminen rakennuksen käytön aikana, Karelia, 2019.
- [7] Guidance Note – Visual quality, User instructions and general information for CLT elements with visible surface (VI quality), Stora Enso, versio 1.0, 2021.
- [8] Johan Öberg, Erik Wiege, Moisture risks with CLT-panels subjected to outdoor climate during construction -focus on mould and wetting processes, KTH 2018.
- [9] Moisture-proof CLT construction without a full temporary shelter, Swedish Wood, 2022.
- [10] Olsson L. CLT construction without weather protection requires extensive moisture control. *Journal of Building Physics*. 2021;45(1):5-35.
- [11] Brandstätter, F., Autengruber, M., Lukacevic, M. *et al.* Prediction of moisture-induced cracks in wooden cross sections using finite element simulations. *Wood Sci Technol* **57**, 671–701, 2023.
- [12] Wood Handbook, Wood as an Engineering Material, United States Department of Agriculture, Forrest Products Laboratory, General Technical report FPL-GTR-190, 2010

Ilmakiertoisen kuivatuksen jaksottainen käyttö

Pasi Lehtimäki¹, Pauli Sekki² ja Esa Tommola¹

¹ SafeDrying Oy

² AFRY Rakennusfysiikka

Tiivistelmä

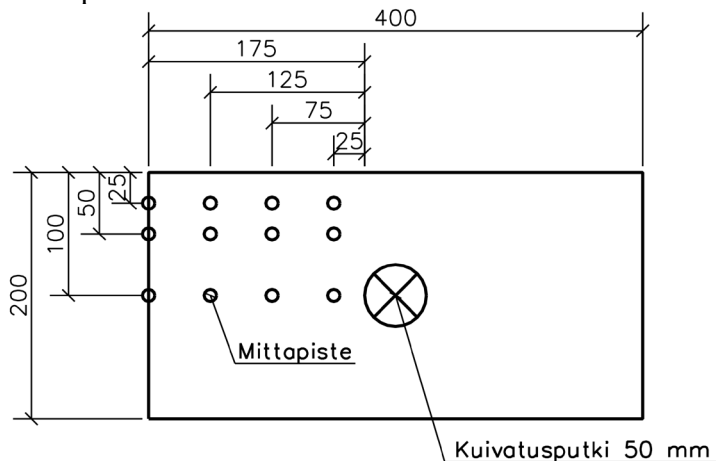
Ilmakiertoista kuivatusta on käytetty uudishankkeissa paksuhkoissa lattiavaluissa nopeuttamaan ja varmistamaan rakenteen kuivumista. Haasteena näissä kohteissa on ollut suuri sähkötehon ja -energian tarve, kun kuivatettavana on laajoja lattiapinta-aloja. Tässä tutkimuksessa selvitettiin simuloinnin avulla, miten erilaiset kuivatuksen käyttöaikajaksotukset vaikuttavat kuivatuksen nopeuteen. Simulointituloksien perusteella voitiin todeta, että kuivuminen on kaikissa jaksotustapauksissa selvästi nopeampaa kuin vapaa kuivuminen. Erityisen merkittäviä eroja ei syntynyt eri jaksotusvaihtoehtojen välillä, mutta lyhyemmät syklit näyttivät toimivan hieman tehokkaammin. Tulosten perusteella ilmakiertoisen kuivatuksen jaksottamisella voidaan päästä merkittävään energiansäästöön noin 25 % jatkuvasta käytöstä ilman, että kuivatusteho merkittävästi heikkenee.

1. Johdanto

Ilmakiertoinen kuivatusjärjestelmä mahdollistaa lattiabetonirakenteelle kolmannen kuivumissuunnan: ylös- ja alaspäin suuntien lisäksi rakenteen sisälle asennettuun kuivatuskanavaan päin. Kun rakenne päällystetään kosteutta heikosti läpäisevällä pinnoitteella, betonin kosteus ei jää rakenteeseen sillä sen on mahdollista tuulettua rakenteen sisällä olevan kuivatuskanavan kautta ulos. Yksi sovelluskohde tällaiselle ilmakiertoiselle kuivatukselle on isot paksuhkot lattiavalupinnat. Suuret pinta-alat vaativat suuret kuivatusilmavirrat, jolloin kuivatuslaitteistojen käyttö sähkötehot nousevat myös suuriksi. Tutkimuksessa vertaillaan jaksottaisen käytön vaikutusta rakenteen kuivumiseen.

2. Tutkimusjärjestely

Laskennallista tarkastelua varten luotiin kuvan 1 mukainen malli. Tarkastelumallin leveys on 400 mm, korkeus 200 mm ja syvyys 600 mm. Mallissa vain rakenteen yläpinta on avoin, josta kosteus pääsee poistumaan.



Kuva 1. Tarkastelumallin poikkileikkaus ja sen mittapisteiden sijoitus.

Kappaleessa on symmetrisesti keskilinjalla yksi pituussuuntainen halkaisijaltaan 50 mm kuivatusputki. Kuivumissuunta on rajattu yläpintaan ja kuivatusputkessa liikkuvaan ilmaan päin. Betonivalu on S100, C20 luokan betonilla ohjeen mukaisella vesimäärällä tehty 3,0 litraa vettä per 25 kg.

Laskennallinen tarkastelu tehtiin 2d-tarkasteluna Comsol Multiphysics -laskentaohjelmalla ajasta riippuvana simulointina. Laskennassa hyödynnettiin AFRYn laatimaa betonimateriaalimallia, jolla voidaan huomioida lämpötilan vaikutus betonin suhteelliseen kosteuteen [1]. Ilmakierron kuivattava vaikutus mallinnettiin Comsolin kosteudensiirtomoduulin konvektiivisen kosteudensiirron reunaehdolla, joka kuvastaa isotermistä pakotettua putkivirtausta. Vaikka mallinnus ei koskaan täysin vastaa käytäntöä, mutta kyseisellä mallilla pyritään selvittämään mm. kuivatusjaksojen pituuden vaikutusta kuivumiseen verrattuna vapaaseen kuivumiseen.

Tarkasteltiin seuraavat tapaukset:

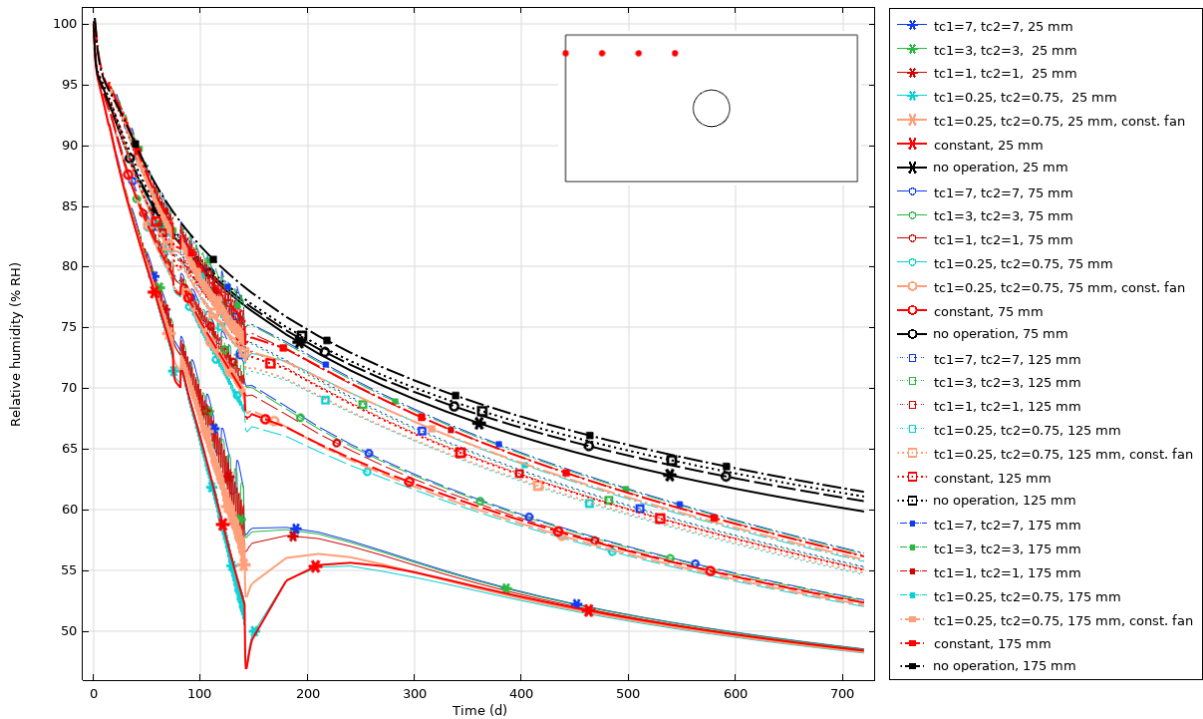
1. **tc1=7, tc2=7**: Tehokuivatuksen ja ilmapuhalluksen jaksotus 7/7 vrk (käynti 50 %)
2. **tc1=3, tc2=3**: Tehokuivatuksen ja ilmapuhalluksen jaksotus 3/3 vrk (käynti 50 %)
3. **tc1=1, tc2=1**: Tehokuivatuksen ja ilmapuhalluksen jaksotus 1/1 vrk (käynti 50 %):
4. **tc1=0.25, tc2=0.75**: Tehokuivatuksen ja ilmapuhalluksen jaksotus 1/4 vrk (käynti 25 %)
5. **tc1=0.25, tc2=0.75 const.fan**: Tehokuivatus 1/4 vrk (käynti 25 %), jatkuva ilmapuhallus
6. **constant**: Tehokuivatus ja ilmapuhallus jatkuvana 100 %
7. **no operation**: Kuivuminen ilman tehokuivatusta ja ilmapuhallusta

Tarkastelussa valun annetaan kuivua vapaasti 14 päivää ilman tehokuivatusta ja ilmapuhallusta. Sen jälkeen tarkastelussa on 60 päivän tehokuivatusjakso, jonka jälkeen on seitsemän vuorokauden tasaantumisjakso, jotta RH lukemat eri tapausten kesken voidaan vertailla (ei lämpötilaeron vaikutusta). Seuraavana uusi 60 päivän jakso ja toinen seitsemän vuorokauden tasaantumisjakso. Tehokuivatusjaksossa valun keskellä olevassa kuivatusputkessa kuivatusilman virtausnopeus oli 5 m/s ja ilman olosuhde oli vakio lämpötilan ollessa 40 °C ja sen suhteellisen kosteuden ollessa 5 % RH). Tehokuivatusjaksojen jälkeen järjestelmää käytettiin jatkuvasti ilmapuhalluksella ilman lämmitystä ja kuivatusta keskimääräisiksi arvioituilla sisäilman olosuhteilla 20 °C ja 50 % RH.

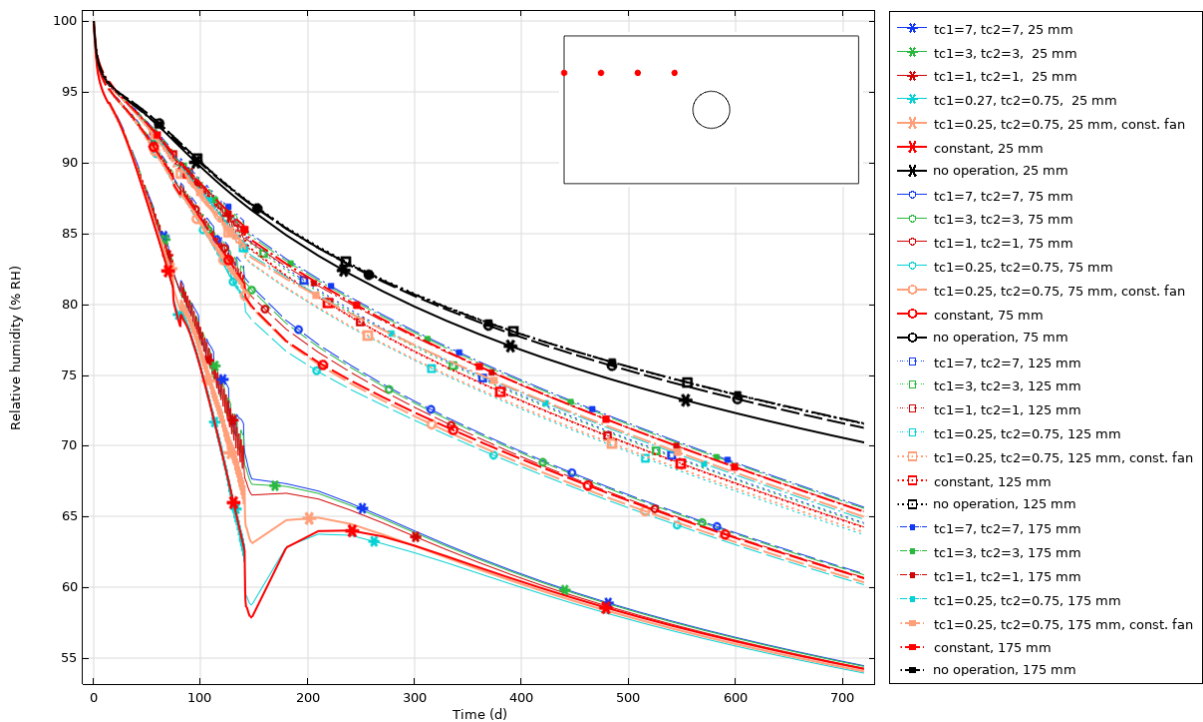
Tarkastelupisteiden sijainneiksi valittiin 25 mm tuuletusputkesta sekä siitä 50 mm välein 25 mm, 75 mm, 125 mm ja 175 mm (koekappaleen ulkoreuna). Tarkastelusyvytydet olivat 25 mm, 50 mm ja 100 mm. Pisteiden sijainti on esitetty kuvassa 1.

3. Tulokset ja tulosten tarkastelu

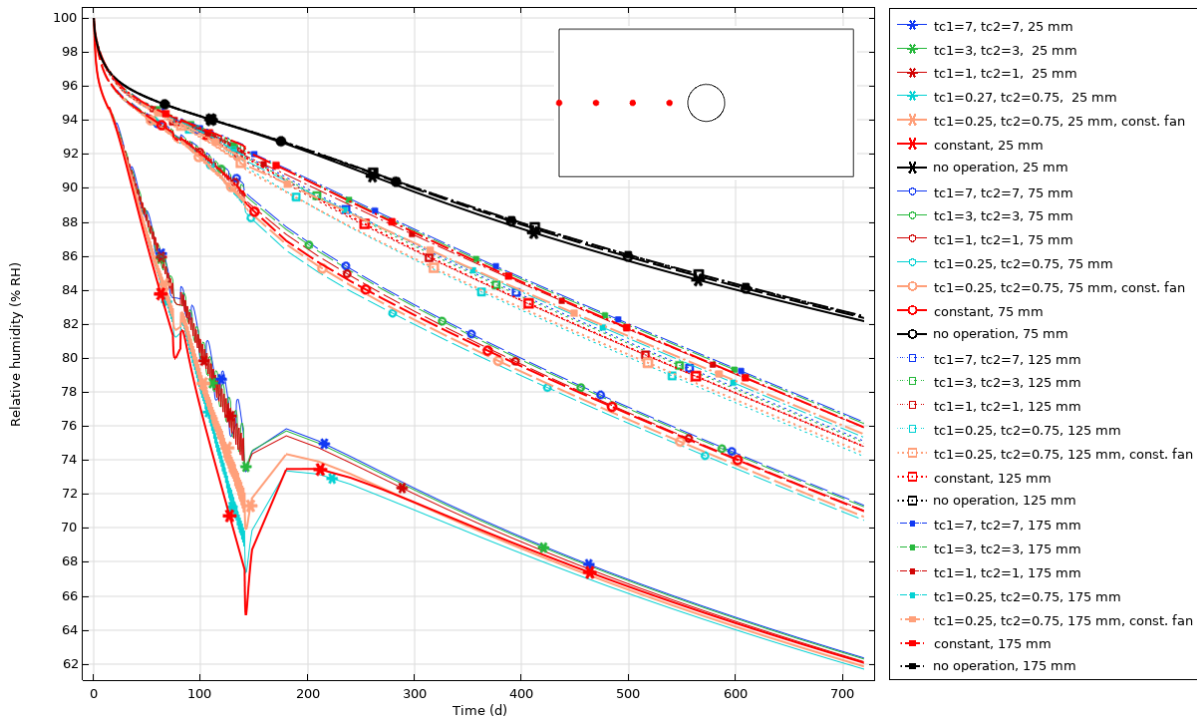
Kuivatuksen simulointitulokset on esitetty kuvissa 2–4 eri mittausvyvyksillä. Yleisesti voidaan todeta, että kuivuminen on sitä nopeampaa mitä lähempänä pintaa ja kuivatusputkea kuivumista seurataan. Eri aikajaksotuksilla voidaan havaita, että suurimmat erot syntyvät lähellä kuivatusputkea (25 mm etäisyydellä) olevissa mittauspisteissä. Etäämmällä olevissa mittauspisteissä hajonta eri aikajaksotuksilla on selvästi pienempi. Kuitenkin, kun verrataan tilanteeseen, jossa kuivatusputken kautta ei ole kuivatusta, ero selvempi ja suurempi mitä syvemmältä mittauspisteitä tarkastellaan.



Kuva 2. Rakenteen kuivuminen eri jaksotuksilla, mittauspiste 25 mm etäisyydellä yläpinnasta.

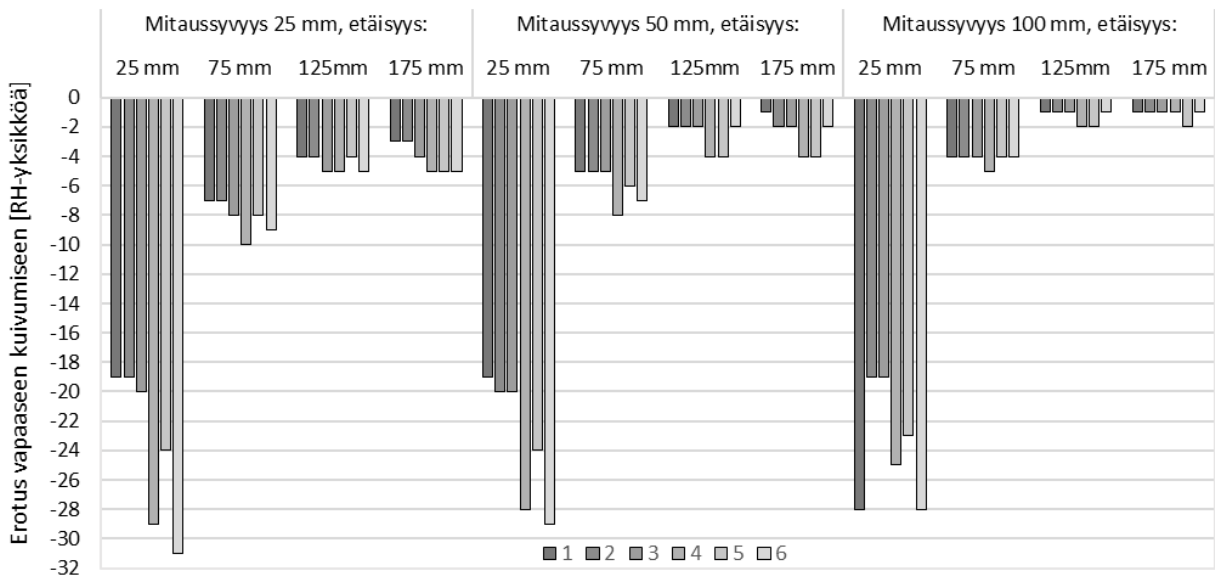


Kuva 3. Rakenteen kuivuminen eri jaksotuksilla, mittauspiste 50 mm etäisyydellä yläpinnasta.



Kuva 4. Rakenteen kuivuminen eri jaksotuksilla, mittauspiste 100 mm etäisyydellä yläpinnasta.

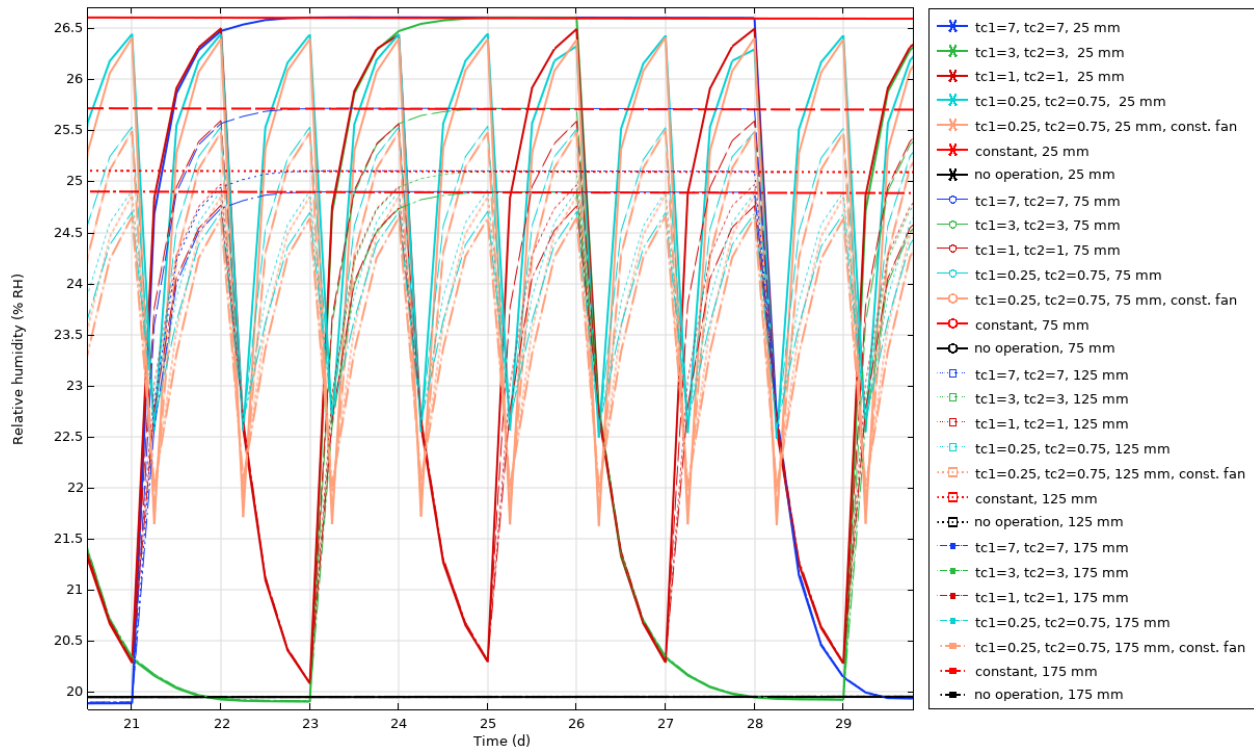
Simulaatiossa oli tasaantumisjaksot 60 päivän ja 120 päivän kohdalla, jolloin tehokuivatus pysäytettiin ja rakenteen lämpötila tasaantui. Tasaantuminen oli tarpeen, jotta lämpötilan vaikutus suhteellisen kosteuden arvoon saatiin vertailukelpoiseksi. Kuvassa 5 on koostettu 120 päivän tasaantumiskohdan suhteellisen kosteuden arvojen erotus eri kuivatustapausten ja vapaan kuivumisen välillä. Kuvassa on eroteltu tulokset eri mittaussyvyyksillä ja eri etäisyyksiltä kuivatusputkista.



Kuva 5. Rakenteen suhteellisen kosteuden erotus eri mittapisteissä 120 päivän kuivumisen jälkeen verrattuna vapaaseen kuivumiseen.

Erotusten perusteella voidaan havaita, että erityisen merkittäviä eroja eri tehokuivatusjaksotusten välillä ei ole mentäessä etämmälle kuivatusputkesta. Tarkastelusyvyydestä riippuen ero vapaaseen kuivumiseen verrattuna on 1–5 % RH. Erityisesti 100 mm syvyydellä eri tapausten

väliset erot ovat pintaosaa (25 mm mittaussyvyys) lukuun ottamatta vähäiset. Lähempänä pintaa olevien mittaussyvyyksien perusteella (25 ja 50 mm) tapaukset 4–6 antavat hieman alhaisempia suhtellisen kosteuden arvoja. Näin ollen jopa 25 % käyttöjaksolla voidaan saavuttaa tulosten perusteella lähes jatkuvaa kuivatusta vastaava kuivatusteho, kunhan jaksotus on riittävän tiheä esim. käyttöjakso 6/24 tuntia kuten tapauksissa 4 ja 5. Havaintoa voidaan selittää tarkastelemalla lämpötilojen käyttäytymistä eri jaksotuksilla (kuva 6). Tuloksista voidaan havaita että pitkällä syklijaksolla 7/7 päivää, rakenteen lämpötila ehtii tasaantua huoneen lämpöiseksi ennen uuden seitsemän päivän tehokuivatusjakson alkamista. Mitä lyhyempi sykli on, sitä vähemmän rakenne ehtii jäähtyä.



Kuva 6. Lämpötilat 100 mm syvyydeltä käyttöjaksolta eri jaksotusvaihtoehdoilla.

4. Johtopäätökset

Laskennallisen tarkastelun perusteella ilmakiertoisen kuivatuksen käyttö nopeuttaa betonilaatan kuivumista verrattuna vapaaseen kuivumiseen, joka tapahtuu ainoastaan laatan yläpinnan kautta. Tavanomainen tapa tehokuivattaa rakennetta käyttämällä järjestelmää jatkuvasti kuivattaa tulosten perusteella rakennetta tehokkaimmin. Kuitenkin jaksottamalla käyttöä siten, että järjestelmää käytetään vuorokaudessa vain 6 tuntia (25 % käyttö) antaa lähes vastaavan kuivatustehon. Tulosten perusteella järjestelmän jaksottaisella käytöllä voidaan päästä merkittävään energian säästöön. Toisaalta jaksottaiskäytön avulla on mahdollista kasvattaa kuivatuslaitteiston kuivatusaluepinta-alaa, kun esimerkiksi yhdellä laitteistolla voidaan vuorottelukäytöllä korvata kaksi kuivatuslaitteistoa. Näin ollen voidaan myös tarvittava sähköteho edelleen puolittaa.

5. Yhteenveto

Tutkimuksessa selvitettiin laskennallisesti ilmakiertoisen kuivatusjärjestelmän jaksottaista käyttöä rakenteessa, jossa kuivatuskanava on sijoitettu 200 mm lattiabetonivaluun nopeuttamaan ja varmistamaan rakenteen kuivuminen. Vertailutapauksen ollut tapaus, jossa rakenne kuivuu

vapaasti ilman kuivatusjärjestelmää, oli kuivumisen kannalta selkeästi hitainta erityisesti kuivatusputkiston läheisyydeltä tarkasteltuna. Eri jaksotuksilla päästiin hyvin lähelle jatkuvan käytön kuivatustehoa. Sen sijaan eri jaksotusten välillä ei ollut kuivumisessa erityisen merkittäviä eroja, mutta lyhyemmät syklit vaikuttavat olevan hieman tehokkaampia. Tulosten perusteella kuivatuslaitteiston käyttöaikaa voidaan jaksottaa ilman, että rakenteen kuivumisnopeus merkittävästi hidastuisi.

Lähdeluettelo

- [1] Lehtimäki, P. Tommola, E. ja Sekki, P. 2021. Paksun betonipalkin kuivattaminen ilmakiertoisella kuivatusjärjestelmällä. Rakennusfysiikka 2021. Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut: 26.–28.10.2021, Tampere. Seminaarijulkaisu 7 - Osa 1. 131-136

Lähes 200 toteutettua kohdetta - kokemuksia viidestä kuivatuspuhalluksella kuivaksi saadusta kiinteistöstä

Esa Tommola¹, Pasi Lehtimäki¹, Jouko Pakkanen² ja Santeri Härkönen³

¹ SafeDrying Oy

² Wild Software Oy

³ Tampereen ammattikorkeakoulu TAMK

Tiivistelmä

Ilmakiertoisella kuivatusjärjestelmällä on kuivattu tähän mennessä jo lähes 200 rakennusta. Mukana on ollut sekä korjauskohteita että uudisrakennuksia. Artikkeeliin on valittu viidestä erilaisesta kohteesta mielenkiintoisia havaintoja. Esiteltävät tapaukset ovat: tiiliseinän kapillaarinen kosteuden nousu maaperästä, ylhäältä päin tapahtuva vuoto, maanvarainen paksuhko betonilaatta, piilosokkelirakenne ja välipohjaholvin päällinen hiekkatäyttötila. Näissä kohteissa oli käytetty ilmakiertoisen kuivatusjärjestelmän erilaisia asennustapoja, yhteisenä tekijänä kuivatuksen perustuminen suljettuun koneellisesti kuivattuun ja lämmitettyyn ilmakiertoon, josta kertynyt kosteus johdetaan ulos. Kohteiden mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että ilmakiertoinen kuivatusjärjestelmä pystyy kuivattamaan myös poikkeusolosuhteista syntyneitä kosteuksia.

1. Johdanto

Patentoitua kuivatusjärjestelmää on Suomessa kehitetty v. 2010 alkaen. Sillä pystytään kuivattamaan nopeasti ja kustannustehokkaasti kiinteistöjen kivirakenteita sekä nopeuttamaan merkittävästi uudisrakennusten betonirakenteiden kuivumisaikaa. Tehokkuus perustuu kohdennettuun kuivattamiseen rakenteiden sisältä, jolloin saadaan rakenteeseen kolmas kuivumissuunta pintojen suuntaan (ylös/alas, sisään/ulos) kuivumisen lisäksi, jolloin kosteuden siirtymismatka lyhenee oleellisesti. Samalla kuivattava ja lämmitettävä ilmamäärä sekä energiamäärä on pieni verrattuna huonetilojen kautta tapahtuvaan kuivumiseen. Tämän ansiosta rakenteiden sisälle saadaan ulkopintoja paremmat kuivumisolosuhteet, ja kolmannen kuivumissuunnan on osoitettu olevan tehokkaampi kuin perinteiset kuivumissuunnat [1]. Järjestelmä pyritään myös suunnittelemaan siten, että kuivatuskanavat rakenteessa ovat alipaineisia, jolloin rakenteista vuotavien epäpuhtauksien riski päätyä sisätiloihin pienenee.

Kuivatuksen liittyvien reaaliaikaisten rakenneolosuhteiden mittausanturien avulla voidaan seurata rakenteen kuivumista ja varmistua siitä, että rakennetta on kuivattu riittävästi, jotta kosteuden aiheuttamat haitat olisivat minimoitu. Tutkimuksessa käytetty mittausanturi oli IOliving etäluettava STRL- kosteus- ja lämpötilalähetin, joissa oli mittauspäänä Ist:n valmistama HYT-271. Mitta-anturit ovat jatkuvatoimisia ja lähettävät mittaustiedot gsm-lähettimen avulla pilvipalveluun. Mittauksen avulla voidaan myös korjauskohteissa päätellä kosteuslähteitä ja perussyitä siihen miksi rakenne on kostunut ja kastuu mahdollisesti uudestaan, vaikka ajateltu kosteuslähde olisi korjauksessa poistettu. Näin onkin löydetty useasta kiinteistöstä primääri- ja sekundääriolosuhteiden lisäksi sekundäärinen kosteuden aiheuttaja.

Kohteissa käytetty ilmakiertoinen järjestelmä perustuu seinä-, lattia- ja/tai kattorakenteeseen asennettuun ilmanavastoon, jossa kierrätetään koneellisesti lämmitettyä ja kuivattua ilmaa. Lämmön ja kiertoilman alhaisen kosteussisällön avulla saadaan rakenteesta kosteus siirtymään

kuivatusilmaan ja tämä kosteus tuuletetaan kuivatusyksikön kautta ulos. Kuvassa 1 on esitetty lattiaan sijoitettu kuivatuskanavisto sekä kuivatusyksikkö, jossa ilma puhalletaan, lämmitetään ja kuivataan.



Kuva 1. Kuivatusjärjestelmän toimintaperiaate [2].

Tähän tutkimukseen valikoitiin erilaisia kuivatusjärjestelmän sovellustapoja. Tarkoituksena oli havainnollistaa kohteissa suoritettujen lämpötila- ja kosteusmittausten avulla, miten kuivatusjärjestelmä pystyy kuivattamaan rakenteita, ja toisaalta miten erilaiset kosteuden lähteet vaikuttavat rakenteissa.

2. Seurantakohteiden mittaustuloksia

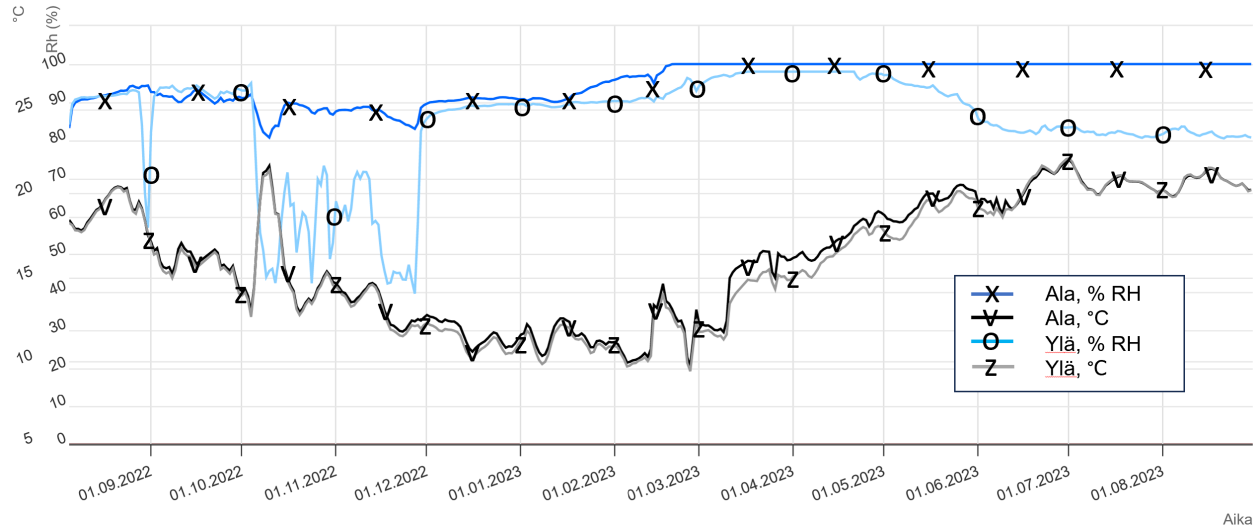
2.1 Kohde A, kapillaarinen kosteus kastelee peruskorjattua 1900-luvun alun rakennusta

Kohde on 1910-luvulla kalliolle perustettu useampikerroksinen tiilirunkoinen talo. Se on peruskorjattu vuosina 2020–2023, jolloin mm. kohteen ulkopuolelle louhittiin kallioon salaojat. Louhittu ura valettiin haluttuun muotoon sekä vedeneristettiin ennen salaojien asennusta ja täyttökerroksia. Myös sisäpuolelle tehtiin salaojia. Koska oli pelkoa, että näistä toimenpiteistä huolimatta kohteen perustuksiin voisi kalliohalkeamista päästä kosteutta, niin kantaville seinälinjoille asennettiin ilmakiertoinen kuivatusjärjestelmä.

Kohteeseen asennettiin alimpaan kerrokseen useita etäluettavia mittauspisteitä, joiden avulla valvotaan kohteen kuivumista sekä mahdollista kastumista. Mitta-anturit ovat päällekkäiset niin, että alempi on noin 15 cm lattiapinnan alapuolella ja ylempi lattiantasossa syvyysuunnassa etäisyyden ollessa n. 10 cm tiiliseinän sisäpinnasta.

Kuvassa 2 on havaittavissa alemmassa mittauspisteessä lattiapinnoituksen jälkeen tapahtuva kapillaarinen kosteuden nousu. Nousu ajoittuu lattian valun ja lattiapinnoitteiden asennuksen jälkeiseen aikaan, jolloin tiilirakenteisesta seinästä ei enää pääse haihtumaan kosteutta lattiatason alapuolella siinä määrin kuin ennen lattioiden tekoa. Kosteuden nousu on niin merkittävää, että alempi mittapiste pysyy koko ajan 100 % RH. Ylempi mittapiste on päässyt kuivumaan lattian rajassa olevan kuivatusjärjestelmän ansiosta, vaikka kosteus siinäkin pääsi nousemaan korkeimmillaan 98 % RH. 10/2022–12/2022 aikavälillä olevat kuivemmat suhteellisen kosteuden arvot johtuvat siitä, että mitta-anturi on ollut irti seinästä tuolla aikavälillä. Muissa kiinteistön mittapisteissä kosteudet ovat olleet tätä mittapisteparia matalammalla tasolla. Yhteistä kuitenkin

on, että syvemmällä sijaitsevassa mittapisteessä on kosteampaa kuin ylempässä mittapisteessä.

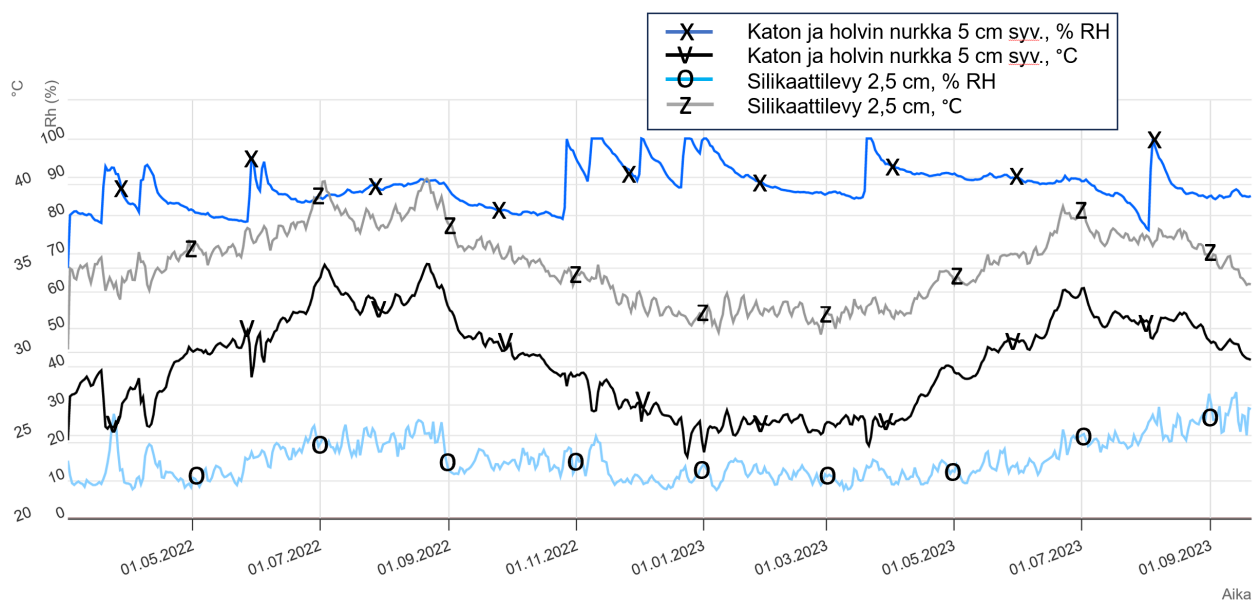


Kuva 2. Kosteus ja lämpötila seinärakenteessa n. 15 cm lattiapinnan alapuolella (ala) ja lattiantasossa (ylä), n. 10 cm syvyydessä vaakasuunnassa seinän sisäpinnasta.

2.2 Kohde B, autokannen läpi tapahtuvat vuodot

Kohde on vuonna 1983 rakennettu kerrostalo, jonka kellarikerroksessa sijaitsee päiväkodin tiloja päällä olevan autokannen alapuolella. Betonirakenteisen autokannen läpi on tullut vesivuotoja muutaman huonetilan alueella. Kosteusongelmalliselle alueelle on asennettu kalsiumsilikaattilevy, jota kuivataan ilmakiertoisella kuivatuskanavistolla. Ilmakiertoinen kuivatus kuivattaa kalsiumsilikaattilevyyn sitoutuneen kosteuden ja kuivattaa sen yläpuolella olevaa betonirakennetta. Kyseinen betonirakenne kastuu ajoittain ylhäältä vuotavasta vedestä.

Kuvassa 3 on esitetty katon ja holvin nurkassa 5 cm syvyydeltä kosteuskäyttäytyminen. Kastumisajankohdat näkyvät kosteuksien nousupiikkeinä. Talvella autokannella oli aurattu lumia vuotoalueen päälle, joka näkyy tihentyneenä kostumisten määränä. Samanaikaisesti kuivatuskanavan sisällä olevan kalsiumsilikaattilevy on pysynyt kuivana.

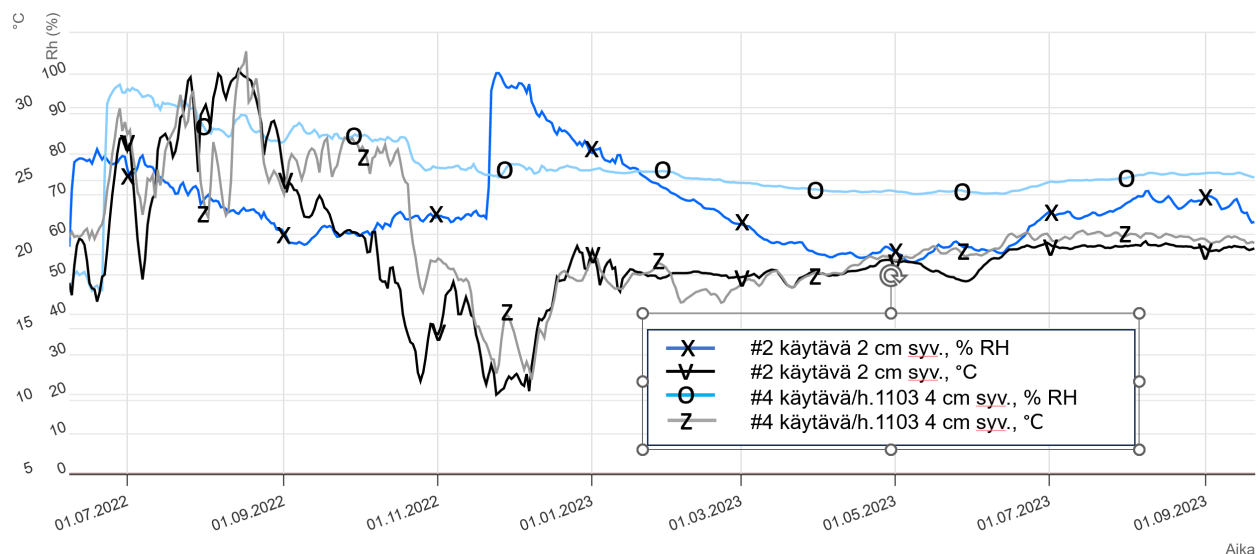


Kuva 3. Kosteus ja lämpötila katon ja holvin nurkassa 5 cm syvyydessä sekä silikaattilevyssä 2,5 cm syvyydessä.

2.3 Kohde C, rakenteilla olleen rakennuksen kastuminen

Kohde on v. 2023 valmistunut terveyskeskus, jossa alapohjarakenteena on 250 mm paksu kantava paalutettu laatta. Tilaaja ja työmaajohto halusi ilmakiertoisen kuivatusjärjestelmän aikataulukriittiseen alapohjaan. Järjestelmän avulla työmaan rakennusaikaa saatiin lyhennettyä 3 kk. Kohteeseen asennettiin useita etäluettavia mitta-antureita eri puolille rakennusta. Myös kuivatusjärjestelmän rakenteisiin menevän ja sieltä palaavan ilman olosuhteita seurattiin ja todettiin kosteuden poistuma. Kohteeseen ei asennettu mitta-antureita heti lattian valun jälkeen vaan myöhemmin, jotteivat mitta-anturit vahingoittuneet kosteuden vaikutuksesta.

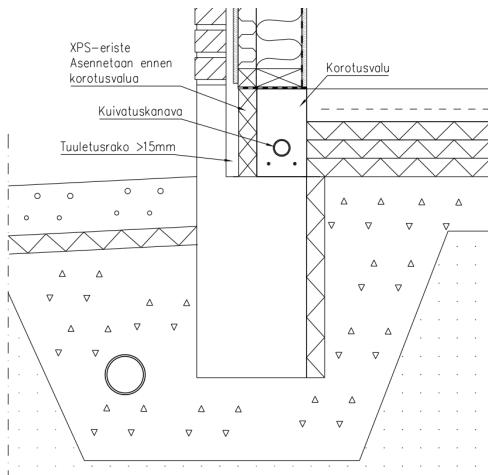
Kohteessa tapahtui rakennusaikana vesivahinko, joka paljastui heti mittauksen valvonnan hälytettyä kohonneista kosteuksista, ja josta voitiin raportoida myös työmaata. Vesivahingon aiheuttama kosteuspiikki näkyy kuvassa 4. Samanaikaisesti sen viereisten mittapisteiden kosteudet nousivat samalla tavalla, mutta muualla rakennuksessa sijaitsevista mittapisteistä ei havaittu kosteuden nousua. Kosteus pääsi imeytymään betoniin lukuisten alhaalta läpi tulevien putkien reunoja pitkin. Kuivatusjärjestelmän ansiosta työmaa saatiin määräaikaan pinnoituskuivaksi. Kohteen valmistuttua rakenteisiin jätettiin tuuletuskierto kuivatuskanavistoihin, jolla varmistetaan, ettei kosteus nouse liiaksi käytönaikana. Mikäli valvonnassa huomattaisiin kosteuden nousua, niin tehokuivatus voidaan palauttaa ja saada aikaan tehokas kuivuminen, vaikka kiinteistö on normaalisti käytössä.



Kuva 4. Kosteus ja lämpötila mittauskohdassa, joka oli vesivahinkoalueella (#2 käytävä 2 cm syv.) sekä mittauskohdasta, joka ei ollut kosteusvahinkoalueella (#4 käytävä/h.1103 4 cm syv.).

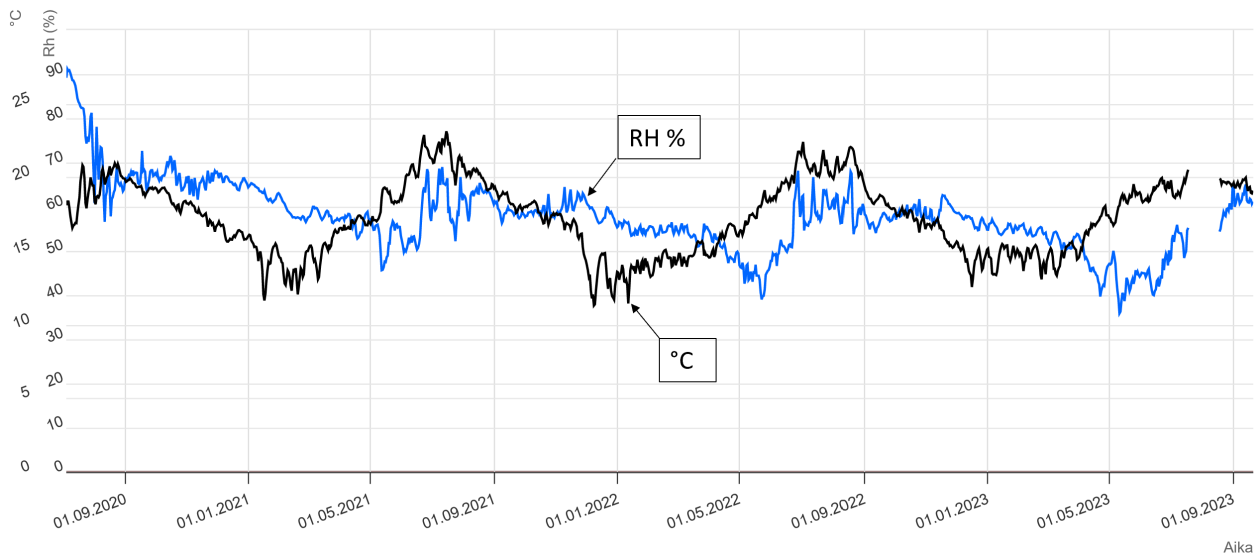
2.4 Kohde D, piilosokkelin kuivatus

Kohde on 1980-luvulla rakennettu omakotitalo, jossa piilosokkelirakenne korjattiin nostamalla alasidepuu ylemmäksi ja valamalla syntynyt onkalo kevytsorabetonilla kuvan 5 periaateleikkauksen mukaisesti. Valuun asennettiin ilmakiertoinen kuivatusjärjestelmä. Tavoitteena oli välttää samassa yhteydessä salaojaremontti, joka osittain olisi ollut tontilla myös vaikea toteuttaa.



Kuva 5. Rakenneleikkaus korjauksesta sekä kuivatuskanavan sijainti

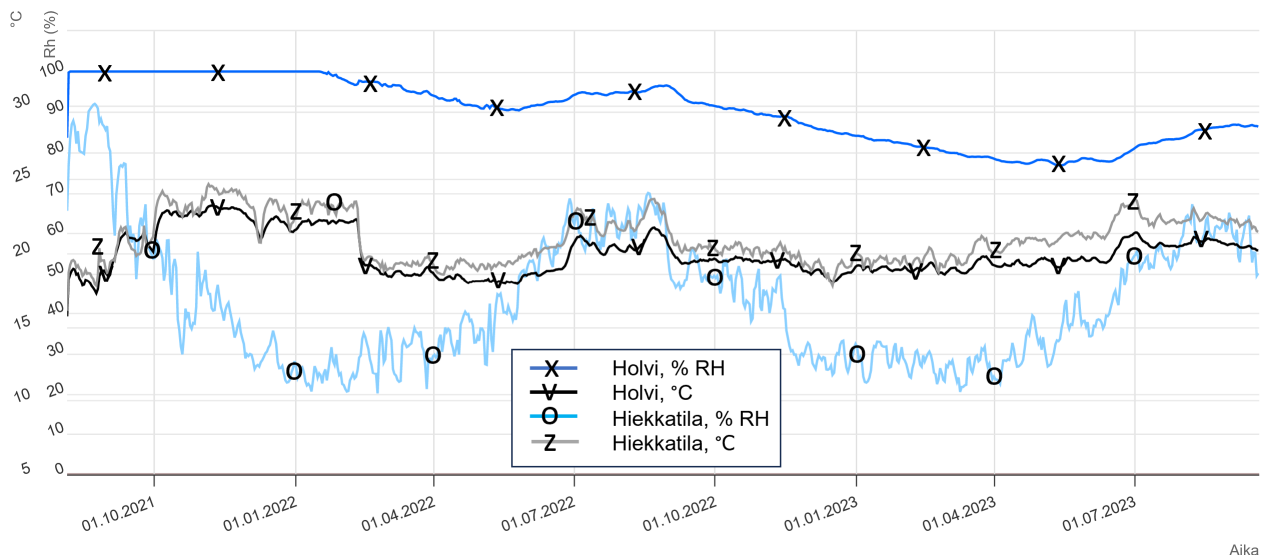
Alkuvaiheessa käytettiin kuivattua ilmaa rakenteiden saamiseksi kuiviksi: kuvassa 6 näkyvä alkupään nopea kosteuden laskuvaihe. Sen jälkeen rakenteissa on ollut vain tuuletuspuhallus käytössä. Kosteudet vaihtelevat normaalin vuosivaihtelun mukaisesti.



Kuva 6. Rakenteen kosteuskäyttäytyminen kolmen vuoden aikajaksolta.

2.5 Kohde E, olemassa olevan väestönsuojan holvin kuivaaminen

Kohde on 1980-luvulla rakennettu kerrostalo, jonka kellarissa on väestönsuoja. Väestönsuojan 300 mm paksu holvi oli päässyt kastumaan tiikuvuodon vaikutuksesta. Kohteessa oli yritetty kuivattaa holvia 6 kuukautta kuitenkin siinä onnistumatta. Holvin päälle välitilan hiekkään asennettiin ilmakiertoinen kuivatus. Näin päällä olevat asunnot voitiin ennallistaa välittömästi asumiskäyttöön. Holvin pintaosat olivat lähtötilanteessa 100 % RH kosteudessa kuvan 7 mukaisesti. Kuivatuksen alkuvaiheessa hiekkatilan kosteus saatiin laskettua kuivaksi noin 30 % RH tasolle, jonka jälkeen mahdollistui myös holvin pinnan kuivuminen. Tehokuivatus lopetettiin kohteessa keväällä 2023, jonka jälkeen kosteudet ovat lähteneet tasaantumaan ylöspäin. Seuranta kohteessa jatketaan edelleen, kunnes voidaan olla varmoja, ettei kosteus aiheuta ongelmia asunnoille.



Aika

Kuva 7. Kosteus ja lämpötila väestönsuojan holvin yläpinnassa 5 cm mittaussyvytydessä sekä asuntojen lattianvalun ja holvipinnan välissä olevan hiekkatilassa.

Yhteenveto

Lähes kahdensadan tehdyn kohteen perusteella ilmakiertoisella kuivatusjärjestelmällä betoni-, tiili- ja vastaavat kivirakenteita on mahdollista saada kuiviksi ja pidettyä kuivina johtuivatpa ne rakennusaikaisesta tai kapillaarisesta kosteudesta. Myös tihkuvuotoja on mahdollista saada hallintaan. Jatkuvalle etävalvontaseurantamittauksella järjestelmällä on mahdollista havaita mahdollisia vesivuotoja mittauksien poikkeavuuksien avulla, jolloin niihin voidaan puuttua.

Lähdeluettelo

- [1] Timlin, H. 2019. Betonin rakennuskosteuden kuivatus valuun asennetulla kosteudenkeruukanavistolla. Diplomityö. Tampereen yliopisto.
- [2] Safedrying Oy. Kuva-arkisto.

Tervetalo-tarkastusasiakirja projektipankkiratkaisuna

Susanna Peltola¹, Marianna Tuomainen¹ ja Tiina Palviainen²

¹ Helsingin kaupunki, Kaupunkiympäristön toimiala

² IdeaStructura Oy

Tiivistelmä

Helsingin kaupungin, IdeaStructuran ja Buildercomin yhteistyönä kehitetyllä Tervetalo-työkalulla varmistetaan, että rakennushankkeissa valmistuvat rakennukset ovat turvallisia, terveellisiä ja pitkäikäisiä. Työkalu toimii muisti- ja tarkastuslistana, jolla hankeosapuolet yhdessä varmistavat, että sisäympäristön kannalta olennaiset asiat laadunvarmistuksineen on huomioitu. Työkalu sisältää vastaavanlaisia tehtäviä kuin KK10-järjestelmä [2], mutta tehtäväkokonaisuudet ovat laajempia sekä paremmin julkisen rakentamisen kohteisiin sopivia. Kosteudenhallinnan lisäksi tehtäviin on sisällytetty puhtaudenhallinnan, erityisesti P1-rakentamisen tarkastustehtäviä, sekä pitkäaikaiskestävyyttä ja ylläpitoa huomioivia tehtäviä.

Kehitetty Tervetalo-työkalu muodostuu eri hankevaiheiden tarkastusasiakirjoista, jotka sisältävät erilaisia tehtäväkokonaisuuksia. Jaottelun ansiosta työkalun muokkaus hankkeelle on nopeaa poistamalla tarpeettomia kokonaisuuksia kerralla. Myös myöhempi muokkaus on helppoa. Tervetalo-dokumentaation sijaitessa samassa tietojärjestelmässä kuin muu projektiaineisto, on aineiston hallinnointi helpompaa, ja myös linkitykset ylläpitojärjestelmään ovat mahdollisia.

1. Johdanto

Julkisissa rakennushankkeissa kiinnitetään nykyään erityistä huomiota kosteuden- ja puhtaudenhallintaan. Helsingin kaupungilla on ollut pitkään käytössä erilliset velvoittavat laadunvarmistusasiakirjat, joilla on pyritty huomioimaan olennaisimmat riskikohdat rakennushankkeissa. Ympäristöministeriön ns. kosteusasetuksen [1] astuttua voimaan on tullut lisääntynyt tarve dokumentoida tehtyjä kosteudenhallinnan toimenpiteitä. Toisaalta puhtaudenhallinnan toimien dokumentointi on usein keskittynyt lähinnä toimintakoevaiheen ja vastaanoton tarkastuksiin, vaikka rakentamisen aikainen olosuhteiden hallinta liittyy olennaisesti myös pölyhallintaan.

Rakennusluvan ehtona on aina kosteudenhallinnan laadunvarmistus kosteudenhallintaselvityksellä, nimeämällä kosteudenhallintakoordinaattori sekä kosteudenhallinnan laadunvarmistus joko Kuivaketju 10 -toimintamallin kautta [2], tai esimerkiksi Topten-kaupunkien yhteistä tarkastusraporttimallipohjaa täyttäen [3]. Usein vasta lupavaiheessa nimettävällä kosteudenhallintakoordinaattorilla voi olla puutteelliset mahdollisuudet vaikuttaa toteutusratkaisuihin, sillä ennen rakennusluvan hakemista suunnittelu on ollut käynnissä jo pitkään. Rakennusfysikaalisen suunnittelun rooli ja luonnosvaiheen aineistojen tarkastukset ovat tältä kannalta todella tärkeitä.

Työmaavaiheessa hankkeissa on ollut käytössä urakoitsijan ylläpitämiä tarkastusasiakirjoja ja omavalvontaa tukevia laadunvarmistusasiakirjoja, tilaajan valvojen omia tarkastuslistoja sekä kosteudenhallintatehtäviä, joiden sisältö ja laajuus on toteuttajasta riippuen usein hyvin vaihteleva. Toisaalta päällekkäisiä laadunvarmistustoimia tai useiden eri järjestelmien käyttämistä tulisi välttää. Myös erilaiset ympäristökriteeristöt, kuten RTS-sertifiointi tai Joutsenmerkki, ovat mukana rakennushankkeissa enenevässä määrin, ja aiheuttavat osaltaan tarvetta

dokumentaatioille. Tervetalo-työkalun avulla pyritään siihen, että edellä mainittu suunnittelun ja rakentamisen laatua varmistava työ ja dokumentointi tehtäisiin jatkossa samojen periaatteiden mukaisesti.

2. Tervetalo-työkalu

2.1 Tervetalo-työkalun osat

BEM-projektipankissa toimiva Tervetalo-työkalu muodostuu eri hankevaiheiden tarkastusasiakirjoista, jotka sisältävät erilaisia tehtäväkokonaisuuksia, joissa on tehtäväriivejä. Tarkastusasiakirjapohjat on laadittu hanke- ja ehdotussuunnitteluvaiheelle sisältäen tilaajan hankinnat, suunnitteluvaiheelle sekä rakentamisvaiheelle sisältäen työmaavalvonnan ja vastaanoton.

Tervetalo-työkalun käyttöönotossa mallitarkastusasiakirjan tehtäväriivit muokataan hankkeen ja kohteen ominaisuuksien mukaiseksi. Työkalu on jaoteltu ensisijaisesti rakenneosittain, minkä ohella on huomioitu omina osakokonaisuuksinaan myös muita Tervetalo-kriteereihin liittyviä riskejä ja toimenpiteitä, kuten rakennuksen lämpö- ja valaistusolosuhteet sekä ilmanvaihtojärjestelmän toiminta. Erikseen on huomioitu myös laadunvarmistustoimet, korjauskohteisiin liittyvät asiat, tarvittavat tutkimukset sekä tarkennukset hankinta-asiakirjoihin.

Jaottelun ansiosta muokkaus hankkeelle on helppoa ja nopeaa ja myös myöhempi muokkaaminen on mahdollista, jos hankkeen edetessä esimerkiksi rakenneratkaisut tai korjausten laajuus tarkentuvat. Työkalun lisäksi on laadittu erillinen ohjeistus tarkastusasiakirjojen käyttöönottoon ja käyttöön. Sähköisen projektipankkityökalun ohella työkaluihin kuuluu lupa- ja urakka-asiakirjoihin liitettävä Tervetalo-asiakirja, joka toimii tilaajan kosteudenhallinta-asiakirjana.

2.2 Tarkastusasiakirjan kehitys

Taustalla Tervetalo-työkalun kehittämisessä on ollut Helsingin kaupungin pitkäaikainen yhteistyö Buildercom Oy:n kanssa BEM-projektipankin ja -huoltokirjan räätälöimisessä kaupungin tarpeisiin sopivaksi niin rakennushankkeissa kuin ylläpidon työkaluna. Useimmat urakoitsijat käyttävät edelleen paperista rakennusvalvonnan asiakirjapohjaa, tai omavalvonnassa Excel - pohjaisia tarkastuslistoja. Jatkossa nämä dokumentaatiot on mahdollista tehdä sähköisesti suoraan BEM-projektipankin kautta.

Kehitystyössä on huomioitu hyvän rakentamisen ohjeistuksia soveltuvilta osin, esimerkiksi RIL107 [4], RIL250 [5], maarakentamiseen liittyvät RIL-ohjeet [6,7], BY lattia- ja julkisivurakenteiden ohjeistukset [8–10], erilaisia aiheeseen liittyviä RT-ohjekortteja [11], sisäilmastoluokituksen [12] ohjeita sekä myös päivityksessä olevia tervetalo-kriteeristöjä [13,14]. Myös Kuivaketju10-tehtävälister [2] sekä eri suunnittelualojen RT-tehtäväluettelot [15] on huomioitu, ja kaupungin omia suunnitteluohjeistuksia on tuotu tarkastustehtäviksi. Tavoitteena on ollut luoda tärkeimmistä asioista tarkastustehtävät, mutta pitää kuitenkin tehtävien määrä maltillisena. Toisaalta malliasiakirjoissa tehtäväkokonaisuuksia on paljon, sillä erilaisiin rakenneratkaisuihin liittyy eri tavalla huomioitavia asioita.

2.3 Tarkastusasiakirjamallit

Tervetalo-työkalussa on huomioitu erilaiset hankesisällöt sekä isojen rakennuskohteiden usein vaiheittainen suunnittelu. Erona esimerkiksi Kuivaketju10 -järjestelmään on se, että riskitehtävät

on jaoteltu rakenneosittain ja lisäksi on luotu yleistason ja eri rakenneratkaisujen tarkastustehtävät. Julkiset rakennushankkeet etenevät vaiheittain, minkä takia tehtävälister on koostettu vastaavasti hankkeen etenemisen mukaan tarkentuviksi. Työmaavaiheen tarkastusasiakirjassa on huomioitu kattavasti niin työmaan omien laadunvarmistussuunnitelmien laatiminen, kuin tekniset tarkastukset viimeistelyvaiheen tarkastuksineen.

Oletusarvoisesti kaikki hankkeessa syntyvä aineisto talletetaan yhteiseen BEM-projektipankkiin, jolloin projektipankissa toimiva Tervetalo-tarkastusasiakirja linkittyy suoraan samojen dokumenttien kansioihin ilman tarvetta päällekkäisille tallennuksille. Toisaalta työmaan omavalvontaa suorittavat työnjohtajat sekä tilaajan asettamat valvojat käyttävät usein erillistä sähköistä raportointijärjestelmää, esim. Congrid, jossa tuotettu aineisto voidaan sellaisenaan hyödyntää Tervetalo-työkalun tehtävien raportoinnissa. Suoraa linkitystä eri järjestelmien välille ei ole tehty, mutta loppuaineistovaiheessa muualle talletetut raportit on mahdollista tuoda projektipankkiin.

2.3.1 Malliasiakirjan muokkaus

Muokattaessa malliasiakirjoja hankkeelle on olennaista käydä läpi vastuutahot ja osallistujat niin, että tehtävät hyväksyy oikea taho. Tarpeettomien tehtävien poistaminen voi olla mahdollista tehdä etukäteen, mutta on suositeltavaa tehdä se yhdessä projektiryhmässä. Työmaavaiheen malliasiakirjaa muokatessa urakoitsijan ja valvojien omat laadunvalvontasuunnitelmat kannattaa käydä läpi ja pyrkiä välttämään päällekkäistä dokumentointia. Tervetalo-työkalun tehtäviä voi lisätä urakoitsijan tarkastusasiakirjaan ja viitata tarvittaessa työkalussa siihen, tai päinvastoin.

2.3.2 Tehtävien hyväksyntä

Tehtävät hyväksyy ao. suunnittelija tai muu vastuutaho. Omalle vastuualueelle kuuluvat tehtävät näkyvät tilasarakkeessa oranssina. Ennen hyväksymistä tehtävä linkitetään tarvittaessa projektipankissa olevaan asiakirjaan, tai kommentoidaan vapaana tekstinä, miten asia on huomioitu. Hyväksynnän jälkeen tehtävärivin tilasarake muuttuu vihreäksi. Tehtäväkokonaisuudet tarkastaa ja hyväksyy muu osapuoli, yleisimmin tervetalo-/kosteudenhallintakoordinaattori tai valvoja.

Kuka tahansa hankeosapuolista voi kommentoida kaikkia tehtäviä ja kommentit näkyvät tehtävänäkymässä. Muille kuin tehtäviä hyväksyville vastuutahoille annetaan Tervetalo-tarkastustyökaluun lukuoikeus, jolloin työkalusta on mahdollista seurata suunnittelun tai työmaavaiheen etenemistä, tai tarvittaessa kommentoida tehtävärivejä. Tehtävärivin hyväksyntä lukitsee tehtävän, eikä sen muokkaus ole enää mahdollista. Tervetalo-työkalua hallinnoiva kosteudenhallintakoordinaattori voi kuitenkin tarvittaessa poistaa hyväksynnän, mikäli tehty hyväksyntä on ollut ennenaikainen ja vaatii tarkennuksia.

Tarkastustehtävä

Muokkaa tehtävää

Hyväksy tehtävä

Nimi
Vanhat suunnitelma-aineistot on hankittu hankkeen käyttöön.

Tarkastustyyppi
Tarkastus

Ohjeet
Arkkitehti- ja rakennesuunnitelmista tarvitaan kaikki alkuperäiset suunnitelmat. Lisäksi tarvitaan alkuperäisten suunnitelmien jälkeen tehtyjen muutosten suunnitelmat.

Hyväksyjäroolit
Tilaaaja
(Susanna Peltola, Helsingin kaupunki, kaupunkiympäristön toimiala)

Osallistujat
Ei sisältöä.

Dokumentit ja kommentit

Lisää kommentti tai dokumentti

SP **Susanna Peltola** 18.10.2022 12.59 Muokkaa Poista
kuntotutkimusraportti puttuu

SP **Susanna Peltola** 18.9.2023 9.01 Muokkaa Poista
Kaikki aineisto on tallennettu projektipankkiin lähtötietoihin

Dokumentit

Nimi	Kuvaus
Kosteustekninen kuntotutkimusraportti 1.2.2020.docx	Ei sisältöä.

Sulje

Kuva 1. Tarkastustehtävään on liitetty myös ohjeita erityisesti huomioitavista asioista tai miten tehtävän hyväksyminen tulee todentaa. Tarkastustehtävää on kommentoitu ja siihen on linkitetty dokumentti.

2.3.3 Normaalinäkymän selkeys

Tarkastusasiakirjan tehtävien tilanteesta saa nopeasti käsityksen jo etusivulla värikoodien ansiosta. Omat, hyväksyntää odottavat tehtävät näkyvät oransseina, muiden hyväksyntää odottavat tehtävät näkyvät harmaina ja hyväksytyt tehtävät (omat ja muiden hyväksymät) näkyvät vihreinä. Myös vastuutahot näkyvät etusivulla. Tehtävät on helppo suodattaa suoraan etusivulta niin, että näkyville saa vain tietyn roolin tarkastustehtävät. Kommenttien määrä näkyy numerosarakkeessa ja avaamalla tehtävärivin kommentit ovat luettavissa. Järjestelmässä ei ole piiloon jääviä välilehtiä, vaan kaikki työstö tapahtuu etusivun kautta.

Rakentamisvaihe, malli Muokkaa tarkastusasiakirjaa Poista tarkastusasiakirja Luo uusi tarkastusasiakirja

Luontipvm 6.4.2022
Viimeisin muokkaaja: Peltola, Susanna / Helsingin kaupunki, kaupunkiympäristön toimiala Valitse tila Tyhjennä suodatukset

Nimi	Tarkastus...	Hyväksyjät	Osallistajat	Tila
1. TYÖMAAVAIHEEN KÄYNNISTYS				
1.1 YLEISET VAATIMUKSET		Kosteudenhallintakoordinaa...		0 0 ■
1.1.1 TEHTÄVÄT TARKENNUKSET				0 0 ■
Tervetila -tehtävien muutosten seuranta	Seuranta	Kosteudenhallintakoordinaa...		0 0 ■
Tilaajan, työmaan valvojen sekä kosteudenhallintakoordinaattorin tehtäv...	Tarkastus	Tilaaja	Kosteudenhallintakoordinaa...	0 0 ■
Tervetalo -työkalun työmaavaiheen tehtävät on hankkeen mukaistettu ja ...	Tarkastus	Kosteudenhallintakoordinaa...	Urakoitsija	0 0 ■
Tervetalo -työkalun tehtävistä tai sen osia on tarvittaessa kopioitu suur...	Tarkastus	Kosteudenhallintakoordinaa...	Urakoitsija	0 0 ■
Tervetalo -työkalun työmaavaiheen ohjeistus / koulutus on annettu työm...	Tarkastus	Kosteudenhallintakoordinaa...		1 0 ■ Hyväksytty (18.9)
Käyttäjämuidosten menettelytavat on sovittu rakennuttajan kanssa	Tarkastus	Tilaaja	Urakoitsija	0 0 ■
Kaikki suunnitelmista poikkeavat rakennusmateriaalit on hyväksytetty tila...	Tarkastus	Urakoitsija		2 2 ■ Odottaa hyväks
Suunnitelmista poikkeavat laitteet ja toteutusratkaisut on hyväksytetty su...	Tarkastus	Urakoitsija	Suunnittelijat	0 0 ■ Odottaa hyväks
Urakkaan kuuluvat toimitus- ja tarkastukset on suoritettu ennen luovutusta ...	Tarkastus	Urakoitsija	Valvojat	0 0 ■ Odottaa hyväks
Rakennuksen irtokalustuksen hankinnan osalta on noudatettu M1 pääst...	Tarkastus	Urakoitsija	Tilaaja	1 0 ■ Odottaa hyväks
Blackout -testaus on suoritettu urakoitsijoiden kanssa	Tarkastus	Urakoitsija	Valvojat	0 0 ■ Odottaa hyväks
1.2 RAKENTAMISVAIHEEN SUUNNITELMAT				
1.2.1 LAADUNVARMISTUS	Tarkastus	Kosteudenhallintakoordinaa...	Valvojat	0 0 ■
Pääurakoitsijan laatima yleisaikataulu on tarkastettu	Tarkastus	Tilaaja	Kaikki	0 0 ■
Pääurakoitsija on laatinut työmaalle urakkaohjelman ja urakkarajallitteen...	Tarkastus	Urakoitsija		0 0 ■ Odottaa hyväks

Kuva 2. Rakentamisvaiheen tarkastustehtäviä: Odottaa hyväksyntää -sarakkeen vieressä on värit harmaa – oranssi – vihreä sen mukaan, onko tehtävä hyväksytty vai odottamassa tarkastusta. Numerosarakkeessa näkyy kommenttien lukumäärä.

3. Pilotointi ja jatkokehitys

Työkalua on pilotoitu yksittäisissä hankkeissa ja koekäytön sekä testauksen kautta on havaittu kehitys- ja parannustarpeita.

Oleennaista jatkokehityksessä on huomioida työkalun käyttö niin suunnitteluhankinnoissa kuin urakan aikana. Lähtökohtaisesti suunnittelutehtävälueet eivät sisällä tämänkaltaisten järjestelmien täyttämistä osana suunnittelutehtäviä. Osa työkalussa olevista tehtävistä on suunnittelutoimeksiantoissa erillistilattavia. Nämä on kirjattu tehtävien ohjeisiin, jotta hankkeen vaatavuustason mukaiset asiat tulee huomioiduksi suunnitteluhankinnassa.

Tehtäviin ei ole ennakolta lisätty kaikkia erikoistilojen tai vastaavien harvemmin toteutettavien rakenteiden tehtäviä. Niiden lisääminen on mahdollista muokausvaiheessa. Erikoistilat on mahdollista lisätä myöhemmin myös malliasiakirjoihin, mikäli sille koetaan tarvetta.

Kehityskohteenä on työkalun raportointi – miten voidaan nopeasti tehdä koosteraportteja tai tulosteita järjestelmään tehdyistä tallennuksista. Myös työkalun tietojen tuonti ylläpitoa varten voi olla tulevaisuuden kehityskohteenä.

4. Yhteenveto

Tervetalo-tarkastusasiakirja on kehitetty nimenomaan Helsingin kaupungin rakennuttamiin erilaisiin uudis- ja peruskorjaushankkeisiin. Kohteet voivat vaihdella päiväkodista terveysasemaan tai uimahallista konserttitaloon, ja niiden ominaispiirteet sekä rakenneratkaisut

voivat olla hyvin erilaisia. Julkisessa rakentamisessa toteutettavien kohteiden moninaisuuden takia kehitetty tarkastusasiakirja on hyvin kattava ja monipuolinen, ja sitä voidaan soveltaa Tervetalo-kriteerejä varmistavana työkaluna useaan erilaiseen rakennushankkeeseen.

Lähdeluettelo

- [1] Ympäristöministeriön asetus rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta 782/2017 538 s.
- [2] Kuivaketju-10 -sivusto. Viitattu 31.8.2023. Saatavissa: www.rala.fi/fi/palvelut/kuivaketju10
- [3] Topten-ohjeet, Kosteudenhallinnan laadunvarmistusketjun tarkastusraportti, lomake YL07, raporttipohja 4.6.2019. Viitattu 31.8.2023. Saatavissa: www.toptenrava.fi
- [4] RIL 107-2022 Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet. ISBN 978-951-758-683-2. 2022. 233 s.
- [5] RIL 250-2020 Kosteudenhallinta ja homevaurioiden estäminen. ISBN 978-951-758-639-9. 2022. 332 s.
- [6] RIL 126-2020 Rakennuspohjan ja tonttialueenkuivatus. ISBN 978-951-758-658-0. 2020. 140 s.
- [7] RIL 234-2007 Pihojen pohja- ja päällysrakenteet, Suunnittelu- ja rakentamisohjeet. ISBN 978-951-758-475-3. 2007. 122 s.
- [8] by 45 bly 7 Betonilattiat 2018. ISBN 978-952-68619-9-9. 2018. 198 s.
- [9] by 42 Betonijulkisivun kuntotutkimus 2019. ISBN 978-952-731-401-2. 2019. 136 s.
- [10] by 75 Muurattujen ja rapattujen julkisivujen kuntotutkimus 2021. ISBN 978-952-731-405-0. 2021. 180 s.
- [11] RT-kortit. Viitattu 31.8.2023. Saatavilla: <https://kortistot.rakennustieto.fi/kortistot/rt-kortisto?navref=Main>
- [12] Sisäilmastoluokitus 2018. Viitattu 31.8.2023. Saatavilla: <https://kortistot.rakennustieto.fi/resource/juha/content/24863#page=1>
- [13] RT 07-10805 Terveen talon toteutuksen kriteerit. Kriteerit ja ohjeet toimitilarakentamiselle. 2003. Viitattu 31.8.2023. Saatavilla: <https://kortistot.rakennustieto.fi/resource/juha/content/8667#page=1>
- [14] RT 07-10832 Terveen talon toteutuksen kriteerit. Kriteerit ja ohjeet asuntorakentamiselle. 2004. Viitattu 31.8.2023. Saatavilla: https://kortistot.rakennustieto.fi/session/kortit/RT%2007-10805?external_system=Juha&page=1&navref=Search
- [15] Eri suunnittelualojen RT-tehtävälueetlot. Viitattu 31.8.2023. Saatavilla: <https://kortistot.rakennustieto.fi/search?query=teht%C3%A4v%C3%A4luettelot&page=2&searchFor=files>

A5. Rakenteiden kosteusvauriot ja korjaus

Kuntoarviot vääristävät tieteellisten sisäilmatutkimusten tuloksia?

Vesa Koskinen^{1,2}, Vuokko Lappalainen¹, Timo Murtoniemi¹ ja Tommi Vehviläinen¹

¹ Sirate Group Oy

² Turun yliopisto, Fysiikan ja tähtitieteen laitos

Tiivistelmä

Lainsäädäntö ja ohjeistukset ohjaavat yksiselitteisesti selvittämään rakennusten sisäilmaongelmia kuntotutkimuksin, joissa esimerkiksi rakenteet tutkitaan rakenneavauksin ja materiaalinäyttein. Kuntotutkimuksissa kuntoarviomenetelmiin rinnastettava aistinvarainen katselmus on osa lähtötietoselvityksiä, joiden perusteella laaditaan tutkimussuunnitelma. Sen sijaan tieteellisissä sisäilmatutkimuksissa kuntoarviomenetelmin tehdyt katselmuksot ovat kyselyiden ohella usein ensisijainen tai ainoa keino luokiteltaessa rakennuksia vaurio- ja verrokkikohteiksi. Tässä artikkelissa todetaan Rakennusterveystietokanta-hankkeen 322 julkisen rakennuksen laajaan kuntotutkimukseen perustuen tilastollisesti erittäin merkitsevä ero merkittävien kosteus- ja mikrobivaurioiden havaitsemisissa kuntoarvio ja -tutkimusmenetelmien välillä. Ero korostuu erityisesti peruskorjauslähtöisissä rakennuksissa, joissa ei epäillä sisäilmaongelmaa. Tulokset viittaavat siihen, että tieteellisissä tutkimushankkeissa kuntoarviomenetelmin valituista ns. terveistä verrokkirakennuksista jopa lähes 2/3 olla yhtä vaurioituneita kuin vaurioituneiksi valitut. Koska tutkimushankkeissa rakennusten määrä harvoin ylittää 20 kpl, lisää pieni otanta riskiä väärin luokiteltujen rakennusten osuuden kasvamisesta entisestään. Rakennusten virheellinen luokittelu ei voi olla vaikuttamatta koko tutkimushankkeen tuloksiin.

1. Johdanto

Julkisissa rakennuksissa merkittävät kosteus- ja homevauriot ovat pääosin rakenteiden sisällä, eivätkä ne siten yleensä ole havaittavissa rakenteita rikkomattomin kuntoarviomenetelmin. Jo vuoden 1997 Ympäristöoppaan 28 [1] ohjeistuksen mukaan sisäilmaongelmia tuleekin selvittää kuntotutkimuksin, joissa rakenteet tutkitaan rakenneavauksin ja materiaalinäyttein. Lisäksi tulee selvittää, kulkeutuuko todetuilta vaurioalueilta epäpuhtauksia sisäilmaan. Oppaan päivityksessä 2016 [2] ja Asumisterveysasetuksessa soveltamisohjeineen [3,4] ohjeistusta on täydennetty ja kuntotutkijoille on asetettu pätevyysvaatimukset.

Kuntotutkimuksissa aistinvarainen katselmus on osa lähtötietoselvityksiä, joiden perusteella laaditaan tutkimussuunnitelma. Sen sijaan tieteellisissä sisäilmatutkimuksissa katselmuksot ovat usein pääasiassa taloudellisista syistä ensisijainen ja jopa ainoa keino luokiteltaessa rakennuksia vaurio- ja verrokkikohteiksi (Taulukko 1). Valitettavan usein laajojenkin tutkimushankkeiden tuloksena on, että näiden vaurio- ja verrokkirakennusten välillä ei havaittu tilastollisesti merkitsevää eroa.

Taulukko 1. Esimerkkejä tieteellisten tutkimusten rakennusmääristä ja luokittelusta.

Vuosi	Kuvaus	Rakennuksia	Luokittelu	Viite
2002	Koulurakennusten sisäilman mikrobinäytteet, viitearvot	14 vaurio + 5 vertailu	Näkyvä kosteus- ja homevaurio	[5]
2007	Toimistorakennusten sisäilman mikrobinäytteet, viitearvot	14 vaurio, 20 vertailu	kosteuskartoitus ja näkyvä home	[6]
2012	Toksisuustestit	12 + 10	kysely, osassa kuntoarvio	[7]
2019	Menetelmä ja viitearvot kuiduille soveltamisohjeeseen [4] 12/2020	3 toimistoa	ei luokittelua, epätyypilliset kuitupitoisuudet	[8]

Työsuojelurahaston osin rahoittamassa, vuosina 2022–2024 toteutettavassa Rakennusterveystietokanta -hankkeessa, kerätään relaatiotietokantaan yksityiskohtaista ja luokiteltua sisäilma-aineistoa julkisiin rakennuksiin vuosina 2012–2023 tehdyistä kokonaisvaltaisista kuntotutkimuksista. Tutkitut rakennukset luokitellaan mm. sijainnin, iän, käyttötarkoituksen ja tutkimusperusteen mukaan. Lisäksi esimerkiksi mikrobianalyyysien tulokset kirjataan lajistoittain ja näytteen yhteydessä kirjataan myös tutkittu rakennusosa, rakenne, materiaali, havaitut kosteusvaurioviitteet, ilmayhteys sisäilmaan sekä mahdollisuuksien mukaan vauriomekanismi.

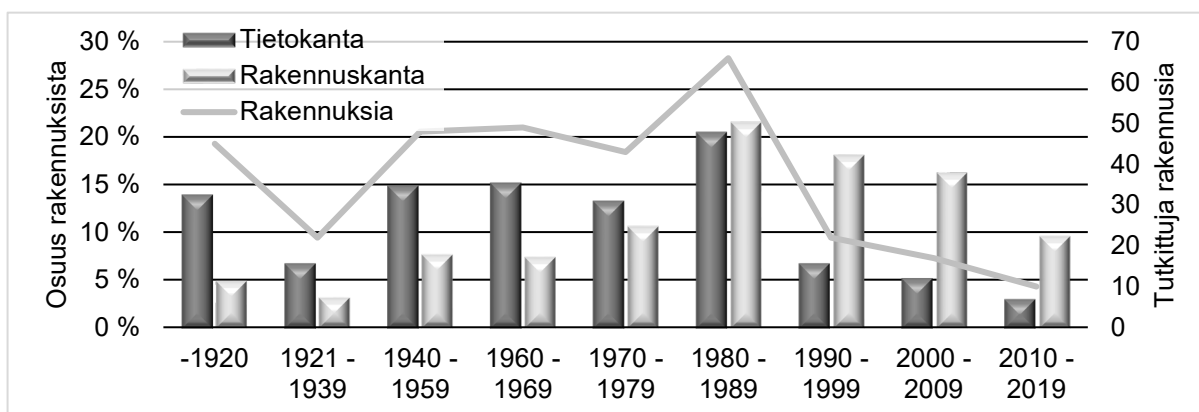
2. Aineisto ja menetelmät

2.1 Tutkimusaineisto ja rakennusten luokittelu

Tutkimushankkeen aineisto kerätään Sirate Group Oy:n vuosina 2012–2023 julkisiin rakennuksiin tekemistä kokonaisvaltaisista kuntotutkimuksista, ja se sisältää kymmeniä tuhansia luokiteltuja teknisiä mittaus- ja analyysituloksia. Tässä artikkelissa esitettävät tulokset perustuvat 322 kuntotutkittuun julkiseen rakennukseen ja tutkimusten yhteydessä otettuihin näytteisiin. Osana tutkimussuunnitelman laadintaa rakennuksiin on tehty rakenteita rikkomaton katselmus ja pintakosteuskartoitus, jotka vastaavat hyvin tieteellisten tutkimusten luokitteluperusteena käytettyjä kuntoarviomenetelmin tehtyjä katselmuksia.

Yhteiskunnan tietojärjestelmissä rakennus määräytyy pysyvän rakennustunnuksen perusteella. Hankkeessa erotellaan lisäksi eri aikakausina valmistuneet, usein rakenteiltaan toisistaan poikkeavat osat, jotta kuntotutkimustulokset voidaan yhdistää tietyn aikakauden rakennuksiin. Tiedot kirjataan luokitellusti ja yksityiskohtaisesti: esimerkiksi mikrobinäytteistä kirjataan tulokset lajistokohtaisesti ja näytteet luokitellaan vähintään rakennusosan, rakenteen, materiaalin ja näytteenottosyyntä perusteella.

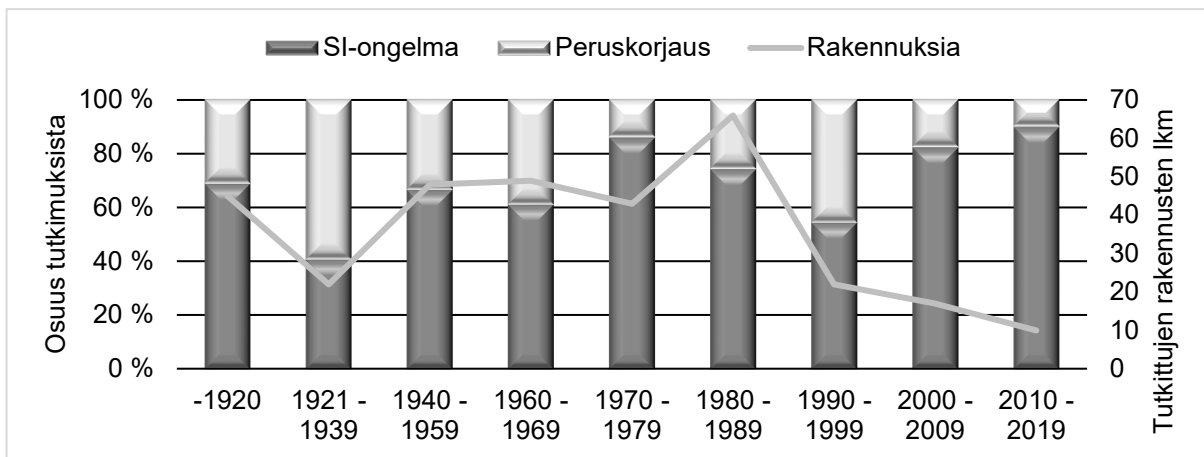
Rakennukset luokitellaan mm. iän, sijainnin, käyttötarkoituksen ja omistajatyypin perusteella, jotta tulosten edustavuutta voidaan arvioida suhteessa julkiseen rakennuskantaan. Kuntotutkitut 322 rakennusta sijoittuvat 15 maakunnan alueella ja niiden ikäjakauma vastaa kohtuullisesti koko rakennuskantaa [9]. Uusimmat 1990- ja 2000-luvun rakennukset ovat tutkimusaineistossa ymmärrettävästi aliedustettuina rakennuskantaan nähden (kuva 1). Käyttötarkoituksensa osalta tutkituista rakennuksista 47 % oli opetusalan rakennuksia, 11 % hoitoalan rakennuksia, 14 % toimistoja, 3 % liiketiloja, 6 % asuntoja ja 13 % kokoontumistiloja.



Kuva 1. Tutkittujen rakennusten lukumäärät eri aikakausina ja tietokanta-aineiston sekä rakennuskannan ikäjakauma rakennusvuoden perusteella.

Kuntotutkimukset on luokiteltu tutkimusperusteen mukaan joko sisäilmaongelmakohteeksi tai peruskorjauskohteeksi. Mikäli lähtötiedoista tai tutkimusten aikana on ilmennyt rakennuksessa esiintyneen sisäilmaongelmia, on rakennuksen tutkimusperuste muutettu sisäilmaongelmaiseksi.

Peruskorjauslähtöisiä kuntotutkimuksia tässä aineistossa on 99 kpl (31 %) ja sisäilmalähtöisiä kuntotutkimuksia 223 kpl (69 %). Tutkimusperusteen mukainen luokittelu yhdessä tutkittujen rakennusten lukumäärän kanssa on esitetty aikakaussittain (rakennusvuosi) kuvassa 2. Sisäilmalähtöisiä tutkimuksia on enemmän kuin peruskorjauslähtöisiä lähes kaikilla vuosikymmenillä valmistuneissa rakennuksissa. Ainoastaan 1921–1939 valmistuneissa rakennuksissa peruskorjauslähtöisiä korjauksia oli enemmän. 1970-luvulla sekä 2000-luvulla valmistuneiden rakennusten kuntotutkimuksista vain yksittäisiä on tehty peruskorjauslähtöisesti.



Kuva 2. Tutkittujen rakennusten lukumäärä ja luokittelu tutkimusperusteen mukaan ikäkausittain rakennusvuoden perusteella.

Hankkeessa tutkimukset luokitellaan kuntotutkimuksiksi, mikäli niissä on selvitetty koko rakennuksesta vähintään:

- Olemassa olevat rakenteet rakenneavauksin ja niiden kunto kosteusmittauksin [10] sekä kattavasti otetuin materiaalinäyttein (useita näytteitä/tutkittava rakenne).
- Ilmavuototutkimukset merkkiainetutkimuksin [11] ja/tai lämpökuvauksella [12].
- Painesuhteiden selvittämisen seurantamittauksin.
- Ilmanvaihdon toiminnan arviointi.

Vain osaan rakennusta rajoittuva kuntotutkimus luokitellaan osatutkimukseksi. Lisäksi näyte- ja mittausdataa kerätään myös suppeammista tutkimuksista. Sisäilmaoireilun ja -haittojen esiintymistä kirjataan rakennusosittain työterveyshuollon tilastojen, sisäilmakyselyiden ja/tai haittailmoitusten perusteella. Rakennukset koodataan tietokannassa tunnistamattomiksi ja eivätkä tilastolliset terveydelliset tiedot muodosta henkilörekisteriä.

2.2 Merkittävä kosteus- ja mikrobivaurio

Kuntotutkimustulosten perusteella rakennukset voidaan luokitella altistumistodennäköisyyden perusteella useampaan luokkaan esim. tutkimuksen [13]. Kuntoarvion perusteella tällaista moniportaista luokittelua ei voida tehdä. Tässä artikkelissa on pyritty vastaavaan kaksiportaiseen luokitteluun kuin tieteellisissä tutkimuksissa.

Rakennukset on luokiteltu sen perusteella, esiintykö rakennuksessa julkaisun [14] määritelmän mukaista merkittävää kosteus- ja homevauriota. Merkittävä kosteus- ja homevaurio edellyttää

esimerkiksi useilla materiaalinäytteillä todetun vaurion lisäksi selvitystä epäpuhtauksien kulkeutumisesta vaurioituneesta rakenteesta käyttötiloihin. Merkittäväksi vaurioksi on luokiteltu myös käyttötiloissa tai niihin selvästi ilmayhteydessä olevissa tiloissa havaitut yksittäisiä tai pienialaisia laajemmat kosteusvauriot sekä käyttötiloissa havaittu mikrobiperäinen haju. Merkittäväksi todettu vaurio voi vaikuttaa sisäilman laatuun käyttötiloissa, mutta ei välttämättä koko rakennuksessa.

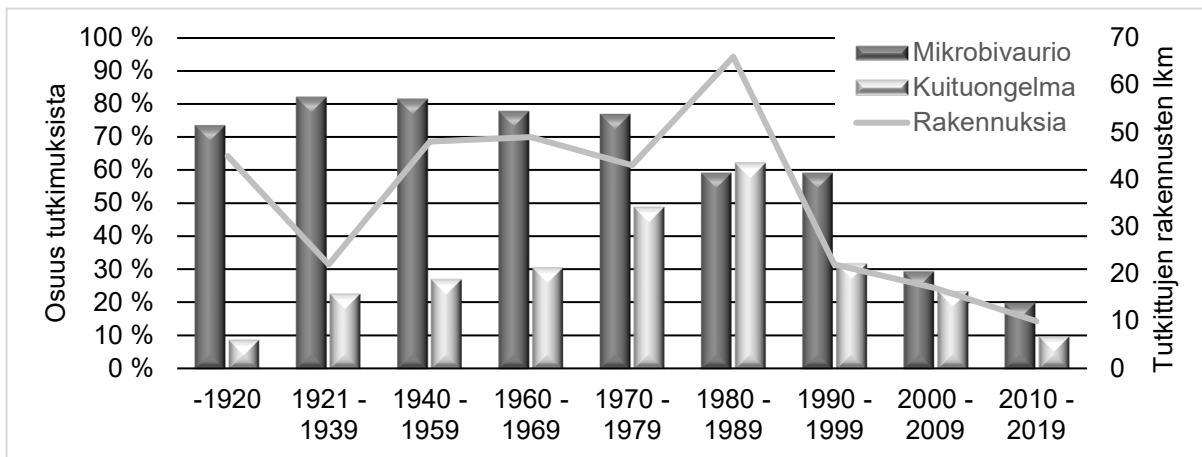
2.3 Tilastolliset menetelmät

Eroja mikrobivaurioiden esiintymisessä tutkimusperusteen perusteella on selvitetty tilastollisesti Khiin neliö -menetelmällä sekä McNemar-testillä.

3. Tulokset

3.1 Merkittävien vaurioiden esiintyminen rakennusajankohdan perusteella

Kuntotutkimusten perusteella merkittävä kosteus- ja homevaurio todettiin 220/322 tutkitussa rakennuksessa (68 %). Vauriorakennusten osuudet tutkituista on esitetty kuvassa 3 aikakaussittain rakennusajankohdan perusteella. Ennen vuotta 1980 valmistuneissa rakennuksissa havaittiin merkittäviä mikrobivaurioita yli 70 %:ssa, 1980- ja 90-luvuilla rakennetuissa noin 60 %:ssa ja 2000-luvulla rakennetuissa rakennuksissa alle 30 %:ssa tutkituista rakennuksista. Teollisten mineraalikulitujen osalta poikkeava altistumisolosuhde havaittiin sisäilmaperusteisissa tutkimuksissa 37 % ja peruskorjausperusteisissa tutkimuksissa 29 %:ssa kuntotutkituista rakennuksista kuitenkin siten, että merkittävässä (n. 50–60 %) osassa 1970- ja 80-luvuilla rakennettuja rakennuksia havaittiin kuntotutkimuksissa merkittäviä kuituongelmia.



Kuva 3. Tutkittujen rakennusten lukumäärät eri aikakausina sekä poikkeavien altistumisolosuhteiden (mikrobivauriot ja kuituongelma) osuudet tutkituissa rakennuksissa.

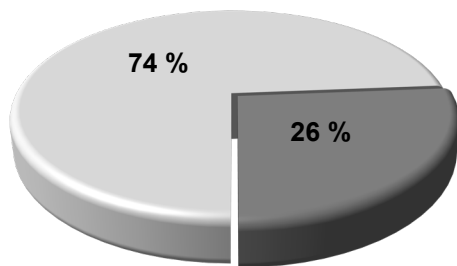
3.2 Merkittävät vauriot kuntoarvioiden ja -tutkimusten perusteella

Merkittävien kosteus- ja mikrobivaurioiden havaitsemisessa todettiin odotetusti selvä ero kuntoarvioiden ja -tutkimusten välillä. Kuntotutkimusmenetelmän merkittävä vaurio todettiin 220 rakennuksessa (68 %) ja kuntoarviomenetelmän 149 rakennuksessa (46 %). Riippuvien otosten McNemar -testin perusteella merkittävän mikrobivaurion havaitsemisessa on tilastollisesti erittäin merkitsevä ero kuntoarvio- ja kuntotutkimusmenetelmien välillä, $df=1$; $X^2=49,91$; $p < 0,001$.

Kuntoarviomenetelmin havaittujen merkittävien vaurioiden esiintymisessä havaittiin selkeä ero eri tutkimusperusteen rakennuksissa (Kuva 4). Peruskorjauksen lähtötiedoiksi tutkituissa rakennuksissa, joissa ei ollut koettu sisäilmaongelmaa, havaittiin merkittävä kosteus- ja homevaurio vain 26 % rakennuksista (26/99). Sein sijaan sisäilmanongelmaisiksi koetuissa rakennuksissa merkittäviä vaurioita todettiin 55 % (123/223) arvioiduista rakennuksista. Khiin neliö -testin perusteella ero on tilastollisesti erittäin merkitsevä, $df=1$; $X^2=23,02$; $p < 0,001$.

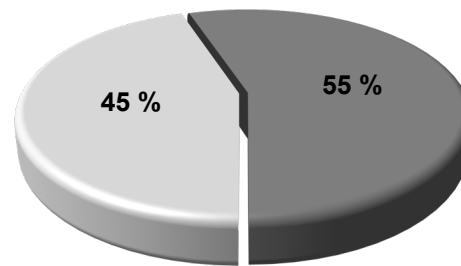
Edellisestä poiketen, kuntotutkimusmenetelmin havaittujen merkittävien vaurioiden esiintymisessä ei havaittu eroja eri tutkimusperusteisten rakennusten välillä (Kuva 5). Peruskorjauskohteissa vaurioita havaittiin 68 %:ssa (67/99) ja sisäilmakohteissa 69 % rakennuksista (153/223). Myös khiin neliö -testin perusteella eri tutkimusperusteen rakennusten välillä ei havaittu tilastollisesti merkitsevää eroa, $df=1$; $X^2=0,03$; $p = 0,87 > 0,05$.

PERUSKORJAUS, K-ARVIO



■ Ei vauriota ■ Mikrobivaurio

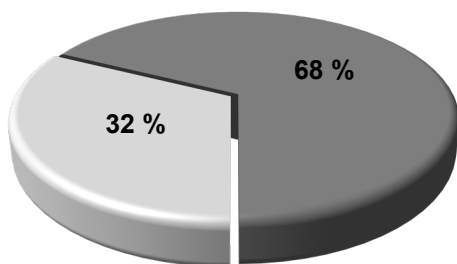
SI-ONGELMA, K-ARVIO



■ Ei vauriota ■ Mikrobivaurio

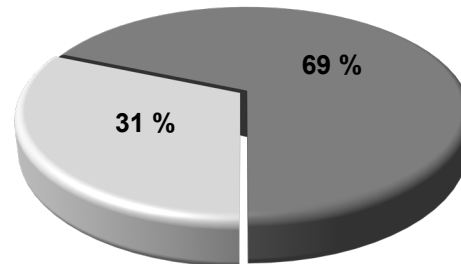
Kuva 4. Merkittävien mikrobivaurioiden osuudet kuntoarvioissa, joiden tutkimusperusteena on vasemmanpuoleisessa kuviossa peruskorjaus ja oikeanpuoleisessa kuviossa sisäilmaongelma.

P.KORJAUS, K-TUTKIMUS



■ Ei vauriota ■ Mikrobivaurio

SI-ONGELMA, K-TUTKIMUS



■ Ei vauriota ■ Mikrobivaurio

Kuva 5. Merkittävien mikrobivaurioiden osuudet kuntotutkimuksissa, joiden tutkimusperusteena on vasemmanpuoleisessa kuviossa peruskorjaus ja oikeanpuoleisessa kuviossa sisäilmaongelma.

4. Yhteenveto

Rakennusten kuntoa ja sisäilman laatua koskevassa lainsäädännössä ja ohjeistuksissa oletuksena on, että myös rakenteiden sisällä olevat laajat kosteus- ja mikrobivauriot ovat merkityksellisiä sisäilman poikkeavia altistumisolosuhteita arvioitaessa, mikäli vaurioalueilta todetaan kulkeutuvan merkittävästi ilmaa sisätiloihin.

Julkisen rakennuskannan kosteusvaurioista valtaosa on rakenteiden sisällä. Tutkimuksen perusteella näitä vaurioita ei kuitenkaan havaita kuntoarviomenetelmin, joiden perusteella tieteellisissä tutkimuksissa usein luokitellaan rakennukset vaurio- ja verrokkirakennuksiksi. Merkittävien kosteus- ja mikrobivaurioiden havaitsemisessa todettiin tilastollisesti erittäin merkitsevä ero kuntoarvio- ja -tutkimusmenetelmien välillä. Tuloksen perusteella on todennäköistä, että tutkimushankkeissa kuntoarvion perusteella verrokkirakennuksista luokitelluista jopa 2/3 onkin vauriorakennuksia. Pienissä hankkeissa osuus voi olla vielä suurempi.

Artikkelin 322 kuntotutkitusta rakennuksesta noin kolmasosan tutkimusperusteena oli peruskorjauksen lähtötietojen hankinta eikä näissä rakennuksissa ollut koettu sisäilmaongelmaa. Jaottelu on melko luotettava, koska samoilta kiinteistönomistajilta hankkeessa oli myös useita sisäilmaongelmaisia kohteita ja ko. omistajilla prosessit sisäilmaongelmatilanteissa oli hyvin hoidossa. Rakennukset erottuvat selvästi myös kuntoarvioperustein todettujen merkittävien vaurioiden osalta. Kuitenkin tarkemmissa kuntotutkimuksissa peruskorjaus- ja sisäilmaongelmakohteiden välillä ei ollut minkäänlaista eroa. Tulosten perusteella rakenteiden sisällä olevat laajatkaan kosteus- ja mikrobivauriot eivät korreloi yleisellä tasolla koetun sisäilmaoireilun kanssa, vaikka vaurioalueilta on todettu merkittävät ilmavuodot sisäilmaan.

Lähdeluettelo

- [1] Ympäristöministeriö (1997). Kosteus- ja homevaurioituneen rakennuksen kuntotutkimus. Ympäristöopas 28.
- [2] Pitkäranta M. (toim.) (2016) Rakennusten kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus. Ympäristöministeriö.
- [3] Sosiaali- ja terveysministeriö (2015), Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista 545/2015.
- [4] Valvira (2016) Asumisterveysasetuksen soveltamisohje 8/2016. Päivitykset osaan III: 21.12.2020 ja 24.3.2021.
- [5] Meklin, T. 2002, Microbial Exposure and Health in Schools - Effect of Moisture Damage and Renovation, väitös Kansanterveyslaitos ja Kuopion yliopisto.
- [6] Salonen, H., Lappalainen, S., Lindroos, O, Harju, R. ja Reijula, K. 2007, Fungi and Bacteria in Mould-Damaged and Non-Damaged Office Environments in a Subarctic Climate, Atmos. Environ. 41 (2007), 6797-6807, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2007.04.043.
- [7] Loppuraportti: Toksikologisen menetelmän kehittämissuunnitelma TOXTEST 2010-2012.
- [8] Tuomi, T. et.al. 2019. Filter Cassette Method for Analyzing Man-Made Vitreous Fibres Settled on Surfaces, Int. J. Environ. Res. Public Health 16 (2019), 1256.
- [9] Tilastokeskus 2021, Rakennukset käyttötarkoituksen ja valmistumisvuoden mukaan, 2021.
- [10] Rakennustietosäätiö (2021). RT 103333 Betonirakenteiden kosteudenhallinta ja kuivumisen arviointi.
- [11] Rakennustietosäätiö (2015). RT 14-11197 Rakenteiden ilmatiiveyden tarkastelu merkkiainekokein, ohjekortti.
- [12] Rakennustietosäätiö (2016). RT 14-11239 Rakennusten lämpökuvaus.
- [13] Tähtinen, K. et.al 2018. Association between Four-Level Categorisation of Indoor Exposure and Perceived Indoor Air Quality. Int. J. Environ. Res. Public Health 15 (2018), 679 DOI: 10.3390/ijerph15040679.
- [14] Eduskunnan tarkastusvaliokunnan julkaisu 2012. Rakennusten kosteus- ja homeongelmat.

Kosteusvaurioiden yleisyys pientalojen yleisimmissä riskirakenteissa

Anniina Salmela¹, Jonathon Taylor², Antti Heimlander³, Martin Täubel¹, Jukka Lahdensivu² ja Juha Pekkanen^{1,4}

¹ Terveyden ja hyvinvoinnin laitos

² Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka

³ Raksystems Insinööritoimisto Oy

⁴ Helsingin yliopisto

Tiivistelmä

Lähes 15 000:n asuntokaupan yhteydessä tehdyn kuntotarkastuksen mukaan 15 %:ssa pientaloista on varma kosteusvaurio ja noin 40 %:ssa on joko vaurio tai lisätutkimustarvetta yleisimmissä riskirakenteissa. Luvut eivät sisällä mm. märkätilojen, kellarirakenteiden tai muissa kuin riskirakenteissa havaittuja vaurioita. Vaurioiden yleisyys lisääntyi sitä mukaan mitä vanhemmasta rakennuksesta oli kyse.

1. Johdanto

Ajan myötä rakennusten rakenteisiin voi kertyä kosteutta. Tämä voi johtaa kosteus- ja mikrobivaurioihin, mikä vaikuttaa asukkaiden terveyteen ja hyvinvointiin. Rakennusten kosteusvaurioiden syyt liittyvät ilmastoon ja paikallisiin olosuhteisiin, mutta niitä ovat myös tekniset syyt kuten ilmavuodot rakennuksen vaipassa ja rakenteessa, kosteuden nousu, riittämätön ilmanvaihto, huono eristys ja kylmäsillat [1].

Eduskunnan tarkastusvaliokunnalle tehdyssä selvityksessä vuonna 2012 [2] arvioitiin, että merkittäviä kosteusvaurioita esiintyy asuinrakennusten pinta-alasta 6–10 prosentissa, kouluissa ja päiväkodeissa 12–18 prosentissa, hoitolaitoksissa 20–26 prosentissa ja toimistoissa 2,5–5 prosentissa. Vuonna 2019 arvioitiin [3], että kuntien omistamissa ja käytössä olevissa rakennuksissa on merkittäviä sisäilmaongelmia 5–18 %:ssa rakennusten kokonaispinta-alasta.

Samaan aikaan satunnaistettujen kyselytutkimusten mukaan suomalaisten asuntojen sisäilman laatu koetaan pääasiassa hyväksi tai erittäin hyväksi [4] ja alle 5 % suomalaisista kokee asuvansa heikkokuntoisissa asunnoissa [5].

2. Aineisto ja menetelmät

Aineisto käsitti yhteensä 14 996 pientalokohteeseen asuntokaupan yhteydessä myyntiä varten Raksystems Insinööritoimisto Oy:n tekemää kuntotarkastusta vuosilta 2016–2020. Aineistoa käytettiin kosteus- ja mikrobivaurioiden esiintyvyyden selvittämiseen keskittyen erityisesti riskirakenteisiin.

Myytävien asuntojen kosteusteknistä kuntoa tarkastettaessa noudatettiin Kuntotarkastus asuntokaupan yhteydessä (KH 90–00394) -ohjetta [6]. Aineistosta poimittiin havainnot, joiden voidaan katsoa vaikuttavan sisäilmaan, siksi esimerkiksi kellaritilat puuttuvat aineistosta. Märkätiloista havaitut vauriot on myös suljettu pois, koska niitä ei ole perusteellisesti selvitetty, vaan pääosin märkätiloista on vain merkitty, että tekninen käyttöikä on ylitetty.

Aineistoon riskirakenteiksi on määritelty rakennetyypit, jotka on todettu käytännössä ja rakenteita tutkittaessa vaurioherkäksi rakenteeksi. Nämä riskirakenteet on esitetty myös ohjeessa Kuntotarkastus asuntokaupan yhteydessä (KH 90–00394) [6].

Selvityksessä riskirakenteissa havaitut kosteus- ja mikrobivauriot jaettiin neljään luokkaan:

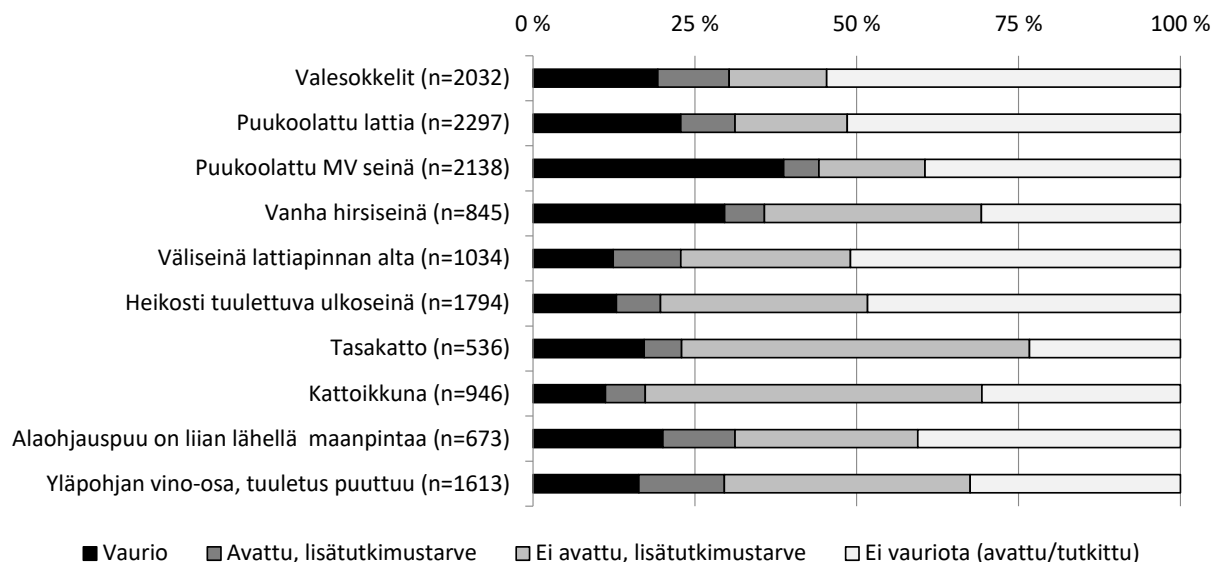
1. Riskirakenne avattu ja/tai todettu selkeä, aistinvaraisesti havaittavaa vauriota. (Vaurio)
2. Riskirakenne avattu, vaurion varmistaminen vaatii lisätutkimuksia. Avauksessa on tehty havaintoja mahdollisesta vauriosta (haju, kosteus tms.), mutta ei todettu selkeää vauriota tai rakenne on avattu ja todettu, että rakenne on sellainen, ettei voida kuntoarviossa tutkia riittävästi. (Avattu, lisätutkimustarve)
3. Riskirakennetta ei ole avattu, vaurion selvittäminen vaatii rakenneavauksen. Tyypillisesti rakennetta ei ole avattu sen teknisen vaativuuden vuoksi tai myyjän kiellosta johtuen. (Ei avattu, lisätutkimustarve)
4. Riskirakenne avattu, ei viitteitä vauriosta. (Ei vauriota).

3. Tulokset

3.1 Havainnot riskirakenteissa

Yleisimmät riskirakenteet aineistossa olivat puukoolattu lattia ja maanvastainen seinä sekä valesokkelit. Tarkastetuista kohteista 15 %:ssa oli puukoolattu lattia ja 14 %:ssa puukoolattu maanvastainen seinä. Valesokkeli oli 13 %:ssa ja hirsiseinä rakennetta esiintyi 6 %:ssa tarkastetuista kohteista. Vähiten aineistossa, alle 4 %, oli tasakattorakennetta. Lähes yhtä harvoin oli riskirakenne, jossa alaohjauspuu on liian lähellä maanpintaa (alle 10 senttimetriä).

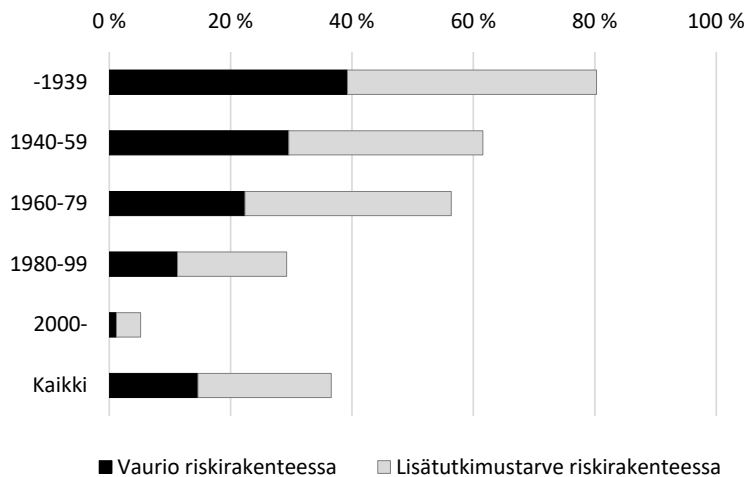
Useimmiten vaurio tai lisäselvityksen tarve tuli esiin tasakaton, kattoikkunoiden ja vanhan hirsiseinän kohdalla (Kuva 1). Riskirakenteista useimmiten oli vaurioitunut puukoolattu maanvastainen seinä ja vanha hirsiseinä. Noin 50 %:ssa tutkituista valesokkelirakenteista, puukoolatuista lattioista, väliseinästä lattiapinnan alta tai heikosti tuulettuvasta ulkoseinästä ei havaittu vaurioita.



Kuva 1. Vaurioiden yleisyys [%] eri riskirakenteissa. MV = maanvastainen seinä.

3.2 Kosteusvaurioiden yleisyys riskirakenteissa

Selvityksen perusteella kaiken kaikkiaan 15 %:ssa pientaloista on varma kosteusvaurio yleisimmissä riskirakenteissa ja noin 40 %:ssa on joko varma vaurio tai lisätutkimustarvetta yleisimmissä riskirakenteissa (kuva 2). Useimmiten vaurioituneita riskirakenteita ja lisätutkimustarvetta esiintyi ennen vuotta 1980 rakennetuissa pientaloissa. Esimerkiksi ennen vuotta 1940 rakennetuissa taloissa vaurio tai lisätutkimustarvetta riskirakenteissa esiintyi 80 %:ssa pientaloista. Uusimmissa pientaloissa (2000–) vaurioita tai lisäselvitystarvetta ilmeni 5 %:ssa tarkastetuista kohteista.



Kuva 2. Kosteus- ja mikrobivaurioiden yleisyys pientalojen yleisimmissä riskirakenteissa rakennusvuoden mukaan. Luvut eivät sisällä mm. märkätilojen ja kellarirakenteiden vaurioita.

3.3 Muut havainnot

Aineistosta tarkasteltiin myös muita kohteiden kuntoarvioinneissa esiin tulleita havaintoja. Nämä tehdyt havainnot ovat systemaattisesti suoritusohjeen mukaisesti tarkastuksilla läpi käytyjä ja ne edustavat yksittäisiä havaintoja, jotka voivat vaikuttaa rakenteiden vaurioitumiseen tai suoraan rakennuksen sisäilmaan. Esitetyt muut havainnot ovat vain osapoiminta aineistosta eikä siis kattavasti esitä kaikkia tarkastuksilla kirjattuja havaintoja.

Sisäilmaan liittyvistä muista havainnoista ilmanvaihdon puutteet liittyivät korvausilmaan, ilmavirtauksiin ja huoltosuosituksiin. Muut tarkastuksilla esiin tulleet havainnot tai vauriot, joihin liittyi lisäselvitys- tai korjaustarpeita, liittyivät useimmiten järjestelmien tai rakenteiden ikääntymiseen, kuten salaajien tai vedeneristysten kuntoon. Poikkeavia hajuja sisätiloissa esiintyi 8 %:ssa pientaloista, ja niitä havaittiin ennen vuotta 1980 rakennetuissa taloissa (14–16 % tarkastetuista kohteista) enemmän kuin uudemmissa taloissa (1–4 %:ssa tarkastetuissa kohteissa).

4. Yhteenveto

Selvityksen tulokset antavat merkittävää tietoa kosteusvaurioiden yleisyydestä suomalaisissa pientaloissa. Tulosten perusteella myytävien asuntojen kuntoarvioissa havaitaan kosteusvaurioita yleisimmissä riskirakenteissa vähintään 15 %:ssa kaikista pientaloista ja noin 40 %:ssa pientaloista on joko varma vaurio tai lisätutkimustarvetta yleisimmissä riskirakenteissa. Tämän päälle tulevat muun muassa märkätilojen ja kellarirakenteiden vauriot, jotka eivät ole mukana näissä luvuissa. Muut tarkastuksilla esiin tulleet havainnot tai vauriot, joihin liittyi lisäselvitys- tai korjaustarpeita, liittyivät useimmiten teknisten järjestelmien tai rakenteiden ikääntymiseen.

Vanhemmissa pientaloissa oli huomattavasti enemmän vaurioita verrattuna uudempiin rakennuksiin. Asuntojen vahinkojen esiintyvyys lisääntyi rakennusiän myötä, vuoden 2000 jälkeisestä 5 %:sta 80 %:iin vuotta 1939 edeltäneissä rakennuksissa. Tämä voi johtua eroista rakentamistavassa ja erilaisten kosteusrisiä lisäävien riskirakenteiden olemassaolosta, kuten valesokkelit ja maanvastaiset rakenteet, jotka olivat yleisempiä vanhemmilla rakennuskausilla. Ero vaurioiden yleisyydessä voi johtua myös siitä, että vanhemmat rakennukset ovat altistuneet ympäristön kosteudelle pidempään verrattuna uudempiin rakennuksiin.

Ennen vuotta 1980 rakennetuissa taloissa havaittiin epätavallisia hajuja useammin kuin uudemmissa taloissa, mikä saattoi osittain johtua ilmanvaihtoratkaisuihin ja rakennuksen tiiviyyteen liittyvistä rakennusmenetelmien muutoksista.

Esitetyt tiedot ovat Suomen kannalta uusia ja antavat uutta tietoa kosteusvaurioiden esiintyvyydestä suomalaisissa taloissa.

Lähdeluettelo

- [1] World Health Organization. Regional Office for Europe. (2009). WHO guidelines for indoor air quality: dampness and mould. World Health Organization. Regional Office for Europe.
- [2] Reijula K., ym. (2012). Rakennusten kosteus- ja homeongelmat. Eduskunnan tarkastusvaliokunnan julkaisu 1/2012.
- [3] Salmela A., ym. (2019). Sisäilma ja terveys: kehitys, nykytilanne, seuranta ja vertailu eri maiden sekä julkisen ja yksityisen sektorin välillä. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja, 2019:59.
- [4] Mäki S., ym. (2021). Sisäilmaongelmia kohdanneiden ihmisten auttaminen ja tukeminen. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2021:48.
- [5] Eurostat. (2021) Share of total population living in a dwelling with a leaking roof, damp walls, floors or foundation, or rot in window frames of floor - EU-SILC survey.
- [6] Rakennustietosäätiö. (2007) LVI 01-10414, KH 90-00394 Kuntotarkastus asuntokaupan yhteydessä. Suoritusohje.

Tiiliverhotun puurunkoisen ulkoseinärakenteen korjausvaihtoehdot

Tero Marttila^{1,2} ja Siiri Turpeinen²

¹ A-Insinöörit Suunnittelu Oy

² Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka

Tiivistelmä

Tässä artikkelissa tarkastellaan tiiliverhotun puurunkoisen ulkoseinärakenteen eri korjausvaihtoehtoja. Artikkelin pohjautuu Tampereen yliopiston kandidaatintyönä tehtyyn kirjallisuustutkimukseen. Työssä kartoitettiin rakenteeseen liittyviä tyypillisiä ongelmakohtia ja niihin soveltuvia korjausvaihtoehtoja. Työn tuloksina syntynyt vuokaaviota ja nelikenttäanalyysija voidaan hyödyntää sopivan korjausvaihtoehdon valitsemisessa.

Tutkimuksessa päädyttiin tarkastelemaan kolmea eri korjaustasoa: A) perusteellinen rakenteen uusiminen, B) rakenteen osittainen uusiminen ulkopuolelta sekä C) sisäpintoihin tehtävät korjaukset. Kyseiset päätasot jaettiin vielä osiin siten että tarkasteltavia korjausvaihtoehtoja oli lopulta kahdeksan kappaletta. Korjaustapoja erottavina tekijöinä olivat pääasiassa korjaustoimenpiteiden laajuus sekä uuden rakenteen ulkoeristys.

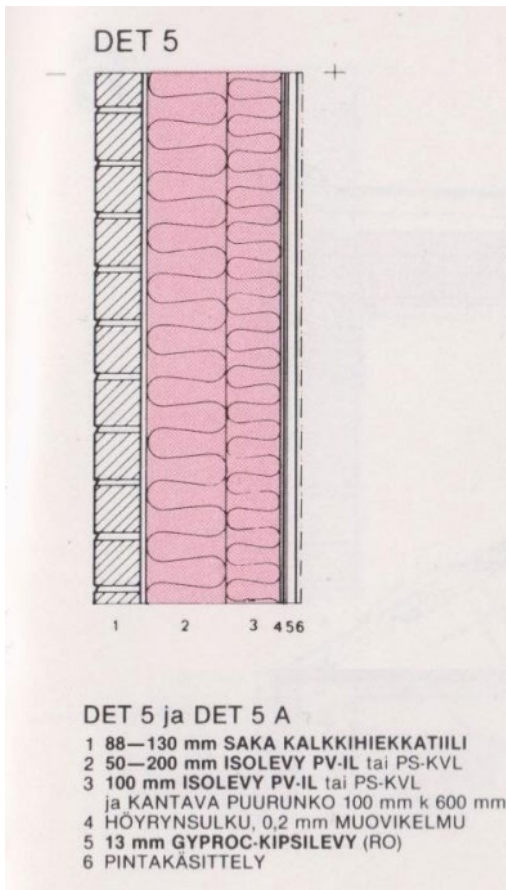
Korjausvaihtoehdon valintaa määrittäväksi tekijöiksi osoittautuivat muun muassa mahdollisten vaurioiden sijainti sekä suunniteltua käyttöikä, ulkonäkö ja energiatehokkuutta koskevat tavoitteet.

1. Johdanto

RAIL-hankkeen loppuraportin mukaan Suomen omakoti-, pari- ja rivitalojen rakenteista puurunkoinen ulkoseinä tiiliverhouksella on herkkä vaurioitumaan jo nykyilmastossa [1]. Enimmäkseen rakenteen ongelmat liittyvät viistosateen aikana kosteutta keräävään tiileen, joka ei pääse kunnolla kuivumaan, jos sen takana ei ole toimivaa tuuletusväliä. Näin kosteus pääsee siirtymään rakenteen sisempiin kerroksiin. [2] Yhdessä homeutumisherkkien materiaalien kanssa rakenteen puutteellinen tuuletus luo otolliset olosuhteet homeenkasvulle jo nykyisessä ilmastossa ja riski kasvaa sateiden lisääntyessä ilmastomuutoksen ennusteiden mukaisesti [1].

Rakenteeseen aiheutuu ylimääräistä kosteusrasitusta myös, jos sisäkuoren höyrnsulku ei ole riittävän tiivis. Sateiden lisääntyminen ja kosteuden imeytyminen tiileen voi hidastaa rakenteen kuivumista myös silloin, kun tuuletusväli on ainakin osittain toimiva, joten sisäkuoren tiiveyden merkitys kasvaa entisestään, vaikka ns. talvikondenssin (kosteamman sisäilman tiivistyminen rakenteen kylmiin osiin) mahdollistavat lämpöolosuhteet eivät tulevaisuudessa lisääntyisikään.

Tiiliverhottu puurunko on ollut yleinen ulkoseinärakenne etenkin 1970–1980-luvuilla, mutta tiiliverhouksen taakse jätettävä tuuletusväli on yleistynyt vasta 1990-luvulle saavuttaessa. Kuvassa 1 on esitetty vuoden 1980 ohjeiden mukainen rakenne, jossa ei ole tuuletusväliä eikä tuulensuojalevyä. Lisäksi useissa rakenteissa, joissa tuuletusväli on tehty, voi silti esiintyä ongelmia tuuletusvälin virheellisen rakentamisen vuoksi. Tyypillinen virhe on tuuletusväliä tukkivat laastipurseet. [1]



Kuva 1. Vuoden 1980 suositusten mukainen tiiliverhottu puurunkoinen ulkoseinärakenne [3]

Rakenteeseen liittyy siis kohonnut kosteusvaurion riski. Kuitenkin, jos rakenne tai sen korjaaminen suunnitellaan ja toteutetaan toimivalla tuuletusvälillä, mahdollisimman tehokkaalla rakenteellisella kosteusuojauksella sekä materiaaleilla, jotka eivät ole erityisen homehtumisherkkiä, riski homeenkasvulle pysyy hyväksyttävissä rajoissa myös tulevaisuuden ilmastossa. Lämmöneriste tuulensuojavillan ulkopuolella parantaa rakenteen toimivuutta merkittävästi, kunhan tuuletusväli on avoin. [1]

Artikkeli pohjautuu kandidaatintutkielmaan [4], jossa on taustoitettu rakenteen ongelmakohtia ja perusteltu korjausvaihtoehtoja yksityiskohtaisemmin kuin tässä artikkelissa. Artikkelissa keskitytään erityisesti korjausvaihtoehtojen vertailuun. Korjausvaihtoehtoja ja niihin liittyvää valintaprosessia havainnollistetaan vuokaavion sekä SWOT-nelikenttäänalyysin avulla. Tarkastelun tavoitteena on havainnoida eri korjausvaihtoehtojen vahvuuksia ja heikkouksia sekä niiden sopivuutta eri tilanteissa.

2. Rakenteen korjausvaihtoehdot

Ympäristöministeriön julkaisua Kosteus- ja mikrobivaurioituneiden rakennusten korjaus [5] mukailten tiiliverhotun puurunkoisen ulkoseinärakenteen korjausvaihtoehdot päädyttiin jakamaan seuraaviin tasoihin:

A. Perusteellinen rakenteen uusiminen.

A1.1. Vanha tiiliverhous korvataan tiililaattapintaisella levyverhouksella.

A1.2. Vanha tiiliverhous korvataan lautaverhouksella.

- A2. Vanhat tiilet muurataan takaisin tai korvataan uusilla tiilillä.
- B. Rakenteen osittainen uusiminen ulkopuolelta.
 - B1.1. Vanha tiiliverhous korvataan tiililaattapintaisella levyverhouksella.
 - B1.2. Vanha tiiliverhous korvataan lautaverhouksella.
 - B2. Vanhat tiilet muurataan takaisin tai korvataan uusilla tiilillä.
- C. Sisäpintoihin tehtävät korjaukset.
 - C1. Rakenteen osittainen tai paikallinen uusiminen sisäpuolelta.
 - C2. Pelkkä ilmatiiviyn parantaminen.

Korjausvaihtoehdoista on kerrottu tarkemmin kandidaatintutkielmassa [4].

2.1 Korjausvaihtoehdon valinta

Korjausvaihtoehdon valinnasta on laadittu vuokaavio, joka esitellään myös seminaarissa. Tilanpuutteen vuoksi tässä artikkelissa esitellään vain rakenteen korjausvaihtoehtojen nelikenttäanalyysi taulukossa 1.

Taulukko 1. Korjausvaihtoehtojen SWOT-analyysi.

Korjaustapa	Vahvuudet	Heikkoudet	Mahdollisuudet	Uhat
A1.1 Perusteellinen uusiminen tiililaatoilla	Pitkä käyttöikä Vaurioituneiden materiaalien poisto Kosteusteknisesti parempi ulkoverhous	Kustannukset Korjauksen aikaiset tuennat Purkujätteen määrä Ulkonäkö muuttuu hieman	Energiatehokkuuden parantaminen Uudet oviaukot ja isommat ikkunat mahdollisia	Tavanomaiset uudisrakentamista vastaavat riskit Tiililaattajulkisivujen pitkäaikaiskestävyydestä vielä vähän kokemusta
A1.2 Perusteellinen uusiminen lautaverhouksella	Pitkä käyttöikä Vaurioituneiden materiaalien poisto Kosteusteknisesti parempi ulkoverhous Ulkoverhouksen toteutus helppo ja edullinen	Kustannukset Korjauksen aikaiset tuennat Purkujätteen määrä Huoltotarve kasvaa	Energiatehokkuuden parantaminen Uudet oviaukot ja isommat ikkunat mahdollisia	Tavanomaiset uudisrakentamista vastaavat riskit Asemakaava ei välttämättä salli ulkonäön muutosta
A2 Perusteellinen uusiminen uudelleenmuuraamalla	Pitkä käyttöikä Vaurioituneiden materiaalien poisto	Kustannukset Korjauksen aikaiset tuennat Kuurimuurin vedenimu jatkuu Lisäeristäminen rungon ulkopuolelle haastavaa	Tiilien uudelleenkäyttö (materiaalitehokkuus ja matalampi hiilijalanjälki rakennusvaiheessa) Uudet oviaukot ja isommat ikkunat mahdollisia	Uudisrakentamista vastaavat riskit Osa tiilistä voi hajota rakennetta purettaessa Paksummalle ts-levylle ei ole tilaa (kost.tekn toimivuus jää epävarmaksi)
B1.1 Ulompien rakennekerrosten uusiminen tiililaatoilla	Pitkä käyttöikä Vaurioituneiden materiaalien poisto Kosteusteknisesti parempi ulkoverhous	Purkujätteen määrä Ulkonäkö muuttuu hieman	Rakennuksen käyttö korjaustöiden aikana Energiatehokkuuden parantaminen Ilmanvaihdon uudelleensäätö ei ole pakollista	Kustannukset Riski sisäkuoren puutteellisesta ilmatiiveydestä Tiililaattajulkisivujen pitkäaikaiskestävyydestä vielä vähän kokemusta

B1.2 Ulompien rakennekerrosten uusiminen lauta-verhouksella	Pitkä käyttöikä Vaurioituneiden materiaalien poisto Ulkooverhouksen toteutus helppo ja edullinen Kosteusteknisesti parempi ulkooverhaus	Purkujätteen määrä Huoltotarve kasvaa	Rakennuksen käyttö korjaustöiden aikana Energiatehokkuuden parantaminen Ilmanvaihdon uudelleensäätö ei ole pakollista	Kustannukset Riski sisäkuoren puutteellisesta ilmatiiveydestä Asemakaava ei välttämättä salli ulkonäön muutosta
B2 Ulompien rakennekerrosten uusiminen uudelleenmuuraamalla	Pitkä käyttöikä Vaurioituneiden materiaalien poisto	Kuorimuuri imee vettä edelleen Lisäeristämisen rungon ulkopuolelle haastavaa	Rakennuksen käyttö korjaustöiden aikana Tiilien uudelleenkäyttö (materiaalitehokkuus ja matalampi hiilijalanjälki rakennusvaiheessa) Ilmanvaihdon uudelleensäätö ei ole pakollista	Kustannukset Riski sisäkuoren puutteellisesta ilmatiiveydestä Osa tiilistä voi hajota rakennetta purettaessa Paksummalle ts-levylle ei ole tilaa (kosteustekninen toimivuus jää epävarmaksi)
C1 Osittainen uusiminen sisäpuolelta + rakenteen ilmatiiveyden parantaminen	Rakenteissa olevien epäpuhtauksien kulkeutuminen sisäilmaan estetty Vähiten purkujätettä Ei vaadi rakennuslupaa Melko edullinen korjaustapa	Lyhyt käyttöikä Ei korjaa riskirakenteita Lämmöneristävyys pysyy samana Edellyttää tehostettua laadunvarmistusta Ei nosta rakennuksen arvoa Ilmanvaihto on säädettävä uudelleen	Altistumisriskin vähentäminen käyttöä turvaavana toimenpiteenä (laajemman korjauksen siirtäminen) Lämmöneristeitä voidaan uusia	Piilevä vaurio rakenteessa voi jäädä havaitsematta Vaurion eteneminen saattaa jatkua
C2 Rakenteen ilmatiiveyden parantaminen	Rakenteissa olevien epäpuhtauksien kulkeutuminen sisäilmaan estetty Vähiten purkujätettä Ei vaadi rakennuslupaa Edullinen korjaustapa	Lyhyt käyttöikä Ei korjaa riskirakenteita Lämmöneristävyys pysyy samana Edellyttää tehostettua laadunvarmistusta Ei nosta rakennuksen arvoa Ilmanvaihto on säädettävä uudelleen	Altistumisriskin vähentäminen käyttöä turvaavana toimenpiteenä (laajemman korjauksen siirtäminen)	Piilevä vaurio rakenteessa voi jäädä havaitsematta Vaurion eteneminen saattaa jatkua

3. Yhteenveto

Tampereen yliopiston tutkimuksessa osana Valtioneuvoston kanslian julkaisemaa RAIL-hankkeen loppuraporttia on todettu, että Suomen omakoti-, pari- ja rivitalojen ulkoseinärakenteista tiiliverhottu puurunkoinen ulkoseinärakenne on laskennallisella homeindeksillä tarkasteltuna herkin vaurioitumaan. Tiiliverhotun puurunkoisen ulkoseinän tyypilliseksi ongelmaksi on jo yli 30 vuoden ajan tiedetty ulkoverhouksen puutteellinen tuuletus. Syitä kyseiseen ongelmaan ovat pääasiassa vanhat virheelliset rakennesuositukset ja rakenteen virheellinen toteutus, tyypillisesti laastipurseet tuuletusvälissä.

Tiiliverhouksen suuri vedenimukyky ja yleisesti käytettyjen tuulensuojalevyjen sekä puurungon homehtumisherkkyys tekevät rakenteesta alttiin kosteus- ja mikrobivaurioille jo Suomen nykyilmastossa. Vaurioituminen on mahdollista etenkin, jos rakenteellinen suojaus, esimerkiksi räystäät ja sisäkuoren tiiveys eivät torju rakenteeseen kohdistuvaa kosteusrasitusta riittävän hyvin. Ilmastonmuutoksen vaikutukset sademääriin ja kuivumisolosuhteisiin tulevat vielä lisäämään rakenteen homehtumisriskiä tulevaisuuden olosuhteissa.

Siiri Turpeinen selvitti rakennustekniikan kandidaatintutkielmassaan tiiliverhotun puurunkoisen pientalon ulkoseinärakenteen korjausvaihtoehtoja kirjallisuusselvityksenä. Työn tuloksena korjausvaihtoehdon valintaprosessista muodostettiin vuokaavio. Korjausvaihtoehdon valintaa määrittäviksi tekijöiksi osoittautuivat muun muassa mahdollisten vaurioiden sijainti sekä korjatun rakenteen käyttöikä, ulkonäköä ja energiatehokkuutta koskevat tavoitteet. Tutkielman lopuksi korjausvaihtoehdoista tehtiin SWOT-analyysi, jonka avulla esitettiin kunkin korjausvaihtoehdon vahvuuksia, heikkouksia, mahdollisuuksia ja uhkia.

Tutkielmassa tehtyjen havaintojen perusteella voidaan päätellä rakenteen perusteellisen uusimisen olevan paras ratkaisu, kun sekä rakenteen ulko- että sisäkuoressa on puutteita ja korjauksella tavoitellaan pitkää käyttöikä, tai kun rakennusta halutaan modernisoida uudisrakennuksen tasolle. Pelkästään uloimpien rakenteiden ja lämmöneristeiden uusiminen saattaa lähennellä kustannuksiltaan koko rakenteen uusimista ja myös sillä voidaan saavuttaa rakenteelle pitkä käyttöikä, mutta kyseinen korjausvaihtoehto ei ole sopiva, mikäli sisäkuoren tiiveydessä on puutteita.

Pelkästään sisäpintoihin tehtävät korjaustoimenpiteet ovat riittäviä, jos korjauksen tavoitteena ei ole useiden kymmenien vuosien käyttöikä ja havaittujen vaurioiden edellyttämät korjaukset ovat enintään paikallisia. Sisäpintojen tiiveyden parantamista voidaan käyttää myös käyttöä turvaavana toimenpiteenä, mikäli laajamittaisiin korjauksiin voitaisiin ryhtyä vasta useamman vuoden jälkeen. Näin meneteltäessä sisä- ja ulkokuoren korjaukset voidaan vaiheistaa esimerkiksi 5–10 vuoden ajanjaksolle ja rakennuksen käyttö korjaustöiden aikana helpottuu. Vaiheistettu korjaustyö kannattaa yleensä aloittaa sisäkuoren tiiveyden varmistamisesta.

Paras lopputulos saavutetaan yleensä laajimmalla korjaustasolla etenkin silloin, jos korjaustoimenpiteitä joudutaan kohdistamaan myös kantaviin runkorakenteisiin. Rakennuksen vaurioituminen ja havaitut puutteet eivät yleensä ole samanlaiset rakennuksen kaikilla sivuilla tai rakennuksen kaikissa osissa, joten kannattavin korjauslaajuus voi olla yhdistelmä A, B ja C tasoisia korjaustoimenpiteitä rakennuksen eri puolilla. Korjauksen onnistumisen kannalta on keskeistä varmistaa riittävät lähtötiedot ja suunnitella korjaukset kokonaisuutena pitkän aikavälin tavoitteet huomioiden.

Tässä seminaariartikkelissa esiteltyjä kandidaatintutkielman keskeisimpiä tuloksia tullaan vielä

täydentämään seminaariesityksessä rakennusfysikaalisilla näkökulmilla ja tarkasteluilla. Tuloksia täydennetään eristemateriaalin vaihtoon liittyvillä huomioilla ja ainakin fenolivaahoeristeellä toteutettavan korjaustavan rakennusfysikaalisella analyysillä. Tehdyt simulaatiot ja homehtumisriskianalyysi uusia mitoitusvuosia käyttäen esitellään seminaarissa. Artikkelia kirjoitettaessa tarkastelut olivat osittain kesken eikä niiden perusteellinen raportointi olisi mahtunut julkaisulta vaadittuun rajalliseen sivumäärään. Esittävä kirjoittaja on vastannut lisätarkasteluista A-Insinöörit Suunnittelu Oy:ssä ja toiminut myös työn vastuuhjaajana Tampereen yliopistossa. Kandidaatintyö toteutettiin A-Insinöörien koordinoimassa pienryhmässä ja se on julkaistu Tampereen yliopiston Trepo-tietokannassa.

Lähdeluettelo

- [1] Lahdensivu, J., Pakkala, T., Pikkuvirta, J., Räsänen, A., Alastalo, S., Karvonen, A., Täubel, M., Pekkanen, J., Juntunen, M., Velashjerdi Farahani, A., Jokisalo, J., Kosonen, R., Jylhä, K., Lanki, T., Leino, O. & Kollanus, V. (2023). Rakennusten kosteusvauriot ja ylläpidon muuttuvassa ilmastossa – RAIL. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2023:2. Valtioneuvoston kanslia, Helsinki. 190 s. Saatavissa (viitattu 27.1.2023): <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-278-7>
- [2] Vinha, J., Laukkanen, A., Mäkitalo, M., Nurmi, S., Huttunen, P., Pakkanen, T., Kero, P., Manelius, E., Lahdensivu, J., Köliö, A., Lähdesmäki, K., Piironen, J., Kuhno, V., Pirinen, M., Aaltonen, A., Suonketo, J., Jokisalo, J., Teriö, O., Koskenvesa A. & Palolahti T. (2013). Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere. 354 s. Saatavissa (viitattu 28.1.2023): <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-2949-8>
- [3] Oy Partek Ab (1980). Lämpövihko, Ajatuksia taloudellisen lämmöneristyksen suunnittelusta pientaloissa. Martinpaino, Helsinki. 29 s.
- [4] Turpeinen, S. (2023). Tiiliverhotun puurunkoisen pientalon ulkoseinärakenteen korjausvaihtoehdot. Tampereen yliopisto, Tampere. 28 s. Saatavissa (viitattu 14.8.2023): <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202305195949>
- [5] Weijo, I., Lahdensivu, J., Turunen, T., Ahola, S., Sistonen, E., Vornanen-Winqvist, C. & Annala, P. (2019). Kosteus- ja mikrobivaurioituneiden rakennusten korjaus. Ympäristöministeriön julkaisuja 2019:18. Ympäristöministeriö, Vantaa. 284 s. Saatavissa (viitattu 19.2.2023): <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-361-024-8>

Eristerappausten mikrobiologinen toimivuus

Virpi Leivo, Jussa Pikkuvirta, Toni Pakkala, Jommi Suonketo, ja Matti Pentti
Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka

Tiivistelmä

Eristerappausrakenteissa on havaittu ongelmia, johtuen mm. epäonnistumisista rakenteiden liitosten toteutuksessa sekä työ- ja suunnitteluvirheistä. Näistä aiheutuu mm. rappauksen halkeilua, joiden kautta rappaukseen voi tunkeutua sadevettä, jonka kuivuminen on hidasta, ja tämä voi johtaa ulkonäköhaittaan, pakkasenkestävyysongelmiin sekä mahdolliseen mikrobikasvuun eristekerroksessa. Mikrobikasvustojen todellisesta esiintymisestä ja yleisyydestä ei kuitenkaan ole tietoa. Hankkeessa on selvitetty, kuinka yleistä mikrobikasvu on villaeristeiden päälle rapattujen rakenteiden eristekerroksessa. Hankkeessa on otettu materiaalinäytteitä sekä välittömästi eristeen pinnasta rappauksen takaa että syvemältä eristetilasta sekä ehjistä että halkeilleista kohdista. Halkeaman kohdalta eristeen ulkopinnasta otetuissa näytteissä havaittiin mikrobikasvua 28 % näytteistä, syvemältä eristetilasta otetuissa 12 %. Vastaavasti ehjän rappauksen alta, eristeen ulkopinnasta otetuissa näytteissä havaittiin mikrobikasvua 15 %, syvemältä eristeestä 3,4 %. Ehjän rappauksen alta otetut näytteet kuvaavat eristerappausten mikrobiologista toimivuutta silloin, kun rakenne on suunniteltu ja toteutettu oikein. Laajasti vaurioituneiden eristerappausten tapauksessa mikrobikasvustolöydökset ovat huomattavan yleisiä, minkä vuoksi vaurioitumiseen tulee reagoida ajoissa.

1. Johdanto

Paksurappaus-eristejärjestelmiä on käytetty 1980-luvulta ja ohutrappaus-eristejärjestelmiä 1980- ja 1990-lukujen taitteesta. Ensimmäiset betonielementtijulkisivujen korjaamisessa käytetyt eristerappausratkaisut ovat yli 30 vuotta vanhoja. 2000-luvulla eristerappaukset ovat yleistyneet merkittävästi uudisrakentamisessa, myös elementtirakenteissa. Eristerappausrakenteiden ongelmat johtuvat muun muassa epäonnistumisista rakenteiden liitosten toteutuksessa sekä työ- ja suunnitteluvirheistä [1]. Yleisin näistä aiheutuva vaurio on rappauksen halkeilu. Halkeamien tai huonosti tehtyjen tiivistysten kautta rappaukseen voi tunkeutua sadevettä, jonka kuivuminen on hidasta, ja tämä voi johtaa ulkonäköhaittaan, pakkasenkestävyysongelmiin sekä mahdolliseen mikrobikasvuun eristekerroksessa. Mikrobikasvustojen todellisesta esiintymisestä ja yleisyydestä ei kuitenkaan ole tietoa. Hankkeessa selvitetään, kuinka yleistä mikrobikasvu on eristerapattujen rakenteiden eristekerroksessa.

2. Koekohteet ja tutkimusmenetelmät

2.1 Koekohteet

Alkuperäisen tutkimussuunnitelman mukaan koekohteiksi pyrittiin etsimään sekä ehjiä, toimivia että ongelmallisia villaeristeiden päälle tehtyjä eristerappauksia. Varsin pian kävi ilmi, etteivät rakennusten omistajat, joiden kohteessa on ehjä ja toimiva rappaus, halunneet osallistua tutkimukseen, jossa rappaukseen olisi porattu reikiä. Koekohteiksi siten valikoitui eristerapattuja rakennuksia, joissa on havaittu eristerappausten halkeilua. Näissä näytteitä on otettu rappauksen ehjistä kohdista ja halkeilleista kohdista. Näytteenotto on pyritty tekemään samanaikaisesti julkisivun kuntotutkimusten tai julkisivun korjaustyön (ennen kuin vanha eriste/rappaus on

purettu) kanssa. Joissakin tapauksissa näytteenotto on päästy tekemään vasta kun rappaus on jo purettu. Mikrobinäytteitä on otettu eri-ikäisistä rakenteista, eri ilmastovyöhykkeiltä (rannikko, sisämaa) ja eri eristerappausjärjestelmistä (ohutrappaus, paksurappaus). Jokaisesta kohteesta on otettu pääasiassa 10...20 eristenäytettä, sekä ehjistä että vaurioituneista (halkeilleista) kohdista. Myös eri rasitusoloista (rakennuksen yläosa/alaosa, eri ilmansuunnat) on pyritty ottamaan näytteitä. Rappauksen ikä vaihteli muutaman vuoden vanhoista yli 30 vuotta vanhaan, keski-ikä noin 10 vuotta. Pääosin rakennuksissa oli havaittu rappauksen halkeilua eteläjulkisivussa ja suurin osa näytteistä otettiin kyseiseltä julkisivulta, jotta saatiin vertailunäytteitä ehjästä ja halkeilleesta kohdasta. Koekohteita oli yhteensä 13 ja niistä otettiin yhteensä 308 näytettä. Tämän syksyn aikana tullaan ottamaan vielä muutamia lisänäytteitä.

2.2 Tutkimusmenetelmät

Näytteenotto ja näytteiden merkitseminen tehtiin systemaattisesti seuraavasti:

- (A1) Halkeaman kohdalta rappauksen alta, 0–5 mm eristeen ulkopinnasta
- (A2) Halkeaman kohdalta, 10–15 mm eristeen ulkopinnasta
- (B1) Halkeaman vierestä tai yläpuolelta (ehjä), 0–5 mm eristeen ulkopinnasta
- (B2) Halkeaman vierestä tai yläpuolelta (ehjä), 10–15 mm eristeen ulkopinnasta

Lisäksi joissakin kohteissa näytteenottoa laajennettiin halkeaman ympärillä joko halkeaman vierestä tai yläpuolelta (ehjä) tai halkeamasta sivuttain alaspäin (veden kulkusuuntaan) seuraavilta etäisyyksiltä halkeamasta:

- (C1) 50 mm halkeamasta, 0–5 mm eristeen ulkopinnasta
- (C2) 50 mm halkeamasta, 10–15 mm eristeen ulkopinnasta
- (D1) 100 mm halkeamasta, 0–5 mm eristeen ulkopinnasta
- (D2) 100 mm halkeamasta, 10–15 mm eristeen ulkopinnasta
- (E1) 200 mm halkeamasta, 0–5 mm eristeen ulkopinnasta
- (E2) 200 mm halkeamasta, 10–15 mm eristeen ulkopinnasta

Näytteenottokohdalta rappaukseen porattiin n. Ø50 mm reikä. Porakohdasta mitattiin laastikerroksen paksuus sekä arvioitiin rappausverkon / -verkkojen sijainti laastikerroksessa. Jokaisesta näytteenottokohdasta otettiin kaksi näytettä. Ensimmäinen villaeristenäyte kerättiin laastikerroksen välittömästä läheisyydestä (0–5 mm syvyydeltä), eristekerroksen ulkopinnasta. Näyte (n. 5 g) kerättiin puhtailla näytteenottoon soveltuvilla pihdeillä tiiviisti suljettavaan muovipussiin. Toinen näyte kerättiin 10–15 mm syvyydeltä eristeen ulkopinnasta mitattuna. Porakohdasta poistettiin eristettä sen verran, että mainittu syvyys saavutettiin. Toinen näyte kerättiin puhtailla pihdeillä tiiviisti suljettavaan muovipussiin. Ennen jokaista varsinaista näytteenottoa näytteenottopihdit puhdistettiin kastamalla spriihin. Näytteet lähetettiin mahdollisimman pian mikrobianalyysilaboratorioon analysoitavaksi.

Mikrobien analyysimenetelmän (=suoraviljely materiaalinäytteestä) perustana on Asumisterveysasetuksen soveltamisohje [2]. Menetelmässä näytettä lusikoidaan / nostellaan vakiomäärä 0,5 ml maljalle tai n. 10 kohtaan maljalla. Valviran ohjeistuksen mukaisessa suoraviljelyssä käytetään neljää maljatyyppiä (kasvatusalustaa) jokaiselle näytteelle. Käytetyt kasvatusalustat olivat: sienille 2 % mallasuute (M2), dikloranglyseroli-18 (DG18)-alusta ja Hagem (Rose Bengal mallasuute-alusta) –alusta sekä bakteereille (kuten aktinomykeetit eli sädesienet) Tryptoni-hiivauute- glukoosialusta (THG). Kasvatusmaljoja säilytettiin +25 °C ± 3 °C, sienien kasvatusalustaa 7 vrk ja bakteerien 14 vrk. Suoraviljelymenetelmän tulokset ilmoitetaan määräärviona käyttäen + -asteikkoa seuraavasti:

- = ei mikrobeja

- + = 1–19 pesäkettä (niukasti mikrobeja)
- ++ = 20–49 pesäkettä (kohtalaisesti mikrobeja)
- +++ = 50–199 pesäkettä (runsaasti mikrobeja)
- ++++ \geq 200 pesäkettä (erittäin runsaasti mikrobeja).

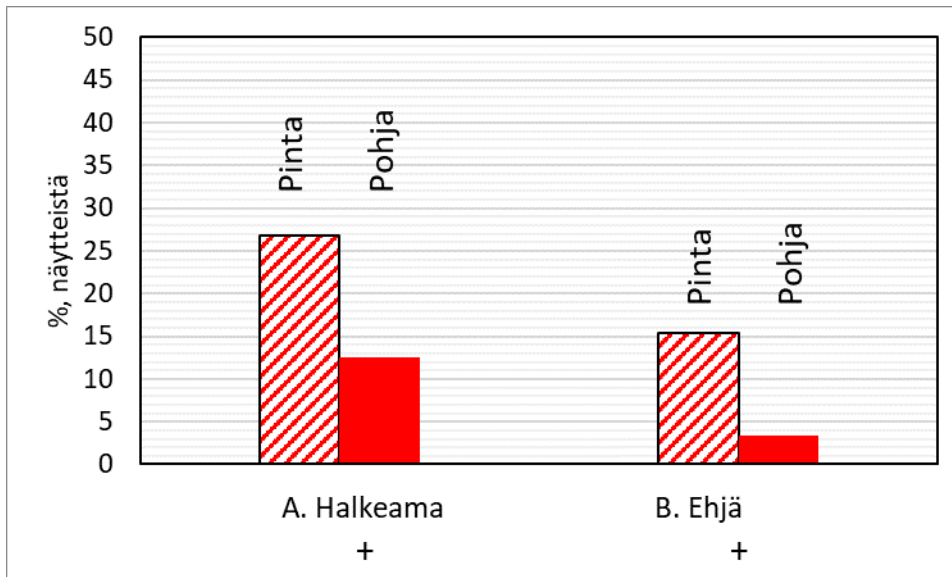
Rakennusmateriaalissa voidaan katsoa esiintyvän mikrobikasvustoa, kun suoraviljelyllä materiaalinäytteessä havaitaan elinkykyisiä sieni-itiöitä ja/tai aktinomykettejä runsaasti (+++/++++). Suoraviljelyn tulokset voivat viitata mikrobikasvustoon silloin, kun mikrobeja on kohtalaisesti tai niukasti, mutta lajistossa on kosteusvaurioindikaattoreita. Seuraavan kappaleen tuloksissa näytteessä katsotaan havaitun mikrobikasvuja, jos suoraviljelyllä materiaalinäytteessä havaitaan elinkykyisiä sieni-itiöitä ja/tai aktinomykettejä runsaasti (+++/++++) tai lajistossa on kosteusvaurioindikaattoreita. Rakennusmateriaalissa ei katsota olevan kasvustoa, kun ei havaita sieni-itiöitä (-) tai pesäkemäärä + ja kosteusvauriomikrobeja ei havaittu tai havaittiin vain yksittäisiä pesäkkeitä.

Eristenäytteitä on otettu yhteensä 308, joista 70 on otettu kahdesta kohteesta, joissa rappaus oli vaurioitunut hyvin laaja-alaisesti arviolta työvirheen takia eli rappauksessa oli runsaasti halkeilua tai rappaus oli irronnut kokonaan (näytteet kyseiseltä kohdalta). Lisäksi 66 näytettä otettiin halkeaman ympäriltä (C1/C2...E1/E2), tavoitteena selvittää kuinka pitkälle halkeamassa havaittu mikrobikasvu leviää eristetilassa. Yhteensä 172 näytettä on otettu kohteista, joissa yksittäisiä halkeamia, edelle esitetyn systemaattisen näytteenoton mukaisesti (A1/A2, B1/B2). Näistä näytteistä 60 % on otettu selkeän halkeaman kohdalta ja noin 55 % eristeen ulkopinnalta, suoraan rappauksen alta. Otetuista näytteistä 54 % on otettu rannikolla (Helsinki, Espoo, Vantaa) olevista kohteista. Suurin osa kaikista näytteistä (92 %) on ohutrappatuista kohteista.

3. Tulokset

Yhteensä 172 näytteen otoksessa, jossa näytteitä on otettu halkeaman kohdalta (A) ja halkeaman vierestä tai yläpuolelta ehjän rappauksen kohdalta (B), eristemateriaalinäytteistä 84 %:ssa ei havaittu mikrobikasvua. Kuvassa 1 tulos on jaoteltu halkeaman kohdalta (A) ja ehjän rappauksen alta (B), eri syvyyksiltä otettuihin näytteisiin. Halkeaman kohdalta eristeen ulkopinnasta (0–5 mm) otetuissa näytteissä havaittiin mikrobikasvua 28 %:ssa näytteistä, syvemmältä (10–15 mm) eristetilasta otetuissa 12 %:ssa. Vastaavasti ehjän rappauksen alta, eristeen ulkopinnasta otetuissa näytteissä havaittiin mikrobikasvua 15 %, syvemmältä eristeestä 3,4 %. Rannikolta tai sisämaasta otetuissa näytteissä ei havaittu selkeää eroa mikrobikasvun yleisyydessä. Paksurappatuista kohteista otetuissa näytteissä mikrobikasvu oli jonkin verran harvinaisempaa (8 %) kuin ohutrappatuista kohteista otetuissa (17 %), mutta paksurappauskohteiden otosmäärä oli pieni.

Vertailuna 1999 tehdyssä tutkimuksessa betonijulkisivujen mikrobiologinen toimivuus [3] 89,8 % betonielementtien eristetilasta otetuista näytteistä luokiteltiin mesofiilisen sieni- tai sädesienikasvun suhteen puhtaiksi. Tuolloin analyysimenetelmä ja kosteusvaurioindikaattorilajien lista olivat hieman erilaisia.



Kuva 1. Eristemateriaalinäytteen mikrobikasvu halkeaman kohdalta (A) ja ehjän rappauksen kohdalta (B) ja eristeen ulkopinnasta (pinta) ja syvemmältä eristeestä (pohja) otetuissa näytteissä.

Noin 70 näytteen otoksesta, jossa näytteitä otettiin epäonnistuneesta rappauksesta (rappaus ei ollut tarttunut rappausverkkoon todennäköisesti vääränlaisen verkon vuoksi) ja irronneen rappauksen kohdalta, mikrobikasvu oli huomattavasti yleisempää, noin 72 % näytteistä kasvoi mikrobeja. Eristeen ulkopinnan läheltä otetuissa näytteissä oli enemmän mikrobikasvua (80 %) kuin syvemmältä eristekerroksesta otetuissa (63 %).

Lisäksi 66 näytteen otoksessa, jossa näytteitä otettiin alaviistoon halkeamasta 50–200 mm etäisyydeltä, mikrobikasvua havaittiin 27 % näytteistä, joista 89 % oli otettu eristeen ulkopinnasta. Mahdollisesta halkeamasta mikrobikasvu näyttää laajenevan eristetilassa veden kulkusuunnassa.

Yleisimpiä havaittuja kosteusindikaattorilajeja olivat *aktinomykeetti*-bakterit (sädesienet) ja *Coelomycetes s.r.*-homesienet.

Eristerappauksen eristetilasta otettujen mikrobinäytteiden tulosten perusteella mikrobikasvu ei ole yleistä, vain 16 % näytteistä kasvoi mikrobeja. Mikrobikasvua havaittiin yleisemmin rappauksessa olevan halkeaman kohdalla otetuissa näytteissä ja eristeen ulkopinnasta otetuissa näytteissä (28 % näytteistä). Syvemmältä eristeestä otetuissa näytteissä kasvoi mikrobeja halkeaman kohdalla vain 12 % näytteistä. Vastaavasti ehjän rappauksen alta, eristeen ulkopinnasta otetuissa näytteissä havaittiin mikrobikasvua 15 %, syvemmältä eristeestä 3,4 %.

Osa eristemateriaalinäytteistä oli otettu epäonnistuneista rappauksista, irronneen rappauksen kohdalla. Näissä näytteissä mikrobikasvu oli huomattavasti yleisempää, 72 % näytteistä kasvoi mikrobeja. Tämän voidaan kuvaavan tilannetta, jossa rappaus on epäonnistunut suunnittelu- tai toteutusvirheen vuoksi ja rappaus ei ole korjattu mahdollisimman pian ongelman ilmetessä.

Näytteenottomäärä ja koekohdemäärä jäi alkuperäisestä suunnitelmasta, koska kuntotutkittavia tai korjauksessa olevia eristerappauskohteita ei löydetty riittävästi. Toimivia eristerappauskohteita, joihin omistaja olisi antanut tehdä reikiä, ei löytynyt yhtään. Kohteiden vähyys indikoi osaltaan ongelmallisten kohteiden yleisyyttä. Toisaalta tiedossa on myös kohteita, jotka ovat menossa korjaukseen, mutta korjauksia viivästetty rakentamisen suhdanteiden vuoksi.

Yleisimmän kuntotutkitut tai korjattavat kohteet olivat noin 10 vanhoja (10-vuotisvastuu). Tämä voi johtua 10-vuotisvastuun lisäksi myös siitä, että tuolloin tehtiin paljon eristerappauskohteita tai rappauksen suunnittelussa tai toteutuksessa oli vielä kehittämistä. Ensimmäinen kansallinen ohjeistus eristerappauksen toteutuksesta, by 57 Eriste- ja levyrappaus on julkaistu vuonna 2011 (päivitetty vuonna 2016) [4].

4. Yhteenveto

Tutkimuksessa pyrittiin selvittämään, kuinka yleistä on mikrobikasvu villaeristeen päälle tehdyn eristerapatun julkisivun eristetilassa. Eristemateriaalinäytteitä otettiin rappauksen ehjistä kohdista ja halkeilleista kohdista, sekä eristeen ulkopinnasta (0–5 mm) että syvempää (10–15 mm) eristeestä. Ehjän rappauksen kohdalta eristetilasta otettujen mikrobinäytteiden tulokset kuvaavat eristerapatun julkisivun mikrobiologista toimivuutta silloin, kun rakenne on suunniteltu ja toteutettu siten, että halkeamia ei muodostu. Tutkimuksessa ehjän rappauksen alta, eristeen ulkopinnasta otetuissa näytteissä havaittiin mikrobikasvua 15 %, syvemmillä eristeistä 3,4 %. Vastaavasti halkeilleen rappauksen alta otetuissa mikrobinäytteissä mikrobikasvu oli yleisempää, 28 % eristeen ulkopinnasta ja 12 % syvemmillä eristeistä otetuissa näytteissä. Mikrobikasvun yleisyydessä eristeen ulkopinnassa (0–5 mm) ja syvemmillä eristeissä (10–15 mm) oli huomattava ero. Rappauksen halkeilu lisää siten mikrobikasvun riskiä ja rakenteen oikeaan suunnitteluun ja huolelliseen laadunvarmistukseen on panostettava. Lisäksi rappauksen halkeaminen oikea-aikainen korjaus estää mikrobien leviämisen laajemmalle eristetilassa.

Lähdeluettelo

- [1] Antti-Matti Lemberg. 2019. Eristerappausjärjestelmien vauriomekanismit ja kuntotutkimusmenetelmät. Tampereen yliopisto, Diplomityö. 144 s. +33 liites.
- [2] Valvira. 2016. Asumisterveysasetuksen soveltamisohje. Sosiaali- ja terveysalan lupa- ja valvontavirasto.
- [3] Pessi, A-M, Suonketo, J., Pentti, M., Rantio-Lehtimäki, A. 1999. Betonielementtijulkisivujen mikrobiologinen toimivuus. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Talonrakennustekniikka, Julkaisu 101.
- [4] By 57. 2016. Eriste- ja levyrappaus. Betoniyhdistys, BY. 145 s.

Myöhäisen ettringiittireaktion merkitys betonijulkisivujen pakkasrapautumisessa

Niko Lindman^{1,3}, Elina Lahdensivu², Jukka Lahdensivu¹ ja Toni Pakkala³

¹Ramboll Finland Oy

²A-Insinöörit Suunnittelu Oy

³Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka

Tiivistelmä

Suurimpia myöhäisvaiheen ettringiittireaktion (*Delayed Ettringite Formation, DEF*) syntymiseen vaikuttavia tekijöitä ja sen roolia suomalaisten betonijulkisivujen vaurioitumisessa ei vielä tunneta riittävän hyvin ja sitä onkin käsitelty akateemisissa julkaisuissa aiemmin vain yhdessä väitöskirjassa ja yhdessä diplomityössä. Näiden johtopäätöksenä todettiin, että DEF voi kiihdyttää pakkasrapautumista, mutta vaurioitumisen voimakkuuteen ja nopeuteen ei otettu kantaa. Tätä tietämystä pyrittiin syventämään tässä artikkelissa tilastomatemattisin menetelmin, hyödyntämällä säähistoriadataa sekä suurta määrää julkisivujen kuntotutkimusraportteja laboratorioanalyysineen. Tutkimuksen tuloksena todettiin, että myöhäisvaiheen ettringiittireaktiota voidaan arvioida esiintyvän yli 50 %:ssa suomalaisista betonijulkisivuista, mutta ilmiö lisäsi merkittävästi julkisivujen pakkasrapautumista vain niissä tapauksissa, jossa ettringiittiä oli muodostunut laaja-alaisesti betonin huokosverkostoon. Laaja-alaista ettringiitin muodostumista havaittiin vain 4,4 %:ssa laboratorioanalyysistä.

1. Johdanto

Suomessa ja muissa pohjoismaissa betonin pakkasenkestävyys on usein varmistettu betonin lisähuokostuksella [1]. Lisähuokostuksen tavoitteena on tuottaa betoniin tasaisesti jakautuneita, läpimitaltaan n. 50 µm suuruisia ns. suojahuokosia, jotka voivat ottaa vastaan betonissa jäätyvän ja sulavan veden aiheuttaman paineen [2,3]. Suojahuokostusta on käytetty Suomessa 1960-luvulta asti [4], mutta ensimmäiset ei-velvoittavat ohjeet sen käytöstä esitettiin vuonna 1976 [1]. Vaatimus lisähuokostuksen käytöstä annettiin vuonna 1980 [5]. Ohjeita ja määräyksiä riittävästä suojahuokossuhteesta (huom: myöhemmin huokosjako) on annettu tämän jälkeen vuosina 1989 [6], 2000 ja 2004 [7].

Yksi betonin pakkasenkesto-ominaisuuksia heikentävistä tekijöistä on ns. myöhäisvaiheen ettringiittireaktio. Ilmiön on todettu vaikuttavan betonin vaurioitumiseen tukkimalla betonin huokosverkostoa ja siten alentamalla betonin pakkasenkestävyyttä ja/tai betonin huokosten täyttyessä ettringiitistä kokonaan, aiheuttamalla betoniin sisäistä halkeilua [8]. Monissa tutkimusraporteissa ettringiittiä on havaittu muodostuneen vaurioituneeseen betoniin. Ilmiö esiintyy kuitenkin usein yhdessä esimerkiksi alkalikiviainesreaktion kanssa tai tilanteissa, jossa betonirakenne on rapautunut myös muiden tekijöiden takia. Tällöin on vaikea arvioida, kuinka iso osa myöhäisvaiheen ettringiittireaktiolla itsellään on betonirakenteiden vaurioitumisessa [9].

Myöhäisvaiheen ettringiittireaktion vaikutusta suomalaisten betonijulkisivujen pakkasrapautumisessa ei vielä tunneta riittävän hyvin ja sitä onkin käsitelty akateemisissa julkaisuissa aiemmin vain yhdessä väitöskirjassa [4] ja yhdessä diplomityössä [10]. Molemmat julkaisut suosittelivat yhtenä jatkotutkimustarpeena täydentämään tätä tietämystä tarkemmin erillisellä tutkimuksella. Tämän artikkelin tavoitteena oli selvittää myöhäisvaiheen

ettringiittireaktion osuutta suomalaisten betonijulkisivujen pakkasvaurioitumisessa vastaamalla seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- lisääkö myöhäisvaiheen ettringiittireaktio merkittävästi suomalaisten betonijulkisivujen pakkasrapautumista?
- mitkä ovat keskeisimmät yksittäiset tekijät, jotka aiheuttavat myöhäisvaiheen ettringiittireaktion syntymistä?
- kuinka rakentamisen ohjeet ja määräykset ovat vaikuttaneet myöhäisvaiheen ettringiittireaktion esiintymiseen eri aikakausina?
- kuinka suurta osaa suomalaista rakennuskantaa myöhäisvaiheen ettringiittireaktio koskettaa?

2. Ettringiitistä

Ettringiitti on tärkeä Portlandsementin hydrataation reaktiotuotteena syntyvä mineraali. Tuoreen betonin hydrataatiossa muodostuva ettringiitti reagoi edelleen sementin trikalsiumaluminaatin kanssa muodostaen kalsiummonosulfaattialuminaattihydraattia [2] ja sillä on tärkeä osa betonin lujuuden kehityksessä ja stabiiliudessa [11]. Ei toivottua sen sijaan on kovettuneen betonin huokosiin sulfaattimineraalien reaktiossa hallitsemattomasti muodostuva myöhäisvaiheen ettringiitti, joka voi olla tilavuudeltaan 130–140 % lähtöaineiden tilavuuteen verrattuna ja voi aiheuttaa betoniin jopa 55,5 Mpa suuruisen sisäisen paineen [12]. Myöhäisvaiheen ettringiittireaktion syynä on yleensä yksi tai useampi seuraavista:

- pitkäaikainen ja voimakas kosteusrasitus [13],
- voimakas lämpötilannousu hydrataation tai erillisen lämpökäsittelyn yhteydessä [13]
- ulkoinen tai sisäinen sulfaattirasitus [5,14].

Betonielementtien lämpökäsittelyn (jopa 60–80 °C) tarkoituksena oli nopeuttaa betonin kovettumisprosessia, jolloin saatiin nopeutettua muottikiertoa [2]. Suomessa menetelmää käytettiin vuodesta 1965 lähtien, mutta kun liiallisen lämpökäsittelyn havaittiin vaikuttavan heikentävästi betonin loppulujuuteen, asetettiin sille ylärajaksi 60 °C vuonna 1977. Liian voimakas lämmönkehitys on myös ollut mahdollinen talvibetonoinnin yhteydessä, jolloin massiivisissa valuisissa hydrataation lämmönkehitys on ollut hallitsematonta. Yleensä kriittisenä lämpötilana myöhäisvaiheen ettringiittireaktiolle on pidetty 70 °C. Tällaisissa lämpötiloissa trikalsiumaluminaatin ja kipsin välinen reaktio tuottaa epästabiilia monosulfaattia (ettringiitin sijasta), mikä voi myöhemmin kiteytyä kovettuneessa betonissa ettringiitiksi [3].

Sulfaattirasituksessa sulfaatit reagoivat portlandiitin kanssa muodostaen kipsiä. Sulfaatti-ionit reagoivat edelleen kipsin ja kalsiumaluminaattihydraattien, monosulfaattien tai hydratoitumattoman trikalsiumaluminaatin kanssa muodostaen ettringiittiä. Betonirakenteet saavat ulkoista sulfaattirasitusta yleensä teollisuusrakennuksissa, siltakohteissa tai rakenteissa, jotka ovat kosketuksissa sulfaattipitoisen maaperän, pohjaveden tai meriveden kanssa [2, 14]. Suomessa betonia pidetään sulfaatinkestävänä, kun sementin trikalsiumaluminaattipitoisuus on rajoitettu enintään 3 p-%:iin [7].

3. Tutkimusaineisto ja -menetelmät

3.1 Tutkimusaineisto

Tutkimusaineisto koostuu pääosin kahdesta lähteestä, joista ensimmäinen on Tampereen yliopiston vuosina 2006–2009 kokoama laaja tietokanta betonijulkisivujen

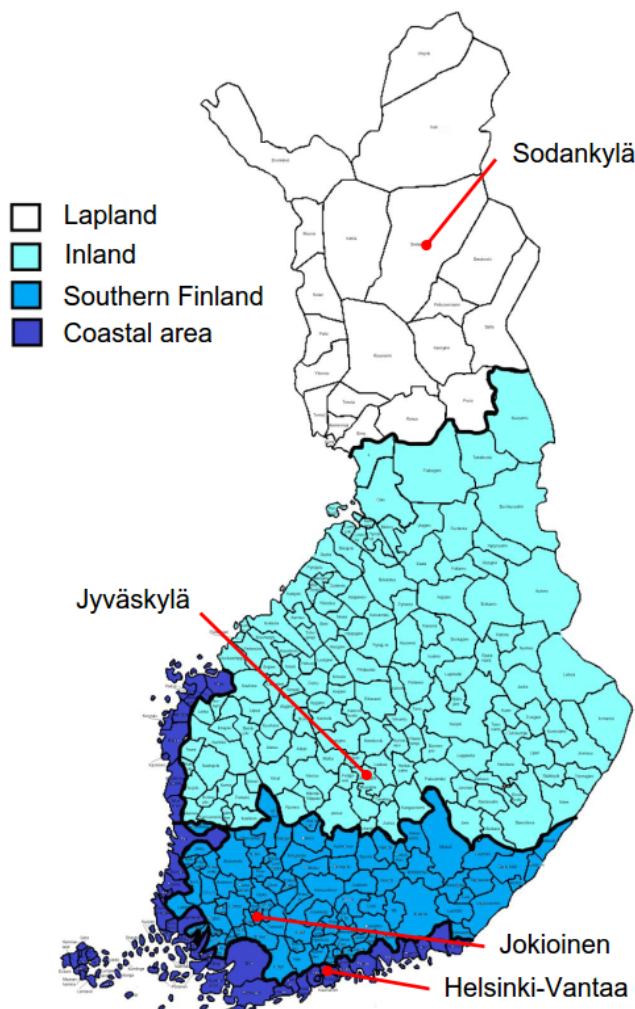
kuntotutkimusraporteista. Toisena lähteenä on käytetty Ramboll Finland Oy:n vuosien 2016–2022 välisenä aikana laatimia betonijulkisivujen kuntotutkimusraportteja. Kuntotutkimusraportit sisältävät rakennusten perustietoja kuten rakennusvuoden, kuntotutkimusvuoden, julkisivun pintatyyppin, maantieteellisen sijainnin ja julkisivujen ilmansuunnat sekä tiedot betonilierionäytteille tehdyistä laboratorioanalyysistä (pakkasrapautumisen aste, huokosten täyttöaste, suojahuokossuhde), kts. Taulukko 1.

Taulukko 1. Betonilierionäytteistä tehdyt laboratorioanalyysit.

Mitattu suure	Määrä (kpl)
Pakkasrapautumiseen viittaava halkeilu	1533
Huokosten täytteisyys	1517
Suojahuokossuhde	2362

Suomi on tutkimuksessa jaettu sääolosuhteiden mukaan neljään osaan, kts. Kuva 1. Säähavaintoaineisto on vapaasti ladattavissa Ilmatieteen laitoksen verkkosivuilta. Tätä artikkelia varten kerättiin tiedot tuulen suunnasta ja sademäärästä tunnin välein vuosilta 1980–2022 neljältä seuraavalta säähavaintoasemalta:

- rannikko, Helsinki-Vantaan lentoasema
- eteläinen Suomi, Jokioisten observatorio
- sisämaa, Jyväskylän lentoasema
- pohjoinen Suomi, Sodankylän observatorio



Kuva 1. Suomen maantieteellinen jako ja käytetyt säähavaintoasemat [15].

3.2 Tutkimusmenetelmät

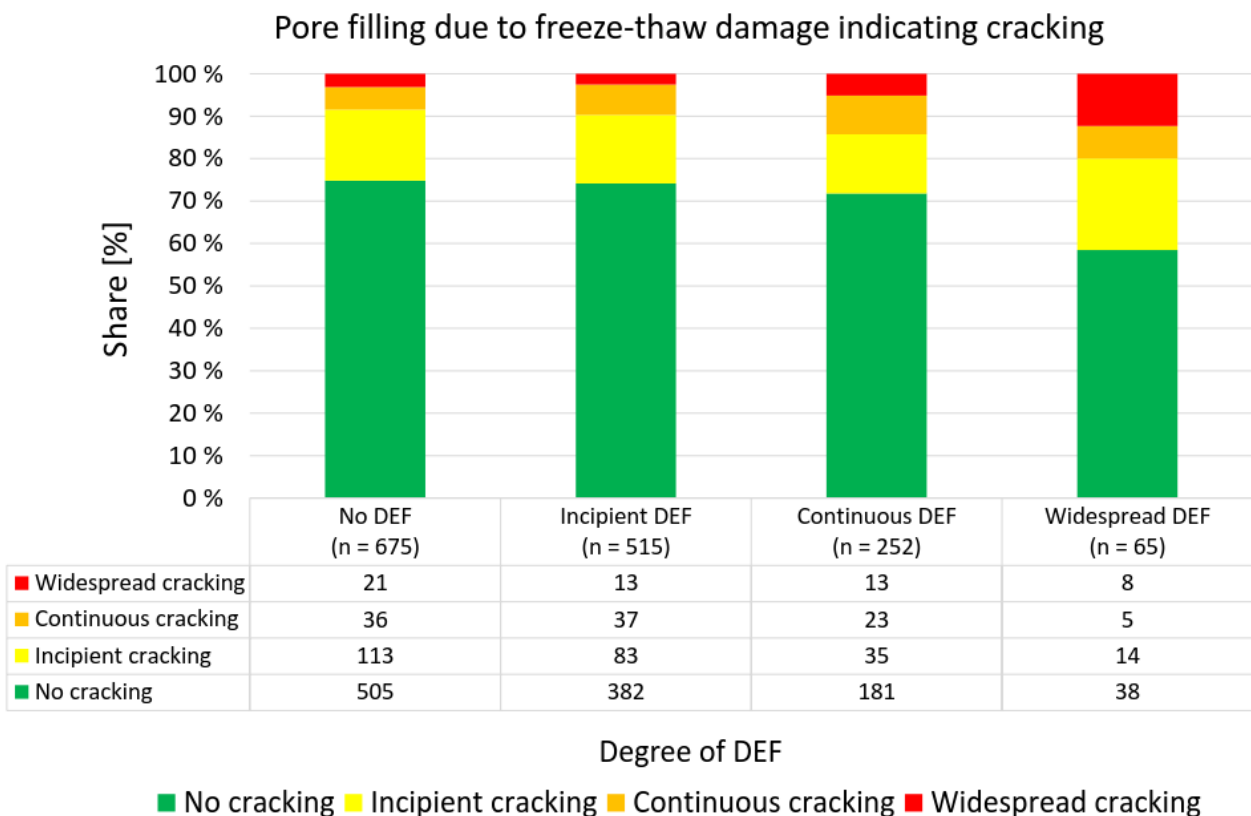
Vuoden 1997 jälkeen tehdyt julkisivujen kuntotutkimusraportit on laadittu Betoniyhdistyksen Betonijulkisivun kuntotutkimus -ohjeen mukaan. Ohje julkaistiin ensimmäisen kerran vuonna 1997 ja sitä on päivitetty vuosina 2002, 2013 ja 2019 [16]. Vuotta 1997 ennen tehdyt raportit on laadittu niiden ihmisten toimesta, jotka ovat kirjoittaneet kyseisen ohjeen. Laboratoriokokeet on laadittu noudattaen standardeja ASTM C856/856M-20 ja SFS 4475 [17,18].

Tutkimusaineistoa analysoitiin ristiintaulukoinnin ja studentin t-testin avulla. Tätä tarkoitusta varten betonin mikrorakennetutkimuksessa kirjoitetussa muodossa annetut tiedot betonin pakkasrapautumiseen viittaavasta halkeilusta sekä huokosten täytteisyydestä on muutettu numeeriseen muotoon Arto Koskiahteen artikkelissa esitetyn mallin mukaan [19].

Kuntotutkimusraporteissa betonilieriöiden näytteenottosuunnat on esitetty pää- ja väli-ilmansuuntien tarkkuudella ja säähavaintoaineisto puolestaan 0,1 asteen tarkkuudella. Säähavaintoaineiston tiedot on muunnettu vastaamaan pää- ja väli-ilmansuuntien jaottelua.

4. Tulosten tarkastelu

Tarkastellessa huokosten täyttöastetta samasta näytteestä havaitun pakkasrapautumiseen viittaavan halkeilun kanssa havaittiin, että suurin osa kaikista havainnoista (34 %) on tilanteita, jossa ei havaittu lainkaan myöhäisvaiheen ettringiittiä eikä pakkasrapautumiseen viittaavaa halkeilua. Vastaavasti vain 0,5 % kaikista havainnoista kuvastivat tilannetta, jossa sekä pakkasrapautumiseen viittaava halkeilu että huokosten täyttöaste olivat laaja-alaisia. Laaja-alaista pakkasrapautumiseen viittaavaa halkeilua havaittiin kaikilla huokosten täyttöasteilla, mutta studentin t-testin perusteella halkeilu on merkittävästi yleisempää ainoastaan tilanteissa, jossa huokosten täytteisyys on laaja-alaista, kts. Kuva 2.



Kuva 2. Myöhäisvaiheen ettringiitin ja pakkasrapautumiseen viittaavan halkeilun havainnot.

5. Yhteenveto

Myöhäisvaiheen ettringiittireaktion vaikutusta suomalaisten betonijulkisivujen pakkasrapautumisessa ei vielä tunneta riittävän hyvin. Tätä selvitettiin tilastomatemattisin menetelmin hyödyntämällä säähistoria-aineistoa sekä laajaa tietokantaa betonijulkisivujen kuntotutkimusraporteista ja niiden yhteydessä otetuista laboratorionäytteistä. Perustuen artikkeleissa tehtyihin tarkasteluihin, tutkimuksesta voitiin tehdä seuraavia päätelmiä:

- kovettuneen betonin täytyminen myöhäisvaiheen ettringiittireaktion seurauksena alentaa betonin pakkasenkestävyyttä, mutta ettringiittiä tulee muodostua laaja-alaisesti ennen kuin se tilastollisesti lisää pakkasrapautumiseen viittaavaa halkeilua
- myöhäisvaiheen ettringiittireaktiota havaittiin yli 50 %:ssa kaikista näytteistä, mutta laaja-alaisen tapausten määrä on hyvin alhainen
- myöhäisvaiheen ettringiittireaktio vaatii tapahtuakseen tarkat olosuhteet. Huokosten täyttymistä ei havaittu näytteissä lainkaan tilanteissa, jossa rakenne oli sateelta suojassa, suojahuokossuhde oli yli 0,15 tai mikäli käytetty rakenteen pintatyyppejä estä rakennetta kastumasta tai vaihtoehtoisesti salli riittävän rakenteen kuivumisen.
- alitteimmat julkisivun pintarakennetyypit myöhäisvaiheen ettringiittireaktiolle olivat paljaat pinnoittamattomat betonipinnat sekä klinkkeri- ja tiililaattapinnat
- viistosade on merkittävin myöhäisvaiheen ettringiittireaktiota aiheuttava rasitusmekanismi, sillä julkisivuelementtien lämpökäsittelyä on jo pitkään rajoitettu ja ulkoiset sulfaattirasituslähteet eivät ole käytännössä mahdollisia kuin erityistapauksissa. Viistosateelle altteimmat julkisivut ovat kaikkialla Suomessa etelä-kaakon suuntaiset julkisivut.
- julkisivuelementtejä ei enää lämpökäsitellä haitallisissa lämpötiloissa ja ulkoisen sulfaattirasituksen mahdollisuutta voidaan pitää tyypillisissä suomalaisissa julkisivurakenteissa myöhäisvaiheen ettringiitin kannalta merkityksemättömänä
- modernit sementtirikkaammat betonireseptit mahdollistavat myöhäisvaiheen ettringiittireaktion tapahtumista voimakkaammin kuin ennen, mutta betonien lisähuokostuksessa on nykyään onnistuttu selvästi menneitä vuosikymmeniä paremmin.

Aineiston suurimpana rajoitteena voidaan pitää sitä, että vanhasta betonirakenteesta ei voida suoraan mitata sen vesi-sementtisuhdetta tai käytettyä sementtimäärää. Tästä syystä myöhäisvaiheen ettringiittireaktiolle altistavia tekijöitä on vanhasta betonirakenteesta tutkittava epäsuorin menetelmin.

Jatkotutkimustarpeina esitetään kahta asiaa. Koska vesi siirtyy betonin huokosverkostossa pääosin kapillaarisesti, tulisi betonin kapillaarista vedenimunopeutta yhdessä myöhäisvaiheen ettringiitin kanssa tutkia tarkemmin, jotta saataisiin parempi käsitys rakenteen kastumis- ja kuivumisominaisuuksista. Lisäksi viistosademäärää tulisi tutkia tarkemmin yhdessä jäätymissulamissykliänsä kanssa, jotta saataisiin tarkempi kuva siitä, kumpi näistä on Suomen ilmastossa merkityksellisempää betonin pakkasrapautumisen kannalta.

Lähdeluettelo

- [1] BY 9. Betonin säilyvyys 1976. Suomen Betoniyhdistys ry. 44 s.
- [2] Neville AM: "Properties of concrete", Longman Group Limited, Essex, England, 1995, p. 844.
- [3] BY 201. Betonitekniikan oppikirja 2018. Suomen Betoniyhdistys ry. 568 s.

- [4] Lahdensivu J: “Durability Properties and Actual Deterioration of Finnish Concrete Façades and Balconies”, DSc thesis, TUT Publ. 1028, Tampere University of Technology, 2012, p. 117. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-2823-1>
- [5] BY 15. Betoninormit 1980. Suomen Betoniyhdistys ry. 130 s.
- [6] BY 32. Betonirakenteiden säilyvyysohjeet ja käyttöikämitoitus 1989. Suomen Betoniyhdistys ry. 60 s.
- [7] BY 50. Betoninormit 2004. Suomen Betoniyhdistys ry. 263 s.
- [8] Lahdensivu, J. Betonijulkisivujen ja parvekkeiden säilyvyys suomalaisissa suunnitteluohjeissa. Tekniikan Waiheita. 3/14. 2014. s. 5-21.
- [9] ACI Committee 201. Guide to Durable Concrete. ACI 201.2R-16. Farmington Hills. USA. 2016. p. 84.
- [10] Lahdensivu, E. Betonielementtikerrostalojen julkisivujen ja parvekkeiden vaurioituminen 1990-luvun rakennustuotannossa. Diplomityö. Tampereen yliopisto. 2022. 80 s. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202210267843>
- [11] Clark, S. M., Colas, B., Kunz, M., Speziale, S., Monteiro, P. J. M. Effect of pressure on the crystal structure of ettringite. Cement and Concrete Research. Vol. 38. 2008. Pp. 19-26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.029>
- [12] Deng, M., Tang, M. Formation and expansion of ettringite crystals. Cement and Concrete Research. Vol. 24. 1994. Pp. 119-126. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90092-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90092-2)
- [13] Escadeillas, G., Aubert, J.-E., Segerer, M., Prince, W. Some factors affecting delayed ettringite formation in heat-cured mortars. Cement and Concrete Research. Vol. 37. 2007.
- [14] Collepardi, M. Ettringite formation and sulfate attack on concrete. Proceedings of Fifth CANMET/ACI International Conference of Durability of Concrete. Supplementary Papers. Barcelona. Spain. 2000. Pp. 25-41. <https://doi.org/10.14359/10569>
- [15] Pakkala T: “Assessment of the Climate Change Effects on Finnish Concrete Facades and Balconies”, Dsc thesis, Tampere University Dissertations 204, Tampere University, 2020, 98 p. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-03-1423-1>
- [16] BY 42. Betonijulkisivun kuntotutkimus 2019. Suomen Betoniyhdistys ry. 122 s.
- [17] ASTM C856/C856M-20. 2020. Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA., United States, 15 p. https://doi.org/10.1520/C0856_C0856M-20
- [18] SFS 4475 (kumottu). 1998. Betoni. Pakkaskestävyys. Suojahuokossuhde. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 2 s.
- [19] Koskiahde, A. An experimental petrographic classification scheme for the condition assessment of concrete in façade panels and balconies. Materials Characterization. Vol. 53. 2004. Pp. 327-334. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2004.09.004>

A6. Kiinteistöjen olosuhteet, hallinnointi ja juridiikka

Suomen koulurakennusten nykykunto

Katja Tähtinen¹, Tuomas Alapieti², Camilla Vornanen-Winqvist² ja Heidi Salonen²

¹ Rakennustietosäätiö RTS sr.

² Aalto-yliopisto

Tiivistelmä

Tässä julkaisussa esitellään Valtioneuvoston kanslian rahoittaman “Koulurakennusten kunto ja sisäilmasto” (KouluKunto) -hankkeen yhden työpaketin sisältöä ja tutkimustuloksia. Työn tavoitteena oli koota yhteen ja analysoida tietoa Suomen koulurakennusten rakenteiden ja ilmanvaihdon kunnosta sekä sisäilmaston laadusta. Lisäksi havainnoitiin rakennusten kuntotutkimus- ja tiedonhallintakäytäntöjä. Aineisto perustuu kuuden kunnan ja 496 koulurakennuksen tietoihin vuosilta 2016–2022. Koulurakennukset ovat pääsääntöisesti vanhoja ja niissä esiintyy yleisesti kosteus- ja mikrobivaurioita sekä ilmanvaihdon ongelmia. Rakennusten painesuhteiden hallinnassa on ongelmia riippumatta rakennusajankohdasta ja ilmanvaihtojärjestelmän teknisen käyttöiän vaiheesta. Ilmanvaihdon ilmavirrat eivät usein vastaa suunniteltuja ilmamääriä riippumatta rakennusajankohdasta. Vain 10 %:iin rakennuksista on tehty kattava sisäilmaston laatuun vaikuttavien tekijöiden arviointi ja 30 % rakennuksista on tutkittu perusteellisesti. Kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus -opasta käytetään laajalti ja se on yhtenäistänyt kuntotutkimuksia ja niiden raportointia. Rakennuskannan tiedonhallintaa tulisi edelleen yhdenmukaistaa. Tutkimus perustuu saatavilla olleeseen aineistoon ja näin ollen tutkimustulosten yleistettävyyys koko maata kattavaksi on rajoitettua.

1. Johdanto

Suurin osa rakennuksistamme on peräisin vuosilta 1960–1989. Kuntien julkisten rakennusten peruskorjauksen sekä toiminnallisten ja laatuvarustusten tarve ylittää 16 miljardia euroa [1]. Useat kunnat kamppailevat vanhentuneen rakennuskannan haasteiden kanssa rajoitettujen taloudellisten resurssien vallitessa [1]. Siten nykyisten rakennusten korjaus ja ennakoiva kiinteistön ylläpito ja hallinta on tärkeää. Oikein ja ajallaan tehdyt korjaukset tukevat rakennuksen sisäympäristön laatua, lisäävät tilojen käyttäjien hyvinvointia ja parantavat rakennuksen palveluvalmiutta. Vuonna 2022 Valtioneuvoston kanslian tutkimus- ja selvitystoiminta käynnisti hankkeen, jonka tavoitteena on saada uutta tietoa koulurakennusten rakenteiden, ilmanvaihdon ja sisäilmaston nykytilasta. "Koulurakennusten kunto ja sisäilmasto" (KouluKunto) -hankkeen myötä tavoitellaan kokonaisvaltaista tietoa Suomen koulurakennusten rakenteiden ja ilmanvaihtojärjestelmien nykyisestä kunnosta ja niiden vaikutuksesta sisäilmaston laatuun. Hankkeen kohteena ovat kunnalliset perusopetuksen rakennukset (esikoulut, ala- ja yläkoulut sekä lukiot). Hankkeen rahoittaa Valtioneuvoston kanslian selvitys- ja tutkimustoiminta. Hanke valmistuu lokakuussa 2023. Hanke toteutetaan Aalto-yliopiston, Rakennustietosäätiö RTS sr:n, Kuntaliiton, Tampereen yliopiston ja FCG Consulting Oy:n yhteistyönä.

Hankkeen tavoitteina on tuottaa kokonaisvaltainen kuva Manner-Suomen oppilaitosrakennuskannan rakenteiden ja ilmanvaihdon kunnosta sekä sisäilmastosta. Lisäksi hankkeessa tuotetaan uutta tietoa ilmastonmuutoksen ja ilmanvaihdon käytön vaikutuksesta rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimivuuteen, mitattuihin ja koettuihin olosuhteisiin ja kosteusturvallisuuteen. Hankkeen tulosten perusteella selvitetään, mitä johtopäätöksiä voidaan tehdä yleissivistävien oppilaitosrakennusten nykytilanteesta ja kuinka tämän kiinteistökannan

hallintaa voidaan ohjata.

Tässä artikkelissa kuvataan hankkeen yhden työpaketin sisältö. Työpaketissa tuotetaan uutta, päivitettyä tietoa Suomen oppilaitosten rakenteiden ja ilmanvaihdon nykykunnosta ja niiden vaikutuksesta sisäilmaston laatuun.

2. Aineiston kuvaus

Tutkimuksessa analysoitiin kuntien koulurakennuksista saatavilla olevia tietoja vuosilta 2016–2022. Tutkimukseen osallistui ja tietoja tutkimuksen käyttöön luovutti kuusi Manner-Suomen kuntaa, joista väestötietojen perusteella kuntakooltaan suurin on 650 000 asukkaan kunta ja pienin 68 000 asukkaan kunta. Kunnat sijoittuvat Uudenmaan, Kanta-Hämeen, Päijät-Hämeen, Pirkanmaan, Pohjanmaan ja Varsinais-Suomen maakuntiin. Aineistossa on 496 oppilaitosrakennusta. Tapauksissa, joissa tontilla sijaisi useampi koulurakennus, kaikki rakennukset tilastoitiin erillisinä rakennuksina. Aineistosta jätettiin pois väli- ja lyhytaikaisina, esimerkiksi väistötiloina, toimivat viipale- ja parakkikoulut.

Aineisto muodostettiin koulurakennuksista saatavilla olevista Rakennusten kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus -opasta [2] noudattelevista kuntotutkimusraporteista ja muista kuntotutkimustasoisesti tehdyistä selvityksistä. Mikäli näitä ei ollut tehty, aineistoon otettiin mukaan mahdolliset kuntoarvion tulokset ja -raportit. Lisäksi aineistoon kerättiin saatavilla olevat rakennusten altistumisolosuhteiden arvioinnin raportoidut tulokset. (Taulukko 1.) Kunnista kerättiin myös perustietoja kaikista kunnan omistuksessa olevista oppilaitosrakennuksista, myös niistä rakennuksista, joista ei ollut saatavilla tai tehty kuntotutkimuksia, -arvioita tai altistumisolosuhteiden arviointia. Näin tarkasteltavaan ja analysoitavaan aineistoon saatiin mukaan kuntien koko koulurakennuskannan tietoja

Taulukko 1. Kohteessa toteutettujen selvitysten ja tutkimusten määrät aineistossa (N=496).

Kohteessa tehty selvitys, tutkimus tai arviointi	Yhteensä (kpl)
Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus [2]	77
Muu kokonaisvaltainen kuntotutkimus	69
Yksittäisen tilan tai tilojen tutkimus (rakenne-, ilmanvaihto-, sisäilmatekninen)	121
Altistumisolosuhteiden arviointi [3]	53
Kuntoarvio [4]	44

3. Menetelmät

Kuntien yhteyshenkilöt mahdollistivat hankkeen tutkijoille pääsyn kunnan kiinteistötietojärjestelmään tai rakennusten tietoihin. Kuntien tietokannoista kerättiin saatavilla olevat koulurakennusten perustiedot (koulun nimi, osoite, rakennusten nimet tai tunnukset, rakennuksen laajuus/koko, valmistumisvuosi, kouluaste, oppilasmäärä, analyysiin valittujen kuntotutkimusten tai muiden selvitysten laajuus ja valmistumisvuosi), mahdolliset peruskorjausvuodet (rakenne-, ilmavaihto- ja sisäilmatekninen), tietoja siitä, onko rakennus käytössä vai ei, sekä rakennukseen suunnitellut toimenpiteet seuraavien vuosien aikana.

Tiedoista taulukoitiin muuttujat eri rakenteista ja niiden pääasiallisista tyypeistä, pääasiallisesta materiaalista, vaurioista ja sisäilman epäpuhtauslähteistä (mikrobit, kuidut ja kemialliset), vaurioiden ja epäpuhtauslähteiden laadusta ja laajuudesta, vaurion mahdollisesta sijainnista

rakenteessa, rakenteen poikkeavasta kosteudesta, vaurioituneiden rakenteiden tai rakenteiden ilmavuotoreiteistä ja niiden laajuudesta, rakennuksen painesuhteista sekä ilmanvaihtojärjestelmästä ja ilmanvaihdosta (ikä, puhtaus, epäpuhtauslähteet ja niiden sijainti järjestelmässä, suodatustaso ja ilmavirtojen suunnitelmanmukaisuus).

Vaurioiden ja ilmavuotoreittien laajuuden määrittelyssä taulukoitiin tieto raporteista siten kuin raportin laatija oli sen määritellyt raportissaan. Taulukon muuttujien otsikoinnissa käytettiin Työterveyslaitoksen altistumisolosuhteiden arvioinnin ohjeen [3] mukaista luokittelua vaurioiden ja ilmavuotoreittien laajuudesta. Mikäli rakennuksesta ei ollut tehty oppaan [2] mukaista kuntotutkimusta, niin vastaavia tietoja kerättiin myös muista rakennuksen kokonaisvaltaisista kuntotutkimusraporteista. Aineistosta kerättiin myös rakennuksen yksittäisiin tiloihin tehtyjen selvitysten tulokset. Näissäkin tutkimuksissa tiedon keräämisen ja taulukoinnin edellytyksenä oli, että tutkimus-, mittaus- ja analysointimenetelmät vastasivat kuntotutkimusoppaassa [2] ja Valviran asumisterveysasetuksen soveltamisohjeessa [5] esitettyjä menetelmiä. Niistä rakennuksista, joissa ei ollut tehty rakennuksen kosteus- ja sisäilmateknistä kuntotutkimusta tai muita kokonaisvaltaisia tutkimuksia, kerättiin ja taulukoitiin saatavilla olevat kuntoarvotiedot.

Lisäksi aineistosta kerättiin altistumisolosuhteiden arvioinnin tulokset. Taulukoitaviksi tiedoiksi valittiin Työterveyslaitoksen ohjeen [3] mukaisesti tehdyt altistumisolosuhteiden arvioinnin tulokset.

Mikäli rakennus oli juuri peruskorjattu tai uusi, eikä kuntotutkimuksia tai muita selvityksiä ollut tehty, niin rakennuksesta kirjattiin aineistoon rakennuksen perustiedot ja tiedossa olevat rakennetyypit ja materiaalit. Analyyseissä rakennusten tietoja on käsitelty tapauskohtaisesti joko koko aineiston osalta (N=496) tai tapauskohtaisesti jättäen aineistosta pois kuntoarvioitujen (n=44) rakennusten tulokset (N=452).

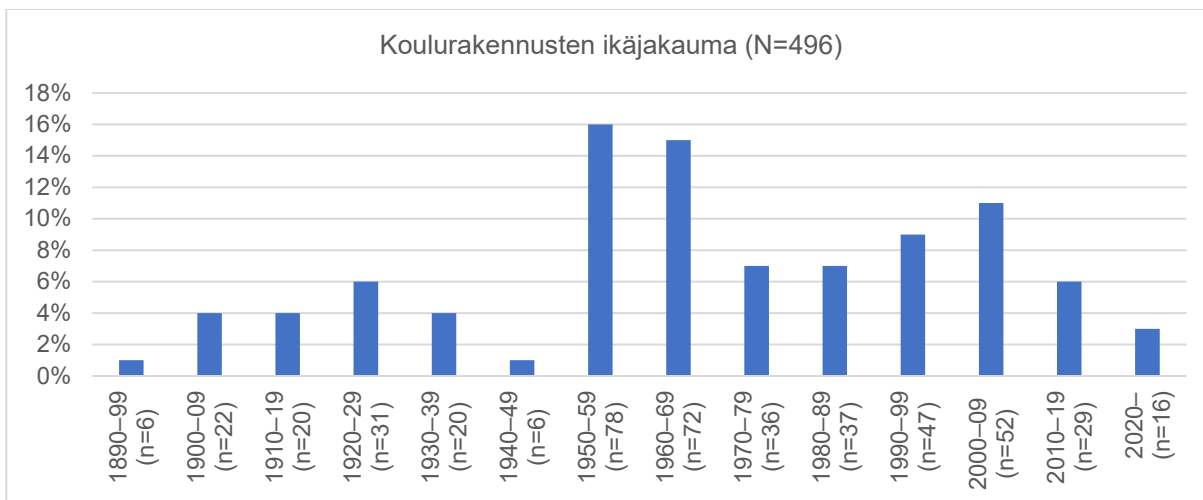
4. Otanta tuloksista

Aineistossa oli eniten vuosina 1950–1959 (n=78, 16 %) ja 1960–1969 (n=72, 15 %) rakennettuja koulurakennuksia. Rakennuksista yhteensä 97 (20 %) oli valmistunut vuosien 2000–2020 välillä. (Kuvio 1.) Ala-asteen kouluja toimi eniten 1950-luvulla (n=37, 22 %) rakennetuissa rakennuksissa. Yläasteen kouluja (n=16, 40 %), lukioita (n=8, 26 %) sekä yläasteen ja lukioiden yhdistelmiä (n=3, 43 %) toimi eniten 1960-luvulla rakennetuissa rakennuksissa. Monitoimitaloihin sijoittuvia eri kouluasteiden ja muiden palveluiden toimintoja oli eniten 2020-luvulla (n=6, 25 %) ja 2010-luvulla (n=3, 13 %) valmistuneissa rakennuksissa.

Rakenteiden ilmavuodoista (missä tahansa rakennuksen rakenteessa tai rakenteen läpi ja missä tahansa rakennekerroksessa tai materiaalissa) oli tutkittua tietoa yhteensä 141 rakennuksesta. Suhteessa eniten ilmavuotoja oli todettu 1990- (n=20, 47 %) ja 1980-luvun (n=15, 46 %) rakennuksien rakenteissa. Rakennusvuosittain tarkasteltuna tilojen painesuhteet ympäröiviin tiloihin ja tai vaipan yli ulkoilmaan eivät olleet hallinnassa 71 %:ssa (n=88) niistä rakennuksista, joissa kyseinen asia oli tutkittu, aiheuttaen joko yli- tai alipainetta tiloissa.

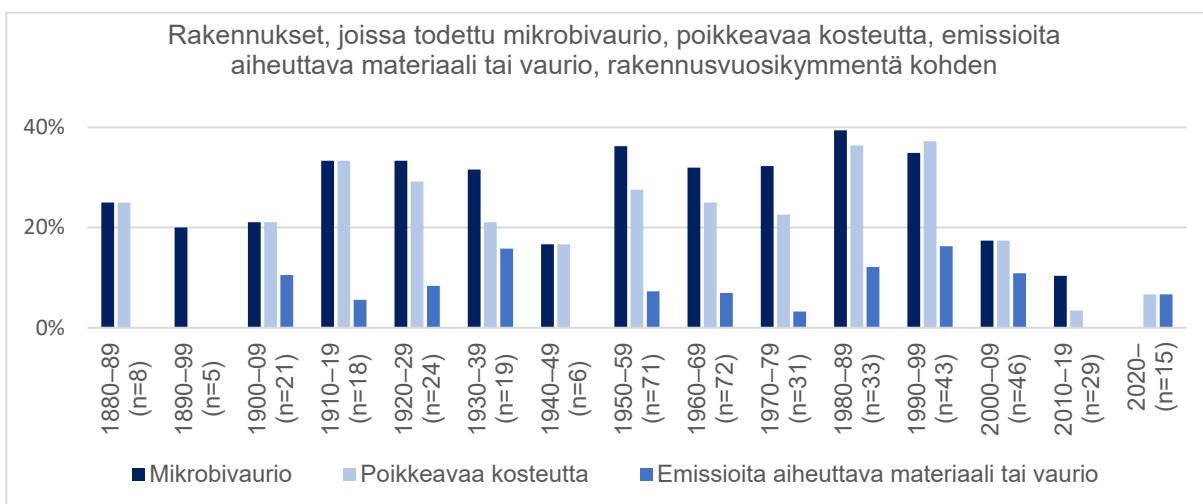
Yleisin ilmanvaihtojärjestelmä oli koneellinen tulo- ja poistoilmajärjestelmä (N=199, 40 %). Rakennusten ilmanvaihtojärjestelmiä oli tarkasteltu ja niistä oli laadittu dokumentti tai kirjallinen merkintä (arvio, tarkastus, kuntotutkimus tai tieto jonkun muun selvityksen osana) tässä aineistossa (N=452) 109 kohteen osalta. Ilmanvaihtojärjestelmän tekninen käyttöikä oli saavutettu tai ylitetty 24 %:ssa (n=107) rakennuksista. Ilmanvaihtojärjestelmän epäpuhtauksia oli tutkittu 81 rakennuksen osalta ja niitä esiintyi yleisemmin ilmanvaihtojärjestelmän useassa osassa

yhtä aikaa (n=45, 56 %) ja aineistossa eniten (n=8, 18 %) 1980-luvun rakennuksissa. Aineistossa 104 rakennuksen kohdalla oli selvitetty myös luokkatilojen ilmanvaihdon ilmavirtojen vastaavuutta suunnitelmiin ja yleisesti ilmanvaihtojärjestelmän toimintaa 122 tapauksessa. Luokkatilojen ilmanvaihdon ilmavirrat eivät vastanneet suunnitelmia 75 %:ssa (n=92) niistä kohteista, joissa ilmanvaihtojärjestelmiin kohdistuneita selvityksiä oli tehty.



Kuvio 1. Koulurakennusten ikäjakauma aineistossa (N=496). Kuviosta on jätetty pois vuosina 1830–59 valmistuneet rakennukset niiden alhaisen lukumäärän vuoksi. Aineiston rakennuksista 12:sta puuttui tieto rakennusvuodesta.

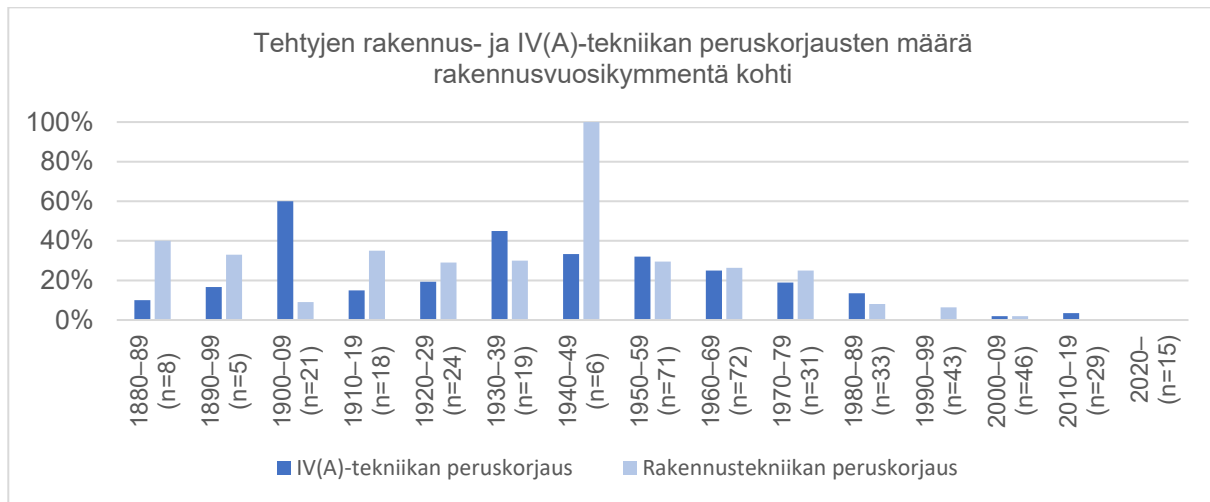
Poikkeavaa kosteutta oli todettu 23 %:ssa (n=114) rakennuksista ja mikrobivaurio 27 %:ssa (n=125) sekä emissioita aiheuttava materiaali tai vaurio jossakin rakennuksen rakenteessa 8 %:ssa rakennuksista (N=452) (Kuvio 2).



Kuvio 2. Niiden rakennusten määrä, joiden rakenteissa tai materiaaleissa esiintyi poikkeavaa kosteutta, mikrobivaurio tai emissioita aiheuttava materiaali tai vaurio, rakennusvuosikymmenittäin.

Altistumisolosuhteiden arviointi oli tehty 10 %:ssa (n=53) aineiston rakennuksista ja 60 %:ssa (n=46) niistä rakennuksista, joissa oli tehty myös rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus (n=77) sekä 7 %:ssa (n=10) niistä rakennuksista, joissa oli tehty joku muu kokonaisvaltainen kuntotutkimus (n=69).

Rakennus- ja IV(A)-tekniikan peruskorjausten määrät rakennusvuosikymmentä kohden on esitetty kuviossa 3. Rakennus- ja ilmanvaihtotekniikan peruskorjauksen tilanteesta oleva tieto oli saatavilla vaihtelevasti kuntien tietojärjestelmissä, ja tieto oli sirpaleista ja siinä oli aukkoja.



Kuvio 3. Aineiston rakennuksissa (N=452) tehtyjen rakennus- ja IV(A)-tekniikan peruskorjausten määrä suhteessa eri vuosikymmenillä rakennettujen rakennusten määrään. Peruskorjaustieto puuttui rakennustekniikan osalta 320 ja IV(A)-tekniikan osalta 346 rakennuksesta. Kuvioista on poistettu 1830–50-lukujen tiedot vähäisen rakennusmäärän vuoksi.

Aineistossa oli 44 rakennusta, joista oli tehty kuntoarviointi vuonna 2016–2022 (näihin rakennuksiin ei ollut kohdistunut kuntotutkimustasoisia selvityksiä kyseisenä aikana). Osassa kunnista kuntoarviointi ei ole kuulunut kiinteistöpidon ohjelman menetelmiin yli 10 vuoteen.

Tuloksia on saatu myös eri rakennetyypeistä, ja eri rakenteissa havaituista poikkeavasta kosteudesta ja vaurioista sekä niiden laajuudesta. Tietoa on tuotettu myös sisäilmaan vaikuttavista rakenteiden epäpuhtauslähteistä ja rakenteiden ilmavuodoista sekä ilmavuotoreittien laajuudesta ja kuntoarvioiden tuloksista. Tulokset esitetään hankkeen loppuraportissa, joka julkaistaan lokakuussa 2023.

5. Yhteenveto

Koulurakennusten käyttötarkoitus ja toiminnallisuus ovat muuttuneet erityisesti viimeisten kahden vuosikymmenen aikana vastaamaan yhteiskunnan muuttuvia tarpeita, mikä näkyy uudempien koulurakennusten valmistumisena monitoimitaloiksi ja joustaviksi rakennuksiksi.

Rakennusten ennakoivan kunnossapidon, korjaamisen, kestävän rakentamisen sekä resurssien oikein kohdistamisen vuoksi olisi välttämätöntä, että tiedonhallintaa voitaisiin yhdenmukaistaa systemaattisesti kunnissa, mutta myös laajemminkin rakennuskannan kunnan, käytettävyyden, muunneltavuuden, uudelleenkäytön ja kierrätyksen näkökulmista sekä niiden edistämiseksi valtakunnallisesti.

Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus -opas on otettu käyttöön laajalti ja se on yhtenäistänyt rakennuksiin kohdistuvien kosteus- ja sisäilmateknisten selvitysten sisältöjä sekä raportointia. Rakenteiden kosteuspoikkeamat osataan tunnistaa, ja niiden taustalla olevat syyt, kosteuspoikkeamien laajuudet ja kosteuspoikkeamien aiheuttamat seuraukset rakenteissa ja materiaaleissa osataan tutkia ja tulokset tulkita. Erityisesti betonirakenteiden kosteuden, siihen

liittyvien ilmiöiden ja sen aiheuttamien poikkeamien tutkiminen ja tulosten raportointi on vakiintunutta.

Noin kolmanneksessa rakennuksista esiintyi mikrobivauriota ja ne ovat melko yleisiä sekä esiintyvät jossain vaiheessa rakennuksen elinkaarta. Suhteessa eniten niitä esiintyy vanhemmassa rakennuskannassa ja ennen 2000-lukua rakennetuissa rakennuksissa. Rakenteiden materiaalien emissiopäästöt ovat harvinaisempia kuin kosteus- ja mikrobivauriot. Rakenteissa tai niiden liitoskohdissa esiintyvät ilmavuotoreitit ovat yleisiä ja todennäköisiä vanhemmassa rakennuskannassa ja silloin, kun rakennukseen ei ole tehty peruskorjausta ja erikseen tai peruskorjauksen yhteydessä rakenteiden tiivistyskorjauksia. Rakennusten painesuhteiden hallinnassa on ongelmia riippumatta rakennusajankohdasta ja ilmanvaihtojärjestelmän teknisen käyttöiän vaiheesta. Kaikkien vuosikymmenten rakennusten kohdalla ilmanvaihdon ilmavirrat eivät vastanneet sitä, mitä suunnitelmissa oli esitetty. Rakennuksen painesuhteiden hallinta ja ilmanvaihdon ilmavirtojen suunnittelu sekä säätäminen tulisi tehdä koko rakennus ja sen toiminta huomioiden.

Rakennuksen ja tilojen altistumisolosuhteiden arviointi tehdään useimmiten siinä vaiheessa, kun rakennuksessa ja tiloissa on todennäköisesti myös pitkälle edenneitä kosteus- ja mikrobivaurioita. Näitä tilanteita voitaisiin välttää rakennuksen suunnitelmallisella huollolla, kunnossapidolla ja korjaamisella sekä säännönmukaisilla kuntoarvioilla, tarkastuksilla sekä kuntotutkimuksilla.

Kokonaisuudessaan altistumisolosuhteiden arviointi on tehty 10 %:ssa aineiston koulurakennuksista ja siten tästä määrästä rakennuksia voidaan katsoa olevan saatavilla kokonaisvaltaisesti tehty sisäilmaston laatuun vaikuttavien tekijöiden arviointi. Näin ollen Suomen koulurakennuksista ei ole saatavilla kattavaa tietoa rakennusten sisäilmaston laadusta. Tutkimus osoitti, että noin 30 % aineiston rakennuksista on tutkittu luotettavasti ja kuntotutkimustasoisesti. Tästä määrästä voidaan päätellä, että vain osasta rakennuksia on kattavaa tietoa niiden todellisesta kunnosta. Huomioitava on, että 20 % rakennuksista on rakennettu 2000-luvulla ja niiden kunto arvioidaan pääsääntöisesti hyväksi kyseisessä elinkaaren vaiheessa. Kuntotutkimustarve ei myöskään koske koko rakennuskantaa yhdenaikaisesti, jolloin kuntotutkimustasoisesti tutkittua tietoa ei ole tilastollisiin tarpeisiin riittävästi saatavilla tietyltä ajanjaksolta. Jos rakennusten kuntoarviointeja ei tehdä systemaattisesti tarpeenmukaisten kuntotutkimusten lisäksi, on vaikea saada kokonaiskuvaa koko rakennuskannan todellisesta, tutkitusta ja arvioidusta, kunnosta. Koska tutkimusaineisto kattaa vain yhden kaupungin tai kunnan per maakunta, tuloksia ei voida yleistää maakunnittain.

Lähdeluettelo

- [1] Rakennusinsinöörien liitto RIL ry. 2019. ROTI. Rakennetun omaisuuden tila. Saatavilla: <https://www.ril.fi/fi/alan-kehitys/roti-2023/taustat/roti-raportit.html>
- [2] Pitkäranta, M. (toim). 2016. Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus. Ympäristöopas 2016. Ympäristöministeriö. Saatavilla: <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/75517>
- [3] Lappalainen, S., Reijula, K., Tähtinen, K., Latvala, J., Hongisto, V., Holopainen, R., Kurtio, P., Lahtinen, M., Rautiala, S., Tuomi, T., Valtanen, A. 2017. Ohje työpaikkojen sisäilmasto-ongelmien selvittämiseen. Työterveyslaitos. Saatavilla: <https://www.julkari.fi/handle/10024/131872>
- [4] RT 103097. 2019. Toimitilakiinteistön kuntoarvio. Kuntoarvioijan ohje. Rakennustieto.
- [5] Valvira. 2016. Asumisterveysasetuksen soveltamisohje. Saatavilla: <https://www.valvira.fi/ymparistoterveys/terveydensuojelu/asumisterveys>

Lämpöolosuhteiden, ilman laadun ja painesuhteiden mittauksia sisäympäristössä

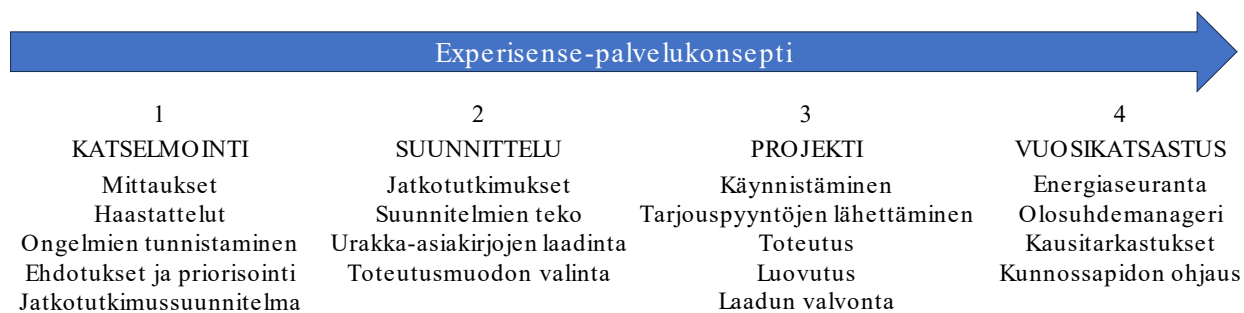
Sami Lestinen ja Lari Eskola
A-Insinöörit Suunnittelu Oy

Tiivistelmä

Sisäympäristön olosuhteet ja ilman laatu ovat tärkeä osa tilakäyttäjien hyvinvointia. Future-spaces-tutkimushankkeessa 2020–2022 kehitettiin sisäympäristön laadun mittauskonseptia, joka toteutettiin Tampereen yliopiston, VTT:n ja yritysten muodostamalla konsortiolla. Hankkeen pohjalta on kehitetty monipuolinen eri asiantuntijayritysten muodostama Experisense-palvelukonsepti korjausrakentamisen toimialalle. Konseptin avulla rakennusten omistajia autetaan parantamaan sisäilman olosuhteita, säästämään ylläpito- ja energiakustannuksissa sekä pidentämään rakennusten elinkaarta. Experisense-konsepti kattaa katselmoinnin, mittaukset ja selvitykset rakennuksen nykytilanteelle, saneerausprojektien toteutuksen ja toistuvat vuosikatsastukset. Sisäilmaston olosuhteiden osalta selvitykset käsittävät seurantamittaukset, tulosten analysoinnin ja raportoinnin sekä toimenpidesuositukset. Tutkimushankkeeseen pohjautuva palvelukonsepti toimii myös kehityksen edelläkävijänä sisäilmaston luokituksessa. Mittausten perusteella rakennusten ilmanvaihdossa, painesuhteissa ja sisäilmaston olosuhteissa on ongelmia. Tärkeää on, että on pystytty todentamaan myös hyvää sisäilmaa. Kehitetyllä palvelukonseptilla voidaan varmistaa, että rakennuksen tilat ovat terveellisiä, turvallisia ja viihtyisiä tilojen käyttäjille.

1. Johdanto

Sisäympäristön sisäilman olosuhteet ja ilman laatu vaikuttavat merkittävästi tilakäyttäjien hyvinvointiin ja rakennusten energiatehokkuuteen. Tilakäyttäjien hyvinvointi nähdään ihmisten viihtyvyytenä ja työntekijöiden vähentyneinä poissaoloina, kun taas energiatehokkuuden merkitys näkyy kustannusten pienentymisenä. Future Spaces Co-Innovation hankkeessa 2020–2022 kehitettiin sisäympäristön laadun mittauskonseptia, joka toteutettiin Tampereen yliopiston, VTT:n ja yritysten muodostamalla konsortiolla [1]. Tavoitteena oli kehittää palvelukonsepti rakennusten korjaukseen ja olosuhteiden hallintaan. Periaatteessa sisäilmaston olosuhteet tulee olla kansallisten ohjeiden [2-5] mukaisella suositustasolla, kun tavoitellaan kokonaisvaltaista hyvinvointia. Tähän tarvitaan kokonaisvaltaisia ratkaisuja, jossa eri alojen ammattilaiset toimivat yhteistyössä. Experisense-palvelu on jaettu 4 eri vaiheeseen: 1) Rakennuksen katselmointivaihe, 2) korjausten suunnitteluvaihe, 3) saneerausten projektivaihe ja 4) vuosittainen katsastus ja luokitus (Kuva 1).



Kuva 1. Experisense-palvelukonseptin eri vaiheet.

Käytännössä palvelukonseptin asiantuntijatyöpaketit liittyvät rakennusfysiikan, ilmanvaihdon, sisäilmaston ja akustiikan tarkastuksiin, mittauksiin ja luokitukseen. Tavoitteena on, että rakennukset voidaan tutkia ja luokitella mitattavissa ja todennettavissa olevien ominaisuuksien perusteella. Tällöin saadaan todenmukainen kokonaiskuva rakennuksen olosuhteista ja järjestelmien toimivuudesta. Aluksi tehdään mittauksia, analysointeja sekä selvityksiä rakennuksen nykytilasta, joihin sisältyvät mm. rakennuksen kunto, energianhallinta, kunnossapito, sisäilmaston olosuhteet, LVI- ja RAU-järjestelmät sekä valaistus ja akustiikka sekä etävalvonta. Sitten toteutetaan projektisuunnittelu ja saneerausprojektit, jossa asiantuntijakonsortio voi toimia projektinjohto- ja valvontatehtävissä. Projektivaiheen jälkeen toteutetaan vielä olosuhteiden jatkuva seuranta sekä vuositarkastukset, johon sisältyy toistuva raportointi ja sertifiointi. Näin varmistetaan, että järjestelmät toimivat niin kuin on suunniteltu. Tässä vaiheessa mitattua tietoa voidaan hyödyntää esimerkiksi DigiTwin-konseptissa eri skenaarioiden tarkastelussa.

Tässä seminaaripaperissa keskitytään sisäilmaston seurantamittauksiin osana Experisense-palvelukonseptia. Sisäilmastosta mitataan paine-eroja, lämpöolosuhteita sekä ilman laatua. Lämpöolosuhteisiin vaikuttavat merkittävästi sisäilman lämpötila ja kosteus sekä lämpösäteily ja ilman liike [6]. Käytännössä sisäilmaston lämpötila tulee olla kansallisten ohjeiden mukaisella suositustasolla ja huoneilman kosteus ei saa olla pitkäkestoisesti niin korkealla, että siitä aiheutuu mikrobikasvuston riskiä [2]. Toisaalta lämmityskaudella suhteellinen kosteus voi laskea hyvinkin alhaiseksi, joka voi aiheuttaa tilojen käyttäjille iho-oireita ja ylähengitysteiden kuivuutta [7]. Ilman laatutekijöistä CO₂-pitoisuus vaikuttaa sisäilman laatuun yhdessä muiden bioemissioiden kanssa, joita muodostuu tilojen käytössä [8]. Hiilidioksidia onkin pidetty hyvänä bioemissioiden indikaattorina. Käytännössä sisäilmaan tulee epäpuhtauksia ulkoilmasta, rakenteista, maaperästä, tilojen käyttäjistä tai ilmanvaihtojärjestelmästä. Koneellinen ilmanvaihto suodattaa ulkoilman epäpuhtauksia parantaen sisäilman laatua. Haasteena on kuitenkin usein paine-erojen hallinta. Paine-erojen merkitys korostuu erityisesti uusissa tiiviissä rakennuksissa, joissa paine-erot voivat kasvaa nopeasti ja aiheuttaa hallitsemattomia vuotoilmavirtoja huonontaen sisäilman laatua ja kosteusolosuhteita [9,10].

Sisäympäristöt on tehty tilojen käyttäjille, joten olosuhteiden tarkastelun tulisi ehkä heijastella tilojen käyttäjien keskimääräistä lämpötuntemusta, jota voidaan mallintaa erilaisilla lämpöviihtyvyyksimalleilla [11]. Tulevaisuuden skenaarioissa lämpöviihtyvyyksimalleja voidaan hyödyntää RAU-järjestelmissä olosuhteiden ennakoivassa hallinnassa ja DigiTwin-kokonaisuudessa.

2. Sisäilmaston mittauksista

Tämän seminaaripaperin mittauksia on tehty vuosina 2022–2023. Aluksi rakennuksissa tehtiin normaali katselmointi ja asennettiin sisäilmaston olosuhteiden ja ilman laadun mittauslaitteita 2–

4 viikon seurantamittauksia varten. Mittauslaitteet asennettiin siten, että ne eivät estäneet tilojen käyttöä eikä rakenteita tarvinnut rikkoa. Mittauksia pystyttiin suurimmaksi osaksi tarkastelemaan reaaliaikaisesti pilvipalvelun kautta, jolloin epäkohtiin voitiin puuttua nopeasti. Kohteissa mitattuja suureita olivat:

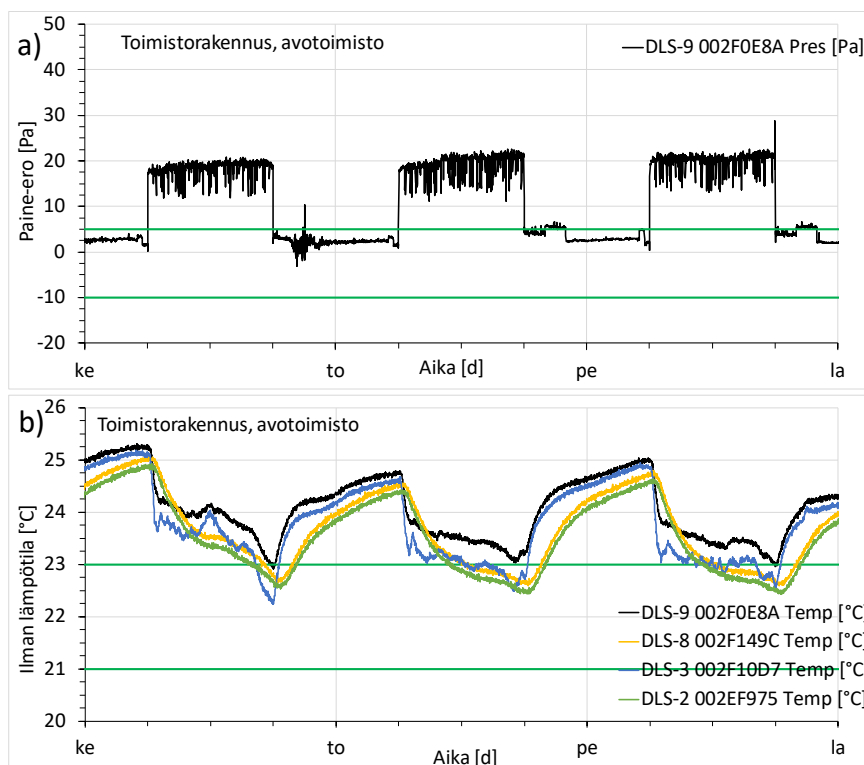
- ilman lämpötila
- ilman suhteellinen kosteus
- CO₂-pitoisuus
- pienhiukkasten pitoisuus (PM_{2.5}) tai TVOC-pitoisuus
- sisäilman paine-ero ulkoilmaan tai käytävään verrattuna.

3. Seurantamittausten tuloksia

Tulosnostoina on Etelä-Suomessa sijaitsevan toimistotalon, koulun ja päiväkodin seurantamittausten tuloksia. Kaikki mittaukset toteutettiin Experisense-palvelukonseptia soveltaen.

3.1 Toimistotalo

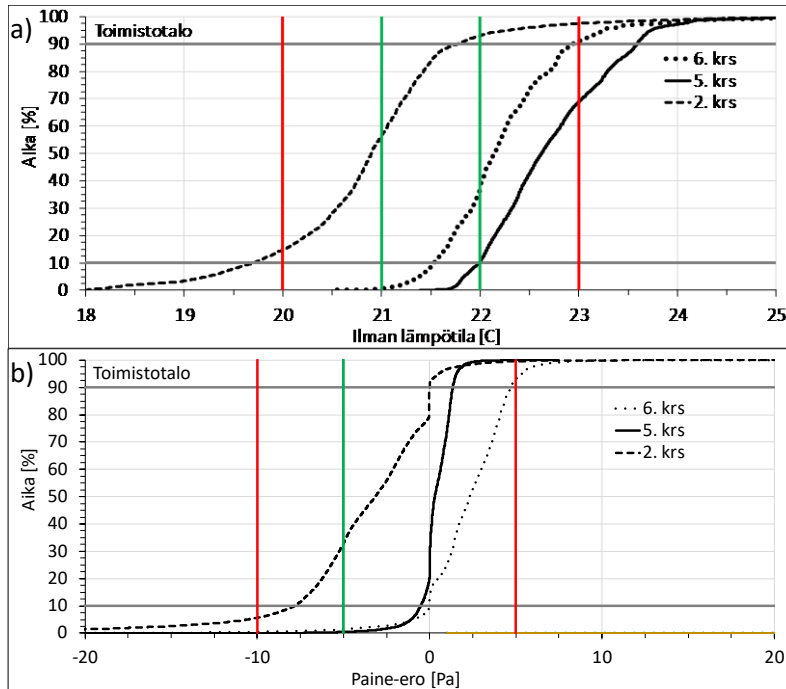
Toimistotalon mittauksissa talvella 2022–2023 havaittiin, että 6. kerroksessa on systemaattista ylipainetta päivällä ja yلیلämpenemistä yöllä (Kuva 2). Tilojen käyttöaika oli klo 6–18.



Kuva 2. Mitattujen suureiden kuvaaja: a) avotoimiston paine-ero ulkovaipan yli (positiivinen arvo ylipainetta), b) Avotoimiston sisäilman lämpötila.

Ylipaineen seurauksena sisäilman kosteutta kulkeutui ikkunaväleihin huurruttaen ikkunoita, kun taas yلیلämpenemisen seurauksena lämmityskulut kasvoivat. Kun ongelma ymmärrettiin, siihen pystyttiin reagoimaan nopeasti, jolloin iv-järjestelmästä korjattiin toimilaite ja lämmitysjärjestelmän lämpötilan asetusarvoa säädettiin. Korjausten jälkeen olosuhteita seurattiin kuukausia, jolloin mitattujen suureiden pysyvyydelle asetettiin 80 % tavoite (Kuva 3). Tällöinkin

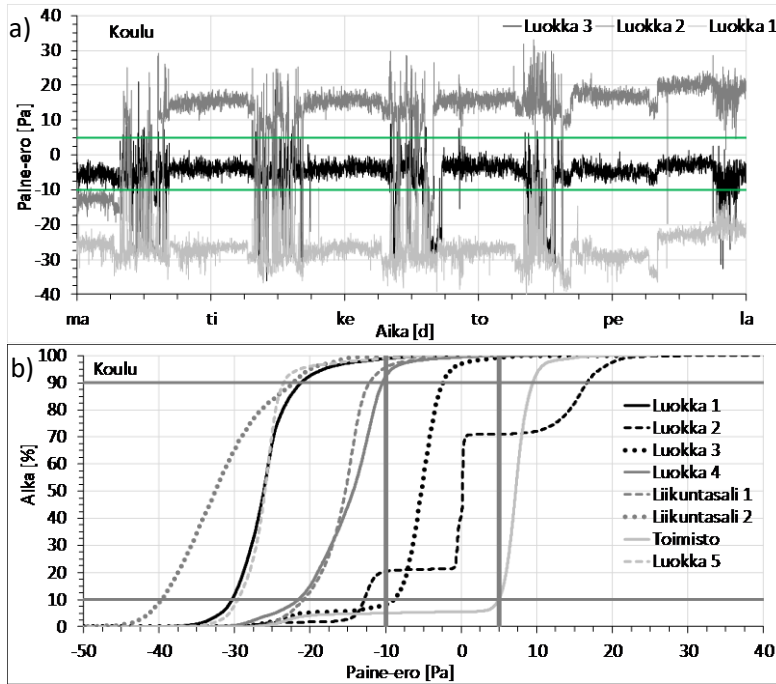
tuloksissa 2. kerros oli viileämpi kuin muut kerrokset ja 5. kerroksessa oli yllilämpenemistä yli 30 % kokonaisajasta. Painesuhteiden osalta tulokset noudattivat tunnettuja korkean rakennuksen olosuhteita: 2. kerroksessa oli lievää alipainetta, 5. kerroksessa paine-ero oli lähellä nollaa ja 6. kerroksessa oli lievää ylipainetta. Muut mitatut suureet olivat normaalitasolla, mutta pienihiukkasten pitoisuus kasvoi autohallissa. Suosituksena oli ilmanvaihdon ja lämmitysjärjestelmän säätö.



Kuva 3. Pysyvyyskäyriä eri kerroksissa, helmikuu: a) ilman lämpötila avotoimistossa (tavoitetaso 20...23°C) ja b) paine-ero avotoimiston ulkovaipan yli (suositustaso -10...+5 Pa).

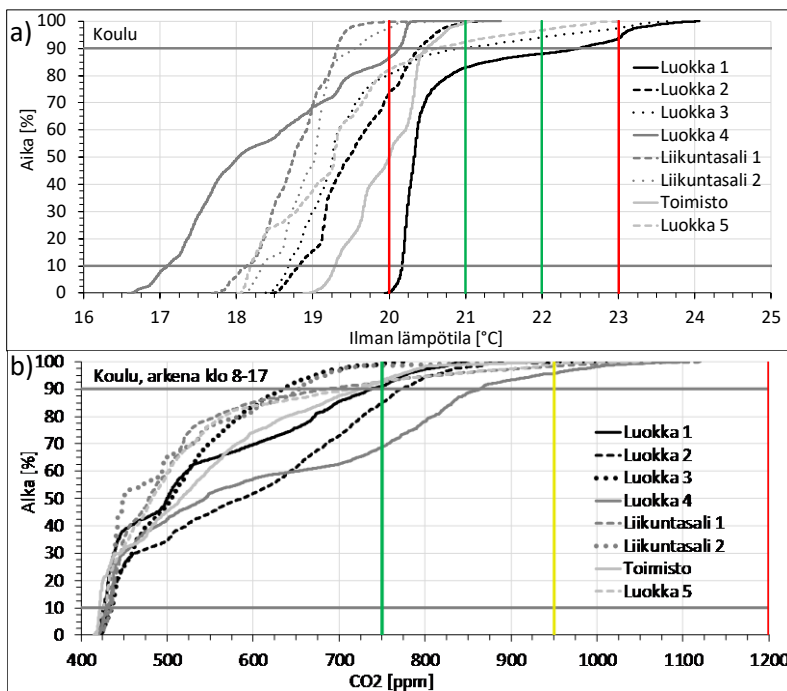
3.2 Koulu

Kaksikerroksisessa koulussa seurattiin olosuhteita ja painesuhteita talvella 2022–2023. Tilojen käyttöaika oli klo 9–16 ja liikuntasali oli käytössä iltaisin. Mittauksissa useassa tilassa oli suositustasoa suurempia alipaineita (Kuva 4), jotka ylittivät STM:n asetuksen toimenpiderajan -15 Pa [2].



Kuva 4. Paine-ero ulkovaipan yli (Suositustaso -10...+5 Pa): a) tilojen paine-eroa arkena, b) tilojen pysyvyyskäyriä 2 viikon ajanjaksolta.

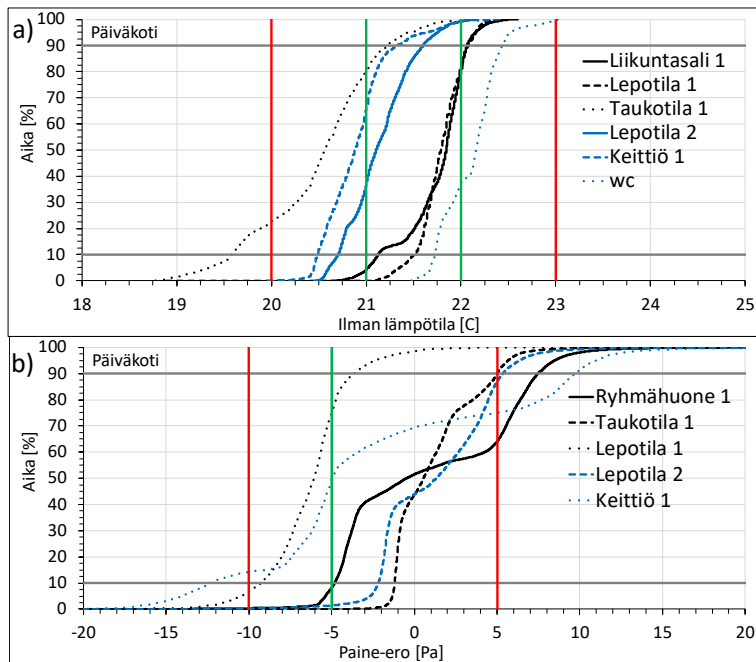
Kuvasta 4a nähdään, että Luokka 1 oli selvästi alipaineinen, Luokka 2 ylipaineinen ja Luokka 3 suositustasolla. Kuvassa 4b usean tilan alipaineinen pysyvyyskäyrä oli melko pystysuora, mikä viittaa melko jatkuvaan ja tasaiseen paine-eroon. Sisäilman lämpötila oli varsin matalalla tasolla siihenkin nähden, että astetta alemmaksi -teema oli käynnissä (Kuva 5a). CO₂-pitoisuudet olivat varsin hyvällä tasolla, eikä pitoisuus noussut merkittävästi yli 950 ppm:n, jota voidaan pitää Sisäilmastoluokituksen S2-raja-arvona (Kuva 5b). Tulosten perusteella kohteessa suositeltiin ilmanvaihdon ja lämmitysjärjestelmän säätöä.



Kuva 5. Pysyvyyskäyriä: a) sisäilman lämpötila (tavoitetaso 20...23°C), b) CO₂-pitoisuus arkena tilojen käyttöaikana (Suositusrajat: S1 < 750 ppm, S2 < 950 ppm, S3 < 1200 ppm). [4]

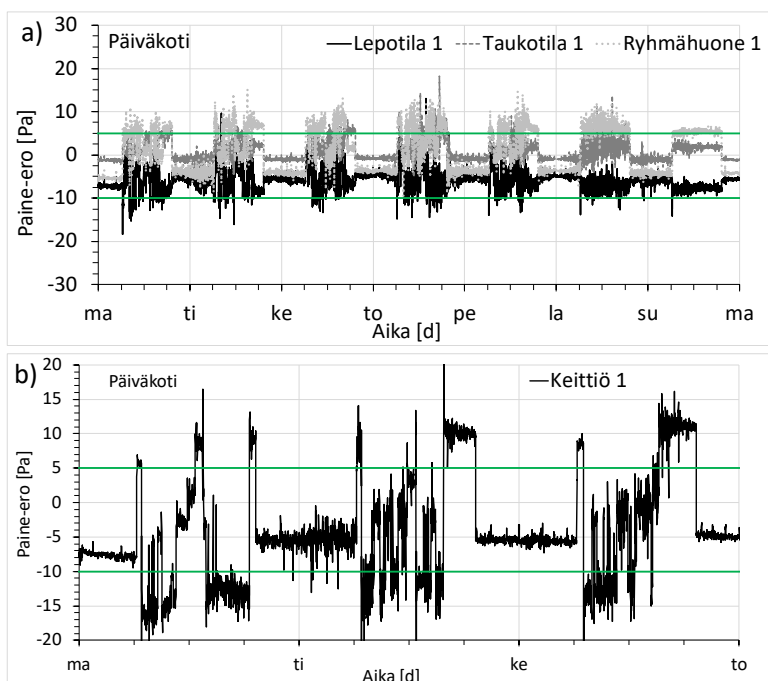
3.3 Päiväkoti

Kaksikerroksisessa päiväkodissä tehtiin seurantamittauksia talvella 2022–2023. Tilojen käyttöaika oli yleensä 6:30–18:00. Kuvassa 6 on pysyvyyskäyriä 2 viikon ajanjaksolta. Tulosten perusteella tilojen lämpötilat olivat tavoitetasolla (Kuva 6a). Ryhmähuoneessa ja Keittiössä oli suositustasoa enemmän ylipainetta (Kuva 6b). Näissä pysyvyyskäyrät olivat kaltevia, joka johtui siitä, että ylipaine ei ollut jatkuvaa.



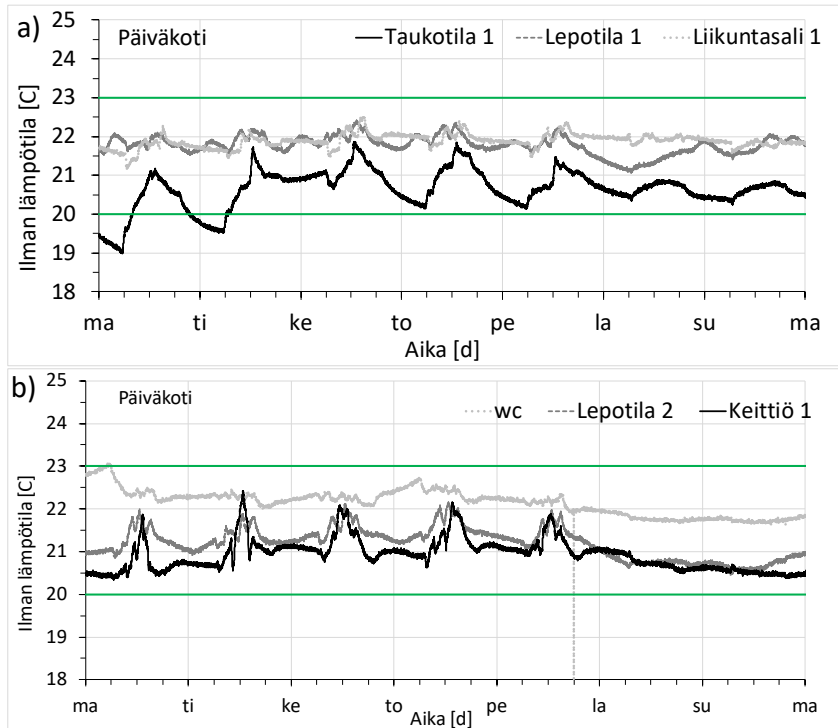
Kuva 6. Pysyvyyskäyriä 2 viikon ajanjaksolta: a) sisäilman lämpötila, b) paine-ero.

Kuvassa 7 on lähemmin tarkasteltu mitattuja aikasarjoja yhden viikon ajalta.



Kuva 7. Mitattuja aikasarjoja: a) paine-ero tiloissa ulkovaipan yli, b) paine-ero keittiössä ulkovaipan yli.

Aikasarjasta nähdään koneelliselle ilmanvaihdolle tyypillistä paine-eron vaihtelua, jossa yö ja päivä erottuvat selvästi (Kuva 7a). Kuvasta 7b havaitaan, että keittiössä oli päivittäin ylipaine- ja alipainejaksoja. Paine-eron vaihtelu johtui mitä todennäköisimmin ilmanvaihdon ja erillispoistojen epätasapainosta sekä painesuhteista muihin iv-palvelualueisiin nähden. Paine-eroja on yleensä vaikea hallita monimutkaisessa sisäympäristössä, mutta tässä tapauksessa ilmanvaihtoa ja erillispoistoja olisi hyvä synkronoida paremmin suosituksena olleen iv-järjestelmäsäädön aikana. Lämpötilojen kuvaajat pysyttelevät pääsääntöisesti suositustasolla (Kuva 8).



Kuva 8. Mitattuja aikasarjoja: a) sisäilman lämpötila, tilaryhmä 1, b) sisäilman lämpötila, tilaryhmä 2.

Taukotila 1 on hyvä esimerkki tilasta, jossa lämpötilan vaihtelu on tarkoituksenmukaista (Kuva 8a). Tällöin lämpötila kasvaa päivällä tilojen käytön aikana ja laskee yöllä, eikä ylikuumenemistä esiinny.

4. Pohdinta

Sisäympäristön olosuhteiden mittaukset ovat tulevaisuudessa yhä tärkeämmässä osassa, kun tavoitteena on tilojen käyttäjien viihtyvyys ja rakennusten energianhallinta. Jatkuvasti kehittyvä Experisense-palvelukonsepti on hyvä esimerkki tutkimushankkeen innovaatiosta, josta on kehitetty kaupallinen palvelukonsepti, josta hyötyvät kaikki: Suomalainen rakennuskanta, rakennusten käyttäjät, omistajat, huoltoyritykset, korjausrakentamisen suunnittelijat, urakoitsijat ja aliurakoitsijat sekä eri asiantuntijaorganisaatiot. Tärkeimpänä hyötyjänä on tietenkin ihmiset, kun kasvatetaan kansallista hyvinvointia ja rakennusten elinkaarta kestävän kehityksen periaatteiden mukaisesti. Käytännössä Experisense-palvelukonsepti on varsin helppo tapa tutkia rakennuksen toimintaa ja parantaa tilojen käyttäjien olosuhteita. Eri aihealueiden asiantuntijoiden tietotaito ja yhteistyö varmistaa rakennukselle parhaan tuloksen eri näkökulmista katsottuna.

Seurantamittaukset vievät paljon aikaa ja tarvitaan paljon laitteistoa, mutta yhteen hiottu, testattu ja muuntojoustava palvelukokonaisuus varmistaa sen, että selvitysten ja mittausten toteutus on laadukas, uusimman tiedon mukainen ja onnistuu aikataulussa. Tilojen käyttäjien kannalta

mitattu, koettu ja todennettavissa oleva informaatio on oleellista, koska ne kuvaavat todellisia olosuhteita, vaikka koettu tieto onkin yksilöllistä. Tätä informaatiota voidaan täydentää erilaisilla mallinnoilla osana rakennuksen tietomallia ja DigiTwin-kokonaisuutta.

5. Yhteenveto

Experisense-palvelukonseptia on kehitetty Future-spaces co-innovation hankkeesta 2020–2022 lähtien ja se muodostaa hyvin monipuolisen asiantuntijaorganisaatioista koostuvan palvelukokonaisuuden korjausrakentamisen toimialalle. Experisense-konseptissa sisäilmaston olosuhteiden mittaukset otetaan entistä kokonaisvaltaisemmin huomioon rakennusten tutkimuksissa ja se on jatkuvan kehityksen kohteena rakennussektorin muuttuvassa toimintaympäristössä. Mittauskonseptilla voidaan selvittää esimerkiksi sisäilmaston luokitusten toteutuminen ja se soveltuu myös pidempiaikaisen olosuhteiden seurannan työkaluksi. Mittaustulosten perusteella voidaan sanoa, että rakennuksissa saattaa olla aiemmin ajateltua enemmän ongelmia ilmanvaihdon, painesuhteiden ja sisäilmaston olosuhteiden osalta. Tärkeää kuitenkin on, että myös onnistuneita ja hyvällä tasolla olevia sisäilmaston toteutuksia on pystytty todentamaan.

Lähdeluettelo

- [1] Future Spaces consortium. 2021. Future Spaces - advanced, scientific solutions for healthy, high-quality conditions for buildings of different eras. Osoitteessa: <https://www.futurespace.fi>.
- [2] Sosiaali- ja terveysministeriö. 2015. Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista. Asetus 545/2015. Helsinki.
- [3] Valvira. 2016. Asumisterveysasetuksen soveltamisohje, osa I: Asumisterveysasetus § 1-10. Ohje, Dnro 2731/06.10.01/2016, Sosiaali- ja terveysalan lupa- ja valvontavirasto, Helsinki.
- [4] Rakennustietosäätiö RTS sr. 2018. Sisäilmastoluokitus 2018. Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. Ohjekortti, RT 07-11299, LVI 05-10629, SIT 05-610149, Ratu 444-T, KH 27-00662, Rakennustietosäätiö RTS sr, Espoo.
- [5] Tuomainen, M. et al. (2019). Julkisten palvelurakennusten ilmanvaihdon käytön yleisohje ja Julkisten palvelurakennusten ilmanvaihdon käytön yleisohjeen perustelumuuistio. Kuntien sisäilmaverkosto, Espoo, Helsinki, Jyväskylä, Kuopio, Lahti, Oulu, Tampere, Turku, Vantaa.
- [6] Seppänen, O. 1987. Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto. LVI-kustannus, Helsinki.
- [7] Reinikainen, L. M., & Jaakkola, J. J. K. (2003). Significance of humidity and temperature on skin and upper airway symptoms. *Indoor air*, 13(4), 344-352.
- [8] Zhang, X., Wargocki, P., Lian, Z., & Thyregod, C. 2017. Effects of exposure to carbon dioxide and bioeffluents on perceived air quality, self-assessed acute health symptoms, and cognitive performance. *Indoor air*, 27(1), 47-64.
- [9] Eskola, L., Mäkinen, S. ja Hyvärinen, J. 2023. Ilmanvaihdon uudet mittaus- ja säätöohjeet. Sisäilmastoseminaari 2023.
- [10] Tuominen, E., Laukkanen, A., Kauppinen, A., Raunima, T. ja Vinha, J. 2019. COMBI-hankkeen paine-eromittausten yhteenveto. *Rakennusfysiikka* 2019.
- [11] Zhou, S., Li, B., Du, C., Liu, H., Wu, Y., Hodder, S., ... & Yao, R. 2023. Opportunities and challenges of using thermal comfort models for building design and operation for the elderly: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 183, 113504.

Digitaalisen kaksosen tuottaminen ja sen käyttö kerrostalon olosuhdeseurannassa

Timo Lehtoviita, Jevgeni Anttonen, Kristian Hirvonen ja Tuomas Keränen
LAB-ammattikorkeakoulu

Tiivistelmä

LAB-ammattikorkeakoulussa toteutettiin EAKR-rahoitteinen *Digitaaliset ratkaisut rakennetun ympäristön resurssituottavuudessa* -kehityshanke vuosina 2021–2023. Sen yhtenä toimenpiteenä tuotettiin Unity-pelimoottorilla yhden uuden kerrostalokohteen digitaalinen kaksonen, jota voidaan hyödyntää rakennuksen ylläpitovaiheessa ja jonka lähtökohtana oli rakennuksen IFC-arkkitehtitietomalli. Sen peruskäyttötapaukseksi päätettiin yhdessä kiinteistönomistajan kanssa rakennuksen tilojen olosuhdeseuranta rakennuksen ylläpidon tueksi. Olosuhteiden reaaliaikainen tieto kerätään rakennuksen rakennusautomaatiojärjestelmän antureilla avoimen rajapinnan kautta. Säätiieto saadaan julkisista säätietopalveluista. Seurattavia parametreja ovat mm. sisätilan suhteellinen kosteus, vesihöyrypitoisuus ja lämpötila, ulkoilman suhteellinen kosteus, vesihöyrypitoisuus ja lämpötila sekä sisäilman kosteuslisä. Keskeinen tavoite on, että ylläpidosta vastaava toimija saa rakennuksen kolmiulotteisen tietomallin ja siihen kytkettävän olosuhdeseurannan avulla nopeasti kokonaiskuvan rakennuksen rakennusfysikaalisista olosuhteista mahdollisissa häiriötilanteissa. Tietomallipohjaisen digitaalisen kaksosen tuotantoprosessi vaatii monta työvaihetta ja erityisen tärkeää on ottaa huomioon kaksosen loppukäyttäjän käyttöliittymälle asetettavat vaatimukset. Rakennuksen digitaalisilla kaksosilla on iso käyttöpotentiaali rakennusfysiikkaan liittyvän informaation seurannassa ja hyödyntämisessä. Tämä ei rajoitu pelkästään ylläpitovaiheeseen. Niitä voidaan hyödyntää myös jo rakennuksen työmaavaiheen olosuhteiden ja rakenteiden kuivumisen seurantaan.

1. Johdanto

LAB-ammattikorkeakoulussa toteutettiin EAKR-rahoitteinen *Digitaaliset ratkaisut rakennetun ympäristön resurssituottavuudessa* -kehityshanke vuosina 2021–2023. Sen yhtenä toimenpiteenä tuotettiin yhden uuden kerrostalokohteen digitaalinen kaksonen, jota voidaan hyödyntää rakennuksen ylläpitovaiheessa ja jonka lähtökohtana on rakennuksen IFC-arkkitehtitietomalli. Sen peruskäyttötapaukseksi päätettiin yhdessä kiinteistönomistajan kanssa rakennuksen tilojen olosuhdeseuranta rakennuksen ylläpidon tueksi.

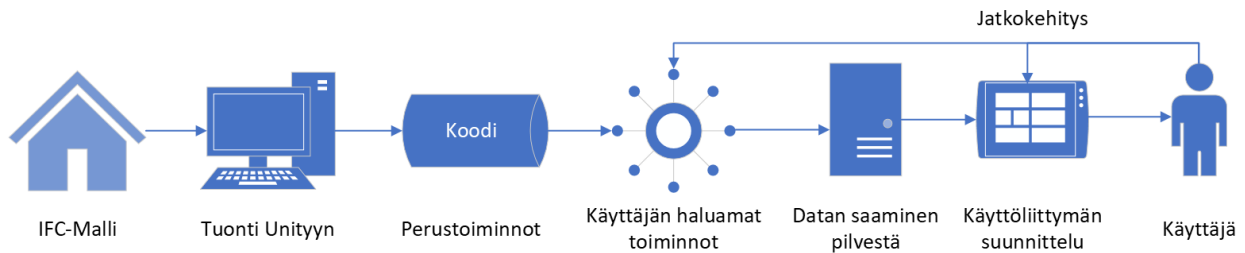
2. Rakennuksen digitaalinen kaksonen

Digitaaliselle kaksoselle ei ole tällä hetkellä vakiintunutta määritelmää [1,2]. Rakennusalalla digitaalisella kaksosella tarkoitetaan usein digitaalista esitystä tai kopiota fyysisessä maailmassa sijaitsevasta kohteesta, kuten rakennuksesta, sillasta, tiestä tai kaupungista. Fyysisen maailman kohteen ja sen digitaalisen vastineen välillä tulisi olla säännöllistä molempiin suuntiin toimivaa tiedonvaihtoa kohteen koko elinkaaren ajan eli digitaaliseen kaksoseseen kytketään usein reaali maailmaa kuvaavaa digitaalista ja dynaamista tietoa. [2]. Digitaalinen kaksonen voidaan luoda hyödyntämällä rakennuksen kolmiulotteisia tietomalleja ja kytkeä tähän reaaliaikaista informaatiota, kuten mittausdataa. On olennaista, että tuotettavalle digitaaliselle kaksoselle määritellään selkeät käyttötapaukset, johon sitä aiotaan käyttää. Tämä ohjaa sen ominaisuuksien määrittelyä sen tuotantovaiheessa.

3. Digitaalisen kaksosen tuottamisen vaiheet

3.1 Tuottamisprosessi

Digitaalisen kaksosen luominen on monivaiheinen prosessi (kuva 1), jonka ensimmäinen askel on IFC-mallin tuominen Unity -ympäristöön. Unityssä olevalla lisäosalla saadaan tuotua IFC-mallin suoraan Unityyn, jonka jälkeen avautuu laaja mahdollisuus ohjelmoida kaksoseen erilaisia toimintoja ja ominaisuuksia.



Kuva 1. Digitaalisen kaksosen tuottamisprosessi.

Yksi keskeisimmistä perustoiminnoista on käyttäjän liikkuminen sekä kameran toiminta sovelluksen sisällä. Kun nämä asiat ovat toteutettu halutulla tavalla, voidaan siirtyä miettimään datan visualisointitapoja. Tässä tapauksessa visualisointi tapahtuu erilaisia varjostumia (shader) käyttäen, jotka ovat liitettyinä kaksosessa oleviin huoneisiin. Niiden avulla voidaan esimerkiksi muuttaa huoneen väriä tai piirtää sille ääriviivat.

Dynaamisen lämpö- ja kosteusdata tuodaan kaksoseen Microsoft Azure -pilvipalvelusta, josta sitä voidaan noutaa reaaliaikaisesti HTTP-kutsuilla. Kaksosella voidaan näyttää tämä data visuaalisesti muuttamalla huoneiden väriä lämpötilan tai kosteuden mukaan. Lisäksi voidaan luoda historiatietoja käyttäen lämpötila- ja kosteuskaavion, joka tarjoaa käyttäjille helpon tavan tarkastella tilojen historiatietoja ja auttamaan käyttäjiä tunnistamaan poikkeamia.

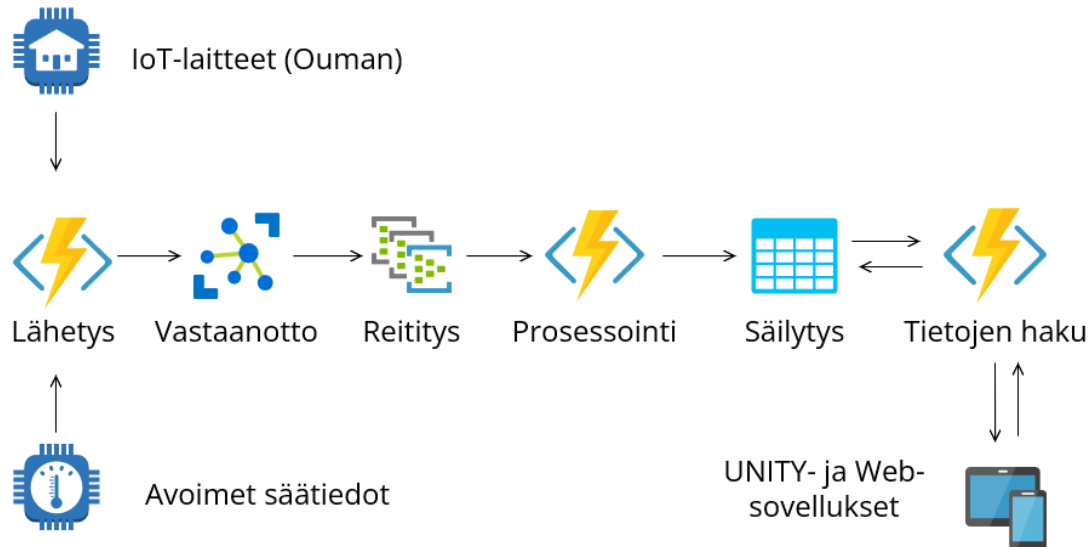
Käyttöliittymän suunnittelu ja toteutus ovat myös olennainen osa digitaalisen kaksosen luontiprosessia. Käyttöliittymä on suunniteltu olemaan mahdollisimman yksinkertainen, jossa käyttäjäystävällisyys ja selkeys ovat etusijalla.

On tärkeää valita alusta, jolla kaksosta tullaan ajamaan hyvissä ajoin, jotta vältymme suuremmilta yhteensopivuusongelmilta. Tässä tapauksessa päädyttiin käyttämään WebGL-rajapintaa, joka mahdollistaa sovelluksen ajamisen verkkoselaimessa, olipa kyseessä sitten tietokone tai puhelin.

3.2 Dynaamisen mittausdatan hallinta

Digitaalisen kaksosen toteutuksessa käytetään eri IoT-laitetoimittajien laitteita ja muita dynaamisia tietolähteitä kuten esimerkiksi säätietoja. Näiden laitteiden ja tietolähteiden kytkentä- ja datasiirron tavat, API-rajapinnat, tietomallit ja jopa IoT-protokollat usein eroavat toisistaan. Tämän vuoksi tarvitaan yhteinen infrastruktuuri, jota voidaan käyttää laitteiden kytkentään, datan siirron perustamiseen, tulosten säilyttämiseen ja normalisointiin. Tämä infrastruktuuri toteutettiin käyttämällä Microsoft Azure-pilven palveluita.

Infrastruktuurin päätarkoitus on mahdollistaa pysyvä ja luotettava datan siirto fyysisesti kytkettyjen IoT -laitteiden ja UNITY-sovelluksen välillä [4]. Se vastaa IoT-laitteiden kanssa kommunikoinnista, laitteista pilveen viestien vastaanottamisesta ja käsittelystä sekä tietojen toimittamisesta tietokantaan mistä UNITY-sovellus voi niitä helposti hakea REST-rajapinnan kautta. Kuvassa 2 on esitetty kaavio Azure-arkkitehtuurista digitaalisen kaksosen toteutuksessa.



Kuva 2. Azure pilven infrastruktuuri.

Infrastruktuurin perustoiminnallisuus sisältää seuraavat vaiheet:

- Tietojen lähetys

Data Azure -pilveen lähetetään käyttämällä yksi tuetuista protokollista eli MQTT tai HTTPS. Tässä yhteydessä käytettyjen Ouman -laitteiden ja säätietojen tapauksessa valittiin HTTPS-protokolla. Datan lähetyksestä on vastuussa Azure Functions -palvelu, joka automaattisesti hakee datan Oumanin pilvestä tietyllä aikavälillä, järjestää dataa niin että sitä voi helposti tulkita ja lähettää sitä eteenpäin Azure IoT Hub-palvelulle. Samaa periaatetta käytetään myös säätietojen haussa avoimesta rajapinnasta.

- Tietojen vastaanotto

Azure IoT Hub toimii keskitettynä viestikeskuksena IoT-laitteiden ja sovellusten välisessä viestinnässä. Se rekisteröi uudet laitteet ja hyväksyy laitteesta pilveen telemetriadatan siirtoa välittääkseen sitä eteenpäin.

- Tietojen reititys

Viestien välittämiseen eteenpäin Azure IoT Hub tukee erilaisia reitityspalveluita kuten Azure Event Hub tai Azure Service Bus. Digitaalisen kaksosen toteutuksessa päätettiin käyttää Service Bus -palvelua sen yksinkertaisuuden, FIFO (First In First Out) -periaatteen ja Azure Functions -palvelun natiivin tuen vuoksi.

- Tietojen prosessointi

Azure Functions -palvelu vastaanottaa telemetriadataa sen kulkiessa IoT Hub:sta Service Bus -palvelun kautta. Sitä voidaan käyttää datan tarkistamiseen, suodattamiseen ja validoimiseen asetettujen ehtojen perusteella. Validi data sitten tallennetaan Azure Storage tietokantaan.

- Tietojen säilyttäminen

Azure Storage toimii sekä tietokantana että pilvitalennustilana. Se voi vastaanottaa ja säilyttää valtavan määrän raakaa ja prosessoitua IoT-dataa.

- Tietojen haku

UNITY- ja/tai Web-sovellus voi hakea dataa tallennustilasta ja tietokannasta käyttämällä REST -rajapinnan kutsuja. REST rajapinnan toiminnasta vastaa toinen Azure Functions -palvelu.

3.3 Anturitekhnologia

Tässä tapauksessa rakennuksen sisäolosuhteita kuvaava mittatieto koottiin rakennuksen automaatiojärjestelmästä, jonka on toimittanut Ouman Oy. Sen langattomassa anturijärjestelmässä kohteessa on tukiasema, jolle anturit lähettävät mittaamansa datan. Tukiasema lähettää antureilta kerätyn datan kootusti järjestelmän pilveen. Antureita voidaan käyttää joko integroiduilla paristoilla tai ulkoiseen virtalähteeseen kytkettynä. Ulkoiseen virtalähteeseen kytkettynä anturit toimivat reitittävinä elementteinä verkossa, eli anturit voivat lähettää datan toisten antureiden kautta tukiasemalle. Oumanin anturit lähettävät dataa taajuudella 869 Mhz.

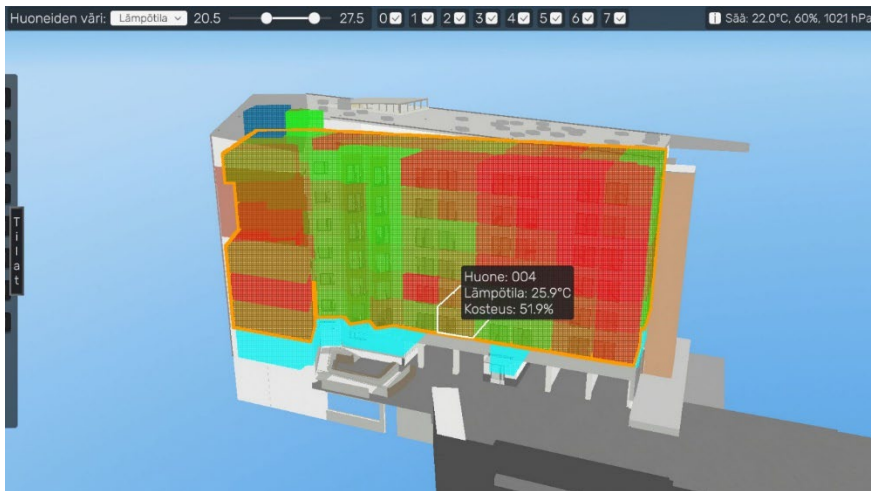
Lämpötilan mittauksiin Oumanin antureissa on NTC10 -vastuslämpötila-anturi, jonka resistanssi vaihtelee lämpötilan mukaan. NTC-vastuksen (Negative Temperature Coefficient) resistanssin lämpötilakerroin on negatiivinen. Sisätiloihin tarkoitettujen antureiden lämpötilan mittausalueeksi ilmoitetaan $-30...+100$ °C. Lämpötilan mittaustarkkuus on alueella $+10...60$ °C $\pm 0,3$ °C. Suhteellisen kosteuden mittauksen osalta anturityyppi on kapasitiivinen. Mittausalueeksi ilmoitetaan $0...100$ % RH. Kosteuden mittaustarkkuus on alueella $20...80$ % RH, ± 3 % RH. Kaikki Oumanin anturit tehdaskalibroidaan aluksi tehtaalla. Käytönaikaisia tehdaskalibrointeja ei suoriteta. Antureiden käyttäjällä on mahdollisuus anturikohtaisesti korjata mittauservoja käyttöliittymän kautta.

4. Tuotetun digitaalisen kaksosen ominaisuudet

4.1 Käyttöliittymä

Kuvassa 3 on esitetty näkymä tuotetun digitaalisen kaksosen käyttöliittymästä.

Ohjaus tapahtuu hiiren avulla, joka mahdollistaa kameran kääntämisen, zoomaamisen ja liikuttamisen. Kun data noudetaan pilvestä, huoneet voidaan värjätä joko lämpötilan tai kosteuden perusteella. Värin ala- ja ylärajoja voi muokata, jolloin eri huoneiden lämpötila- ja kosteuserot tulevat paremmin esille. Oikeassa yläkulmassa näkyy säätila. Lisäksi sään historiatietoihin pääsee käsiksi painamalla "i"-painiketta. Sivupalkissa on saatavilla myös kerroskohtainen yleiskatsaus, joka sisältää kaikki kyseisen kerroksen huoneet, mikä tarjoaa nopean tilannekuvan huoneiden tilasta. On myös mahdollista piilottaa kerroksia yläpalkissa olevien valintamerkkien avulla, mikä helpottaa asioiden tarkastelua.



Kuva 3. Yleisnäkymä sovelluksen sisältä, joka avautuu käyttäjälle sovelluksen käynnistyessä.

Sovellus on käytettävissä selaimen kautta tietokoneella, puhelimella tai tabletilla.

4.2 Seurantadata

Huoneiden historiaa voidaan tarkastella avaamalla kaavio tuplaklikkaamalla huonetta (kuva 4)



Kuva 4. Historia kaavio yksittäisestä huoneesta. Kuvassa vihreällä on piirretty lämpötila ja sinisellä kosteuden arvot.

Kaaviossa näkyvät enintään seitsemän päivää taaksepäin ulottuvat lämpötila- ja kosteusarvot. aikaväliä voi säätää yhden, kolmen tai seitsemän päivän mittaiseksi, jolloin tietyllä hetkellä olevia arvoja voidaan tarkastella tarkemmin.

4.3 Jatkokehitystarpeet

Käyttöliittymä on tällä hetkellä varsin yksinkertainen ja kaipaa vielä jatkokehitystä ottamalla käyttäjältä saatavan palautteen perusteella. Lisäksi sovelluksen suorituskyky on melko vaativa, ja sen optimointia tulisi vielä parantaa. Erityisesti vanhemmilla puhelimilla sovelluksen toiminen ei ole sujuvaa.

Jatkokehityksessä kannattaa vertailla markkinoilla saatavilla olevien eri pilvipalveluiden ja

pelialustojen ominaisuuksia keskenään entistä optimoidumman lopputuloksen aikaansaamiseksi. Myös IFC-mallin sisältämää informaatiota kannattaa hyödyntää enemmän.

5. Yhteenveto

Saatujen kokemusten perusteella digitaalinen kaksosen osoittautui hyväksi lisätyökaluksi rakennuksen olosuhdeseurannassa. Sen jatkokehityksessä on entistä enemmän kyettävä hyödyntämään rakennuksen tietomallien sisältämää informaatiota pelkän geometrian lisäksi. Kaksosen tietomalliaineistot voidaan jatkossa laajentaa kattamaan myös esimerkiksi talotekniikkasuunnittelijoiden IFC-tietomallit. Tällöin on varmistettava, että käytetyt mallit ovat toteumamalleja, jotka vastaavat rakennuksen toteumaa. Tämä on osoittautunut haasteelliseksi erityisesti talotekniikkamallien osalta. Jotta rakennusten digitaalisten kaksosten tuottaminen ja niiden käyttö olisi entistä tehokkaampaa, on kehitettävä niiden tuotantoprosessien käytäntöjä entistä yhtenäisimmiksi.

Tietomallipohjaisen digitaalisen kaksosen tuotantoprosessi vaatii monta työvaihetta, tietomallistandardien tuntemusta, avoimien rajapintojen hallintaa sekä ymmärrystä digitaalisen informaation hallinnasta ja toimivan käyttöliittymän luomista. Koko tuotantoprosessin aikana on tärkeää ottaa huomioon kaksosen loppukäyttäjän käyttöliittymälle asetettavat vaatimukset.

Tulevaisuudessa digitaalisen kaksosen avulla kerättyä dynaamista informaatiota voidaan entistä enemmän hyödyntää tekoälyn avulla. Informaation käytössä on otettava huomioon myös sille asetettavat käytön rajoitukset ja turvallisuusvaatimukset. Esimerkiksi asuntojen olosuhdetiedot eivät voi olla avoimesti saatavissa ja niiden käytöstä on sovittava asukkaiden kanssa.

Rakennuksen digitaalisilla kaksosilla on iso käyttöpotentiaali rakennusfysiikkaan liittyvän informaation seurannassa ja hyödyntämisessä. Tämä ei rajoitu pelkästään ylläpitovaiheeseen. Niitä voidaan hyödyntää myös jo rakennuksen työmaavaiheen olosuhteiden ja rakenteiden kuivumisen seurantaan.

Lähdeluettelo

- [1] Aapro, M. 2023. Digitaalisen kaksosen hyödyntäminen rakennushankkeen työmaavaiheessa. Opinnäytetyö. LAB-ammattikorkeakoulu. 33 s. Saatavissa www.theseus.fi
- [2] Huttunen, M. 2021. Käyttökelpoinen digitaalinen kaksosen. Saatavissa <https://www.labopen.fi/lab-pro/kayttokelpoinen-digitaalinen-kaksosen/>
- [3] BuildingSmart International. The buildingSMART Digital Twins Working Group (DTWG). Saatavissa <https://www.buildingsmart.org/digital-twins>
- [4] Anttonen, J. 2022. Development of Digital Twin solutions in EKKIRA project. Saatavissa <https://blogit.lab.fi/labfocus/en/development-of-digital-twin-solutions-in-ekkira-project/>

Rakennusten olosuhteiden hallinta rakennusautomaation ja IOT mittalaitteiden yhteiskäytöllä

Samu Niska, Antti-Jaakko Alanko, Lari Eskola, Sami Lestinen

¹ IISY Oy (freesi.io) Oy

² A-Insinöörit Oy

Tiivistelmä

Tässä artikkelissa tarkastellaan rakennusautomaatiojärjestelmien ja olosuhdemittausten käyttöä lämmityksen ja ilmanvaihdon ohjauksessa vanhoissa ja moderneissa rakennuksissa.

Rakennusautomaation valmiiden mitta-antureiden ja mittapisteiden haasteena on niiden kyvyttömyys mukautua rakennuksen käytön muuttuessa, mikä johtaa energian tuhlaamiseen tai epämiellyttäviin olosuhteisiin.

1. Johdanto

Modernit rakennusautomaatiojärjestelmät hyödyntävät tilakohtaisia lämpötila- ja hiilidioksidimittauksia säätääkseen ilmanvaihtoa ja lämmitystä tarpeen mukaan. Tällaiset tarpeenmukaiset järjestelmät pyrkivät ylläpitämään optimaaliset olosuhteet tiloissa ja samalla säästämään energiakustannuksissa.

Usein rakennuksen omat järjestelmät eivät ole riittäviä vaan rinnalle tarvitaan muita mittausjärjestelmiä, joilla voidaan myös varmistaa rakennusautomaation toiminta. Tämän artikkelin kiinteistöissä on käytetty yleisesti kansainvälisessä käytössä olevaa kaupallista pilvipalvelujärjestelmää mittaustiedon keruuseen ja analysointiin.

Mitatun tiedon perusteella toimiva järjestelmä edellyttää tarkkaa ja luotettavaa mittausdataa. Epätarkat mittalaitteet voivat johtaa virheellisiin lopputuloksiin. Esimerkiksi virheellisesti korkeaa lämpötilaa mittaava anturi voi aiheuttaa liian alhaisen lämpötilan säädön, mikä puolestaan luo epämukavuutta käyttäjille. Lisäksi jatkuva virheellinen hiilidioksidilukema voi pitää ilmanvaihdon tarpeettomasti päällä. Nämä tilanteet aiheuttavat tyytymättömyyttä käyttäjien keskuudessa ja lisäkustannuksia kiinteistön omistajalle.

Tarkastelussa on käsitelty kolmen case tapauksen tuloksia, joiden perusteella on tehty havaintoja järjestelmien toiminnasta sekä rakennusten sisäolosuhteista.

2. Rakennusten olosuhteiden hallinta rakennusautomaation ja IOT mittalaitteiden yhteiskäytöllä

Artikkelissa tarkasteltaviksi käytännön esimerkeiksi on valittu kolme tyypillistä julkisen sektorin palvelukiinteistöä Suomessa. Valituissa kiinteistöissä on sovellettu IoT-järjestelmää automaation sekä kiinteistöjohdon järjestelmien rinnalla. Kohteet ovat erilaisia tekniikaltaan ja eri puolella Suomea. Kohteissa noudatetaan joko S1 tai S2 sisäilmastoluokitusta. Kohteiden tiedot ovat anonymisoitu tiedon ja mittausdatan luottamuksellisuudesta johtuen. Tarkastelussa on ollut tavoitteena analysoida kiinteistöissä tapahtuvia pitkän aikajänteen muutoksia sekä kehitystä.

Kohteiden olosuhteista on esitetty tuloksena kuvaajia pysyvyyskäyristä, jotka kertovat, kuinka monta prosenttia ajasta kohteissa on ollut S2 luokan mukaiset olosuhteet.

2.1 Case 1 Sairaalakiinteistö 1

Kohdetyypinä 1960 luvulla rakennettu ja sittemmin useassa osassa laajennettu sairaalakiinteistö. Kohteessa kiinteistöautomaatiosta saatiin lämpötiladataa ja IoT erillismittauksina mitattiin lämpötila, ilmankosteus, hiilidioksidi ja paine-erot. Kohteessa on noin 150 IoT erillismittauksia ja mittalaitteet ovat asennettuna kiinteästi jokaiseen kohteen tilaan.

2.1.1 Hankkeen tavoitteet ja seuraukset

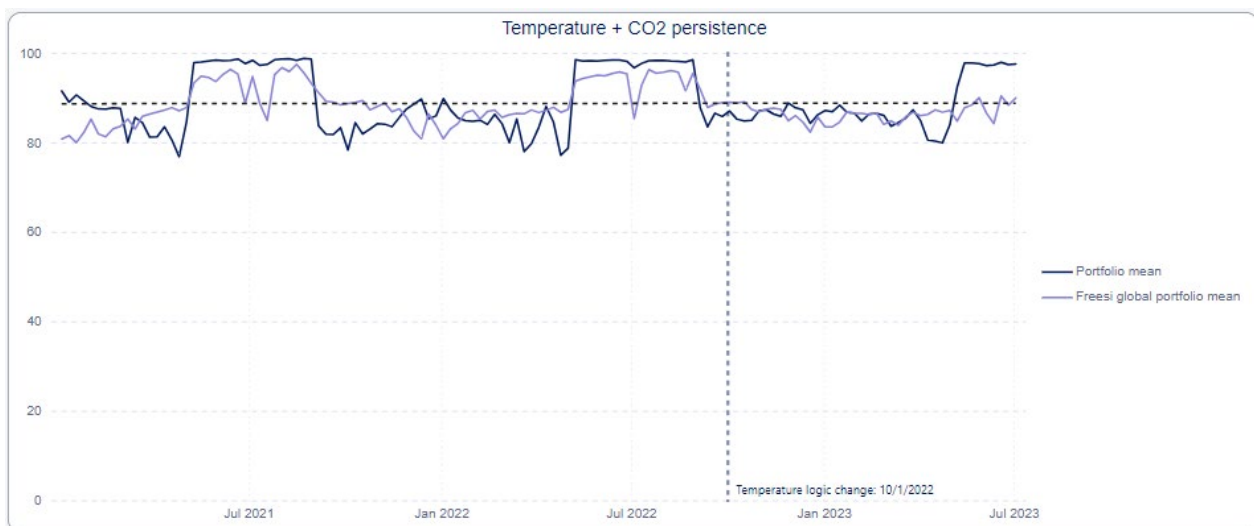
Asiakkaalla oli hankkeessa tavoitteena seuraavat kolme tavoitetta.

- Parantaa raportointia, sillä asiakkaan nykyisistä järjestelmistä oli haastavaa saada helppolukuista ja selkeää raportointia.
- Parantaa ymmärrystä kohteen teknisestä toiminnasta.
- Käyttäjätyytyväisyyden kehitys.

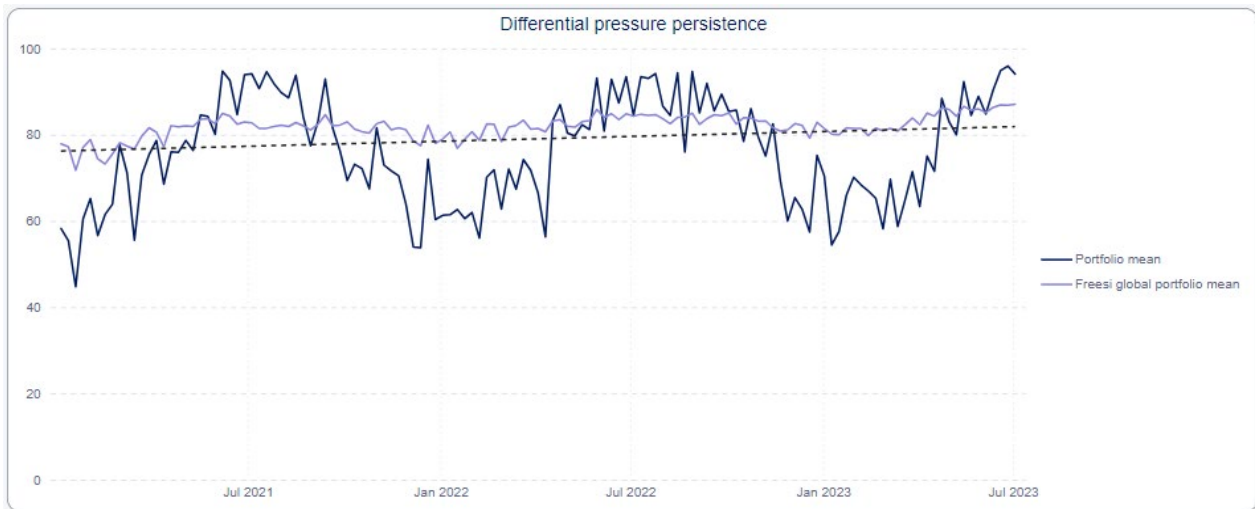
Kohteessa on toteutettu tiivistyskorjaus ja mittaushankkeen seurauksena kohteen painesuhteet saatiin stabiloitua pysymään tavoitearvoissaan.

2.1.2 Kuvat ja taulukot

Kuvista 1 ja 2 voidaan todeta, että lämpötilan ja hiilidioksidipitoisuuden yhdistetty pysyvyys on S2-sisäilmastoluokituksen raja-arvojen sisällä. Paine-erojen osalta pysyvyys on kehittynyt positiivisesti kohti sallittuja raja-arvoja.



Kuva 1. Lämpötilan ja hiilidioksidipitoisuuden pysyvyys sairaalakiinteistössä 1 asteikolla 0–100. Viitteellinen tavoiteraja on 90. Portfolio mean tarkoittaa kohteen kuvaajaa, katkoviiva kohteen painotettua keskiarvoa ja Freesei global portfolio mean tarkoittaa IoT erillismittausten järjestelmätöimittajan muiden kohteiden referenssikuvaa.



Kuva 2. Paine-erojen pysyvyys sairaalakiinteistössä 1 asteikolla 0–100. Viitteellinen tavoiteraja on 90. Portfolio mean tarkoittaa kohteen kuvaajaa, katkoviiva kohteen painotettua keskiarvoa ja Freesi global portfolio mean tarkoittaa IoT erillismittausten järjestelmätoimittajan muiden kohteiden referenssikuvajaa.

2.2 Case 2 Sairaalakiinteistö 2

Kohdetyyppinä 1950 luvulla rakennettu sairaalakiinteistö. Kohteessa kiinteistöautomaatiosta saatiin lämpötiladataa ja IoT erillismittauksina mitattiin lämpötila, ilmankosteus, hiilidioksidi ja paine-erot. Kohteessa on noin 30 IoT erillismittausta ja mittalaitteet ovat asennettuna kiinteästi kohteen tiloihin.

2.2.1 Hankkeen tavoitteet ja seuraukset

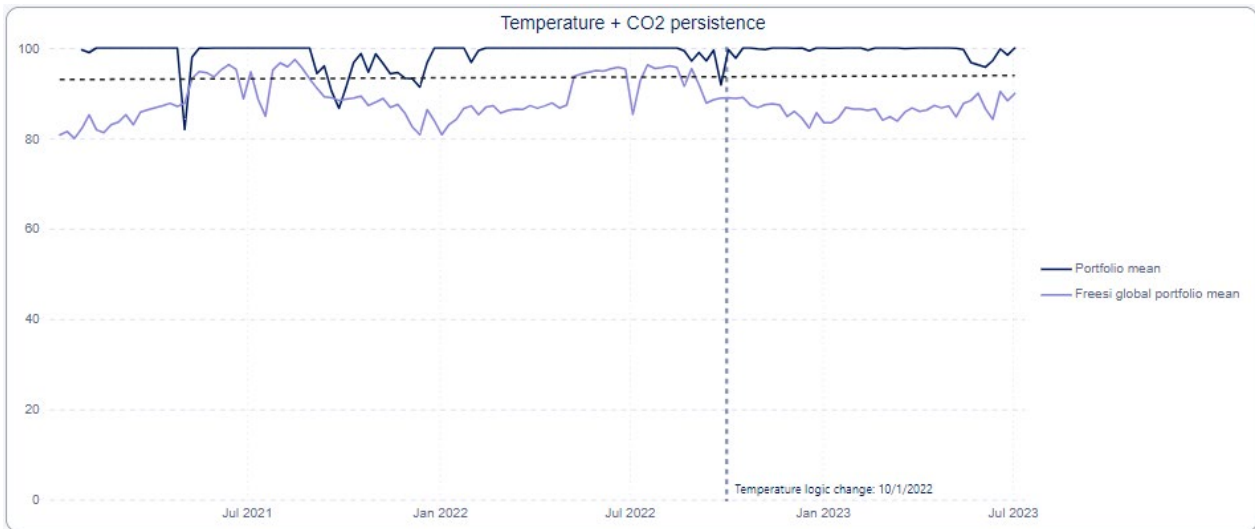
Asiakkaalla oli hankkeessa tavoitteena seuraavat neljä tavoitetta.

- Varmistaa, että kohteen automaatio ja talotekniikka toimii oikein.
- Varmistaa, että ilmanvaihto saadaan tasapainotettua.
- Parantaa ymmärrystä kohteen teknisestä toiminnasta.
- Helpottaa ja nopeuttaa vianselvitystä kiinteistössä.

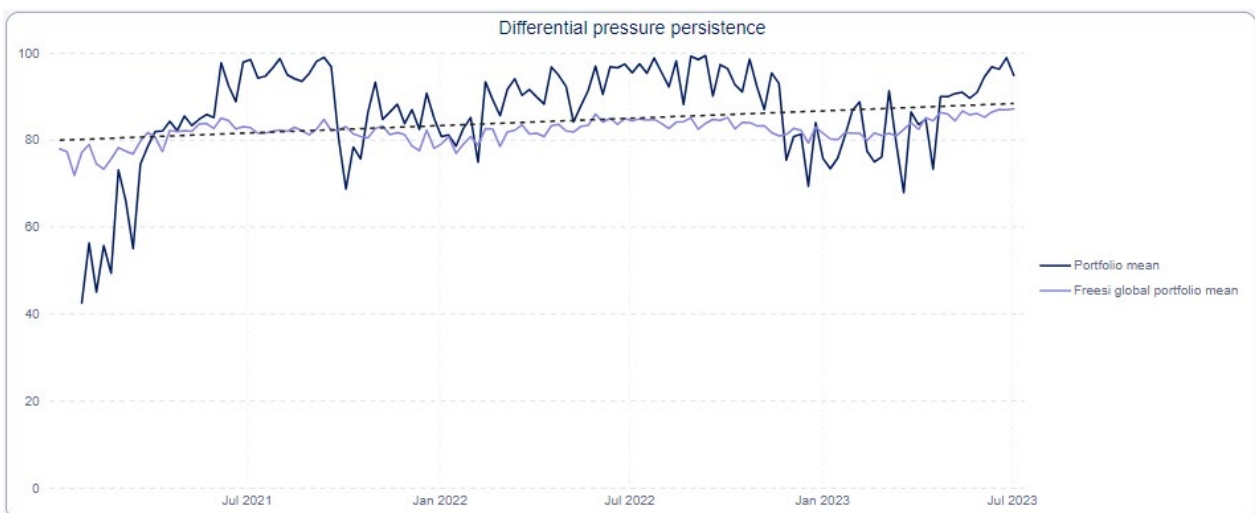
Hankkeen seurauksena kohteen ylipainesuus saatiin korjattua ja painesuhteet saatiin stabiloitua pysymään tavoitearvoissaan.

2.2.2 Kuvat ja taulukot

Kuvista 3 ja 4 voidaan myös todeta, että lämpötilan ja hiilidioksidipitoisuuden yhdistetty pysyvyys on S2-sisäilmastoluokituksen raja-arvojen sisällä. Paine-erojen osalta pysyvyys on kehittynyt positiivisesti kohti sallittuja raja-arvoja.



Kuva 3. Lämpötilan ja hiilidioksidipitoisuuden pysyvyys sairaalakiinteistössä 1 asteikolla 0–100. Viitteellinen tavoiteraja on 90. Asteikko on 0 - 100 välillä ja viitteellinen tavoiteraja on 90. Portfolio mean tarkoittaa kohteen kuvaajaa, katkoviiva kohteen painotettua keskiarvoa ja Freesi global portfolio mean tarkoittaa IoT erillismittausten järjestelmätoimittajan muiden kohteiden referenssikuvaaajaa.



Kuva 4. Paine-erojen pysyvyys sairaalakiinteistössä 2 asteikolla 0–100. Viitteellinen tavoiteraja on 90. Portfolio mean tarkoittaa kohteen kuvaajaa, katkoviiva kohteen painotettua keskiarvoa ja Freesi global portfolio mean tarkoittaa IoT erillismittausten järjestelmätoimittajan muiden kohteiden referenssikuvaaajaa.

2.3 Case 3 Koulukiinteistö 1

Kohdetyyppinä 1950-luvulla rakennettu koulukiinteistö ja lisäosia on rakennettu useana eri vuosikymmenenä. Kohteessa kiinteistöaitomaatiosta saatiin lämpötiladataa ja IoT

erillismittauksina mitattiin lämpötila, ilmankosteus, hiilidioksidi ja paine-erot. Kohteessa on noin 50 IoT erillismittausta ja mittalaitteet ovat asennettuna kiinteästi kohteen tiloihin.

2.3.1 Hankkeen tavoitteet ja seuraukset

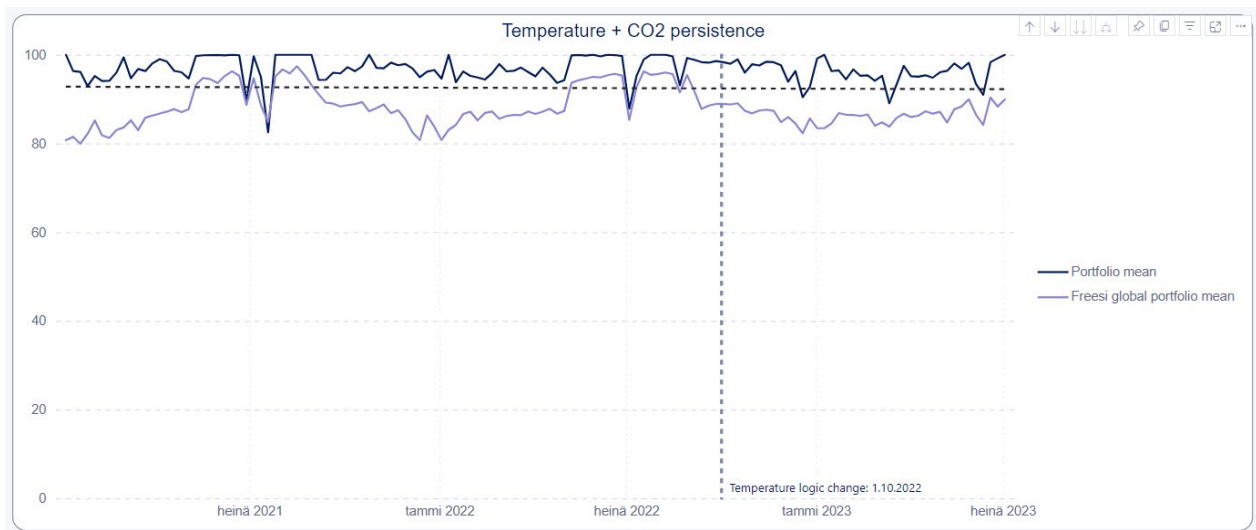
Asiakkaalla oli hankkeessa tavoitteena seuraavat neljä tavoitetta.

- Varmistaa, että kohteen automaatio ja talotekniikka toimii oikein.
- Tavoite päästä kohteen osalta sisäilmaongelmia ennaltaehkäisevään toimintamalliin.
- Saada mitattua tietoa kohteen päätöksenteon tueksi.

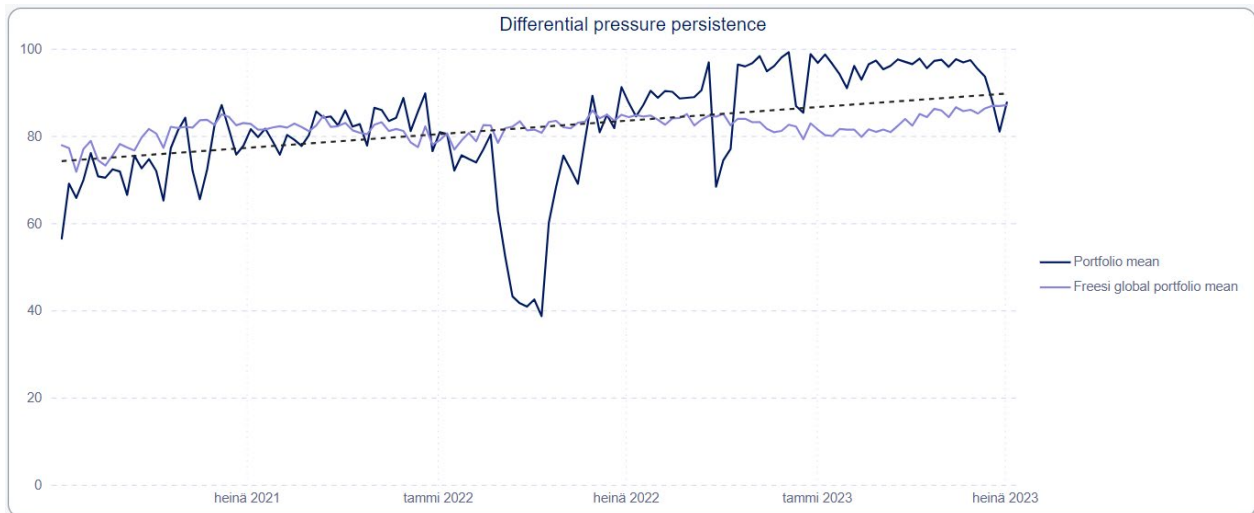
Hankkeen seurauksena on pystytty nopeuttamaan vikatilanteisiin puuttumista ja todentamaan toimenpiteiden vaikuttavuus. Lisäksi kohteessa syntyvien dataan pohjautuvien hälytysten määrä on vähentynyt hankkeen seurauksena 50 %.

2.3.2 Kuvat ja kaaviot

Kuvista 5 ja 6 voidaan todeta edellisten kuvien tapaan, että lämpötilan ja hiilidioksidipitoisuuden yhdistetty pysyvyys on S2-sisäilmastoluokituksen raja-arvojen sisällä. Paine-erojen osalta pysyvyys on kehittynyt tässäkin tapauksessa positiivisesti kohti sallittuja raja-arvoja.



Kuva 5. Lämpötilan ja hiilidioksidipitoisuuden pysyvyys koulukiinteistössä 1 asteikolla 0–100. Viitteellinen tavoiteraja on 90. Portfolio mean tarkoittaa kohteen kuvaajaa, katkoviiva kohteen painotettua keskiarvoa ja Freesi global portfolio mean tarkoittaa IoT erillismittausten järjestelmätoimittajan muiden kohteiden referenssikuvaajaa.



Kuva 6. Paine-erojen pysyvyys koulukiinteistössä1 asteikolla 0–100. Viitteellinen tavoiteraja on 90. Portfolio mean tarkoittaa kohteen kuvaajaa, katkoviiva kohteen painotettua keskiarvoa ja Freesi global portfolio mean tarkoittaa IoT erillismittausten järjestelmätoimittajan muiden kohteiden referenssikuvaaaja.

3. Yhteenveto

Tutkimuksen tuloksena on havaittu, että oikein toimiva ja luotettava mittadata on ratkaisevan tärkeää rakennusautomaatiojärjestelmien tehokkaalle toiminnalle. Jatkuvaa seuranta ja huoltoa mittalaitteille suositellaan, jotta voidaan varmistaa oikeiden ja tarkkojen mittausten saatavuus. Olemassa olevan rakennusautomaation ja vapaammin sijoitettavien IOT- järjestelmien yhteensovittaminen vaati lisäkehittämistä, jotta ne yhdessä tarjota käyttäjille optimaaliset olosuhteet sekä energiasäästöjä.

Yhtenevänä nimittäjänä hankkeissa todettiin kohteiden IoT lisämittausten lisäämisen olevan ketterä ja kustannustehokas tapa saada reaaliaikaista tietoa kiinteistöautomaatiodatan rinnalle. Kohteissa jatketaan mittaus ja analysointiprosessia osana kiinteistön ylläpitoa. Kohteissa suositellaan käytettävän kattavaa määrää mittauksia koko kiinteistöstä, jotta kohteen toiminnan kokonaiskuvan ymmärtäminen on mahdollista. Mittaukset suositellaan suoritettavan olosuhdevyöhykkeiltä, jotta kohteita voidaan analysoida sisäilmaluokitukseen peilaten.

Lähdeluettelo

- [1] Rakennusautomaation sisäilmamittausten käyttö sisäilmajohtamiseen, Mylläri, Juuso (2021)
- [2] Koetun ja mitatun olosuhdetiedon hyödyntäminen sisäilmajohtamisessa, Kauranen, Niko (2021)

Sähköisellä tomografialla maanalainen osa rakennuksista haltuun

Pekka Tuominen, Juhani Korkealaakso ja Antti Knuuti
Deep Scan Tech Oy

Tiivistelmä

Sähköisen tomografian käytöllä rakennetun ympäristön kohteissa saadaan näkyviin laajasti erilaisia hyödyllisiä tietoja kuten esimerkiksi maanalaiset rakenteet ja niiden materiaalit, putket ja kaapelit, maalajit kerroksittain, maaperässä oleva kosteus, pohjavesi ja peruskallio. Yhdistämällä tulokset CAD- ja BIM-malleihin, 3D-kuvina visualisoitavilla tuloksilla voi olla huomattavaa vaikutusta käytettävissä olevan maanalaisen tiedon laajuuteen rakennusprojekteissa. Mittaukset ovat nopeita toteuttaa ja ne voidaan tehdä pinnalta ilman kaivamista, poraamista ja muutenkin rakenteita rikkomatta ja niillä nähdään myös rakennusten alle. Esiteltyjen esimerkkien perusteella menetelmä soveltuu niin uudisrakentamiskohteisiin kuin olemassa oleviin rakennuksiin.

1. Johdanto

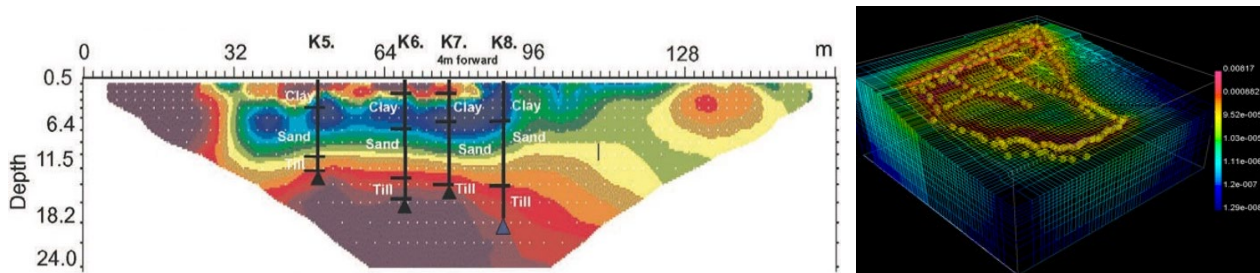
Rakennustapojen kehittyessä rakennusfysiikan syvälinen ymmärtäminen on muuttunut entistä tarpeellisemmaksi. Ilmastonmuutos, yleistyvät kosteusongelmat, tiukentuneet energiamääräykset ja vanheneva rakennuskanta lisäävät tarvetta uusille menetelmille rakennusten terveyden ja turvallisuuden varmistamiseksi. Tässä artikkelissa tarkastellaan sähköisen tomografian soveltuvuutta tähän tarkoitukseen esimerkkien avulla Deep Scan Tech:n hankkeista. Osaan tutkimuksista on saatu tukea ympäristöministeriöltä ja Business Finlandilta Vähähiilisen rakennetun ympäristön ohjelmasta, jonka rahoitus tulee EU:n kertaluonteisesta elpymisvälineestä.

Rakennusten pohjan ja perustusten tilan selvittäminen on haasteellista, sillä kyse on piilossa olevista rakenteista ja nykyiset kosteusmittarit tarjoavat vain rajallista tietoa. Tarkempien selvitysten tekeminen vaatii usein kalliita ja hankalia menetelmiä, kuten poraamista tai kaivamista. Tämä voi johtaa virheellisiin päätelmiin rakennusten kunnosta ja aiheuttaa tarpeetonta purkua ja johtaa korjaustöitä harhaan. Parempi tieto auttaisi välttämään tarpeettomia kustannuksia ja ympäristövaikutuksia sekä edistäisi terveellisempien rakenteiden rakentamista.

Sähköisen tomografian tuomat tulokset mahdollistavat uudenlaisen kolmiulotteisen näkymän kiinteistön piileviin ongelmiin ja vaurioihin, joita nykyisillä menetelmillä on joko mahdotonta tai erittäin vaikea saada selvitettyä luotettavasti ja kustannustehokkaasti ilman rakenteiden rikkomista tai maaperävauksia.

2. Menetelmän kuvaus

Rakennuskohteiden tutkimisessa hyödynnetään samantapaista kuvantamismenetelmää, joka on jo yleisesti kaupallisessa käytössä lääketieteellisissä ja geofysiikkaan liittyvissä kohteissa. Sähköisten tomografiamittausten avulla on mahdollista muodostaa kuva tutkittavasta kohteesta fyysikaalisen vuorovaikutuksen kautta mittaamalla kohdeaineesta saatu vaste. Vastesignaaleista voidaan matemaattisten mallien avulla päätellä eri aineiden jakautuminen kohteen sisällä. Tomografiset mittaustulokset voidaan tämän jälkeen esittää poikkileikkaus- tai 3D-kuvina, joissa esimerkiksi rakenteiden sisäiset kosteuden aiheuttamat riskikohdat on visualisoitu läpivalaisukuvan tapaisesti kerros kerrokselta (Kuva 1).



Kuva 1 Kaksi esimerkkikuvaa ET-tekniikalla tehdyistä maaperätutkimuksista, joista vasen on esitetty poikkileikkauskuvana ja oikea 3D-kuvana.

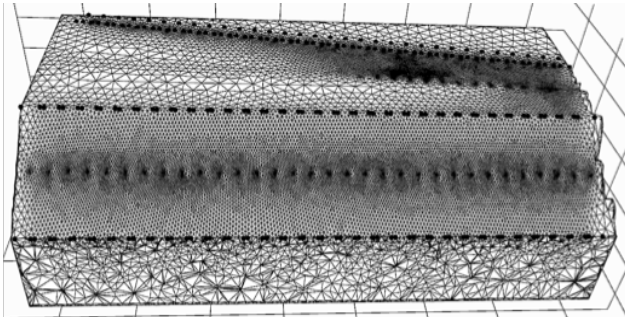
Lääketieteessä käytetään impedanssitomografiaa (EIT), joka perustuu pintaelektrodien mittauksiin. EIT tuottaa kuvan tutkitusta ruumiinosasta mittausten avulla, ja se perustuu eri kudosten sähkönjohtavuuden, permittiivisyyden ja impedanssin vaihteluun. Geologian alalla käytetään sähköistä resistanssitomografiaa (ERT), joka luo kuvan maan rakenteesta sähköisen vastuksen vaihtelun mittauksista. Verrattuna EIT-tekniikkaan, siinä kuvanmuodostuksen voidaan katsoa olevan matemaattisessa mielessä käänteisen ongelman ratkaisua.

Rakennetun ympäristön kohteita varten Deep Scan Tech hyödyntää menetelmien yhdistelmää, jossa edellä mainittuja mittaustapoja on täydennetty aika-alueen indusoidun polarisaation menetelmällä (DCIP), jossa mitataan tomografisesti maaperän resistanssivaihtelua taajuuksien suhteen ja sitten näistä mittaustuloksista lasketaan inversiolaskennalla niitä vastaavat keskeiset maaperän sähköiset ominaisuudet (reaalinen ja imaginaarinen sähkönjohtavuus, normalisoitu varautuvuus ja vaihe-ero) kolmiulotteisina parametrijakaumina [1]. Kahden tai useamman sähköisen parametrin käyttö tulosten analysoinnissa vähentää tulkinnanvaraisuutta, kun mittaukset liittyvät monimutkaisiin rakenteisiin, kuten ihmisen tekemiin rakennelmiin tai geologisiin muodostelmiin. Tämä on osoitettu useissa sovelluksissa, kuten infrastruktuurin ja litologian kartoituksessa [2][3]. Lisätarkkuutta saadaan kentällä tehdystä huolellisesta valmistelusta, kuten mittauselektrodien hyvästä kosketuksesta maaperään, huolellisesti suunnitellusta ja sovelletusta mittauskentästä sekä täydentävien mittausten tekemisestä, jolloin yksittäisiä mittausrvirheitä voidaan tunnistaa tilastollisen analyysin avulla [4][5].

Käytännössä kenttämittaukset toteutetaan painamalla maahan elektrodeja, joiden muodostamassa mittauskentässä tietokoneohjatusti käydään läpi elektrodien väliset sähköiset yhteydet tomografiakuvan muodostamiseen tarvittavan datan keräämiseksi. Tyypillisesti kenttämittaukset toteutetaan joko linjamittauksena, jossa kaikki elektrodit ovat suorassa linjassa, tai kahden erillisen linjan välisenä mittauksena. Mittauslinjat tehdään kahdella monijohtimisella kaapelilla; kummassakin kaapelissa on 32 elektrodia, ja tyypillinen mittauspituus on joko 62 metriä rinnakkaisten kaapelien osalta tai 124 metriä yhden lineaarisen kaapelin osalta. Laajemmat mittausalueet katetaan tekemällä useita peräkkäisiä mittauksia. Elektrodien ei kuitenkaan tarvitse olla suorissa linjoissa, vaan elektrodeja on mahdollista sijoitella vapaasti mittauskohteen eri puolille mahdollisimman laadukkaan lopputuloksen saamiseksi. Elektrodien kosketusta mittauskohteeseen voidaan tarvittaessa parantaa kastelemalla elektrodeja, käyttämällä sähköä johtavaa geeliä tai kostutettua bentoniittia elektrodien alla tai tarvittaessa liittämällä kaksi tai useampia elektrodeja saman mittauspisteen läheisyyteen.

Yksinkertaistetusti neljän elektrodin välisiä vastusmittauksia voidaan käyttää keskimääräisen sähkönvastuksen arvioimiseen maanalaisessa tilavuudessa. Kuitenkin tällainen mittaus ei anna aitoa tietoa tilavuuden vastusjakaumasta, koska virta hakeutuu kohtiin, joissa on erityisen alhainen vastus. Siksi todellisen vastuksen arvioimiseksi käytetään menetelmää, jota kutsutaan inversioksi tai käänteismallinnukseksi. Deep Scan Tech:n inversiomenetelmässä mitatut vastukset

on invertoitu käyttämällä tavanomaista Gauss-Newton-menettelyä, jossa optimointi on toteutettu matemaattisilla regularisointirajoitteilla ja ilman geologisia tietoja [6][7][8]. Sovelletussa inversiomenetelmässä regularisoinnilla haetaan mallia, joka on kompakti, eli sisältää mahdollisimman vähän poikkeamia vertailumalliin nähden, sekä tasainen, eli mahdolliset poikkeamat jakautuvat useisiin soluihin eivätkä keskity yksittäisiin mallin soluihin. Inversiomenetelmää varten mallin äärellisten elementtien verkko mukautetaan maan pinnalla ja alla oleviin elektrodirakenteisiin. 3D-inversiota varten verkko määritellään elementtisarjana, jossa jokaisessa on neljä solmua (muodostaen tetraedrejä, Kuva 2). Elektrodit voivat sijaita missä tahansa verkon sisällä, kunhan ne osuvat solmupisteisiin. Elektrodin ympärillä olevien elementtien keskikoko on puolet elektrodien vähimmäisetäisyydestä.



Kuva 2. Esimerkki mallinnuksessa käytetystä tetraedriverskosta.

Tulokset (käänteisen vastuksen ja induoidun polarisaation parametrien 3D-jakaumat) esitetään yhdessä analyysien ja tulkintojen kanssa kaksiulotteisina pystysuorina poikkileikkauksina valittujen mittauslinjojen varrella sekä vaakasuuntaisina syvyysleikkauksina, jotka kattavat mitatun alueen. Tulokset/tulkinnat esitetään kuvallisessa muodossa; valmiiksi tulkittuina ne siirretään lopuksi osaksi asiakkaan omaa CAD/BIM-prosessia. Tässä lopullisessa muodossaan 3D-kuvat esittävät sähköisten suureiden sijaan lopullisia tulkintoja, esimerkiksi rakenteita, materiaaleja, maalajien kerroksia, kosteutta tai muita tulosten käyttäjää kiinnostavia seikkoja rakennuskohteesta.

3. Esimerkkikohteet

Sähköisen 3D-tomografian soveltuvuuden havainnollistamiseksi tässä artikkelissa esitellään tuloksia seuraavista kohteista (Kuva 3):

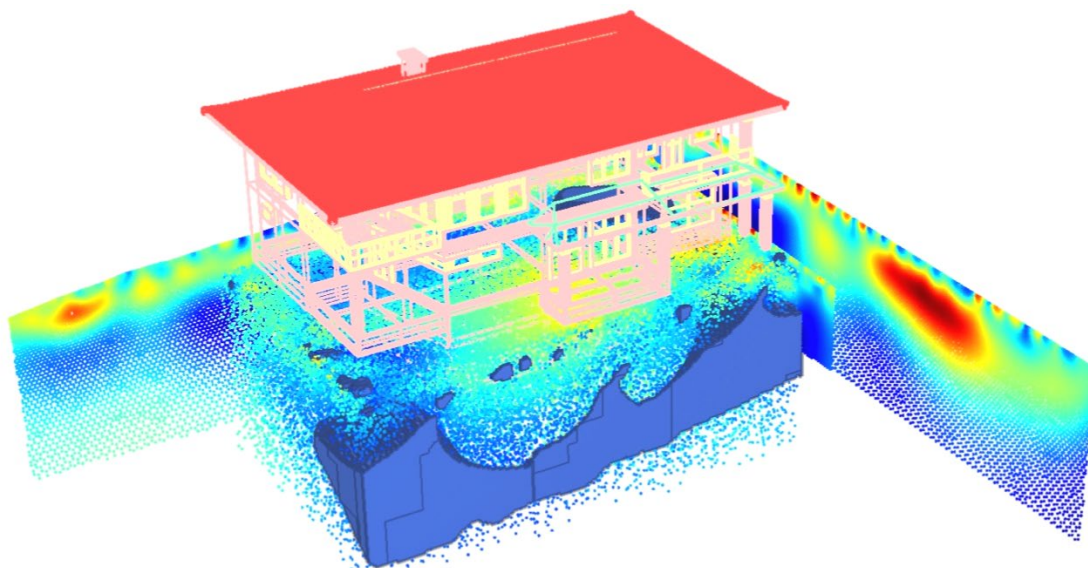
1. Omakotitalo Etelä-Suomessa, rakennettu 1988. Rakennuksessa on kolme kerrosta, joista yksi on maan alla. Maanalaiset rakenteet ovat betonia ja harkkotiiltä. Kohteessa selvitettiin perustamisolosuhteiden ohella eri maalajien kosteutta ja niiden kosketuspintoja maanalaisiin rakenteisiin. Lisäksi monitorointimittausten avulla seurattiin kosteuden etenemistä maaperässä vuoden ajan.
2. Uudisrakennuskohde Tanskan Aarhusissa. Aarhusin sataman läheiselle merenrantatontille rakennetaan Tanskan korkein toimistotalo, Mindet 6. Alueella on ollut rakennuksia jo 1800-luvulta lähtien ja maata on laajennettu eri aikoina pengertämällä. Tutkimuksilla selvitettiin tontilla olevia aiempia rakenteita sekä maaperän ominaisuuksia rakennushankkeen nopeuttamiseksi ja riskien vähentämiseksi.
3. Täydennysrakennuskohde Tanskan Aarhusissa. Vanhan vedenpuhdistamon yhteyteen ollaan rakentamassa lisäosaa. Suunnittelutöiden nopeuttamiseksi ja riskien vähentämiseksi selvitettiin alueella olevia maanalaisia rakenteita.
4. Suomenlinnan telakka. Kohteessa selvitettiin maanalaisia rakenteita tulevien korjaustöiden suunnittelua varten sekä veden kulkureittejä maaperässä.



Kuva 3. Artikkelissa esitetyt tutkimuskohteet vasemmalta oikealle: 1. Omakotitalo Etelä-Suomessa, 2. Tanskan korkein rakennus Mindet 6 (rakenteilla), 3. Aarhusin vedenpuhdistamo, 4. Suomenlinnan telakka.

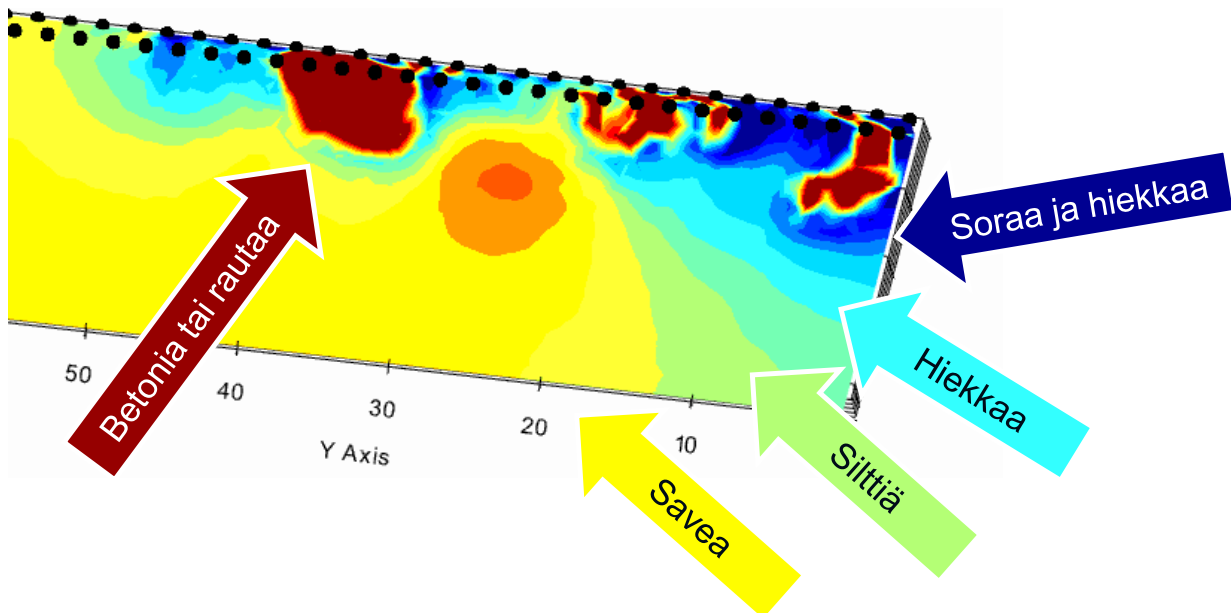
4. Mittaukset: valmistelu, toteutus ja tulokset

Kohteen 1 omakotitalossa selvitettiin kosteutta rakennuksen alla ja ympärillä olevassa maaperässä. Rakenteissa oli havaittu merkkejä kosteudesta, joiden perusteella oli aiheellista selvittää ympäristön mahdolliset kosteuslähteet. Perinteisin menetelmin tutkimalla rakennuksen ympäristön maata olisi pitänyt kaivaa, joka on työlästä, kallista ja aikaa vievää sekä olisi vaikuttanut esimerkiksi pihakiveykseen ja puutarhaan sekä maanalaisiin muihin rakenteisiin, kuten vesi- ja viemäriinjoihin ja kaukolämpöputkiin. Lisäksi kaivaessa on aina mahdollisuus, että aiheutetaan komplikaatioita tai vahinkoja. Sähköisellä tomografialla kosteusolosuhteet oli mahdollista selvittää nopeasti ja luotettavasti pinnalta mitaten, ilman tarvetta kaivaa tai rikkoa rakenteita. Mittaukset toteutettiin asettamalla elektrodit rakennuksen ympärille, noin metrin etäisyydelle rakennuksen seinästä. Tämä mahdollisti rakennuksen alapuolisten rakenteiden ja maaperäolosuhteiden kuvantamisen ja siten piilevien ongelmien kartoittamisen. Kenttämittaukset toteutettiin puolen työpäivän aikana. Mittausten avulla saatiin kartoitettua kiinteistön maaperäolosuhteet (Kuva 4), kuten peruskallion korkeus, maalajit ja pohjaveden korkeus, sekä juurisyyt liialliselle kosteudelle: loiva kalliopinta ohjasi veden suoraan talon alle. Lisäksi talon rinteeseen puoleinen salaoja ei tukkeutumisen vuoksi poistanut tehokkaasti perustusten lähellä olleissa maaperäkerroksissa ollutta vettä.



Kuva 4 Visualisointi mittaustuloksista yhdistettynä rakennuksen CAD-malliin. Tumma yhtenäinen muoto alla indikoi korkeaa kosteuspitoisuutta.

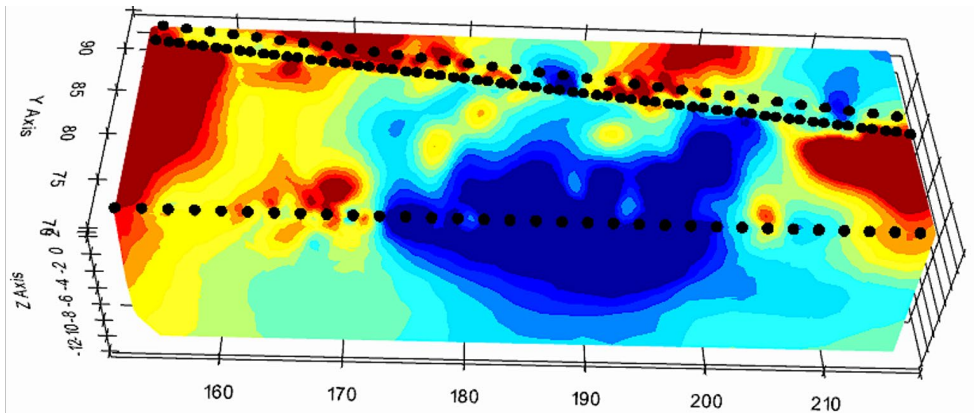
Kohteen 2 tontille on suunniteltu rakennettavaksi Tanskan korkein rakennus, Mindet 6. Korkean rakennuksen kohdalla maanalaisten olosuhteiden tuntemuksen merkitys korostuu ja aluetta tutkittiin olennaisilta kohdilta aiempien maanalaisten rakenteiden sekä maaperän ominaisuuksien tunnistamiseksi. Mittaukset kestivät kaksi työpäivää. Tulosten perusteella oli mahdollista kartoittaa millä syvyydellä kussakin kohdassa on vanha merenpohja, joka havaittiin pääosin savesta koostuvaksi. Päällä oleva täytemaa, jota on eri aikoina tuotu 1800-luvulta alkaen, todettiin pääosin soraksi ja hiekaksi. Maan alla piilevien vanhojen betoni- ja rautarakenteiden koko ja sijainnit tunnistettiin, jolloin niiden huomiointi perustamistöissä nopeuttaa prosessia ja vähentää ikäviä yllätyksiä. Kuvassa 5 on esimerkki mittaustuloksista alueelta.



Kuva 5. Esimerkkipoikkileikkaus, joka näyttää Mindet 6-tornitalon tontin alaisia maalajeja sekä maanalaisia rakenteita n. 25 metrin syvyyteen. Mittauslinjojen elektrodit näkyvät kuvassa mustina pisteinä pinnassa.

Kohteen 3 vanhan jätevedenpuhdistamon aluetta ollaan täydennysrakentamassa. Alueella toteutettiin useita mittauksia kohdissa, joissa oli syytä epäillä sijaitsevan käytöstä poistettuja maanalaisia rakenteita, kuten säiliöitä ja putkia. Mittaukset kestivät yhden työpäivän. Tulosten perusteella tunnistettiin suuri maanalainen rakennelma, joka on todennäköisesti käytöstä poistettu vesisäiliö, sekä useita pienempiä rakenteita ja rakennneosia, kuten putkilinjoja ja -kanaaleja. Näillä löydöksillä on olennainen merkitys purku- ja rakennustöiden tehokkaan suunnittelun ja toteutuksen kannalta.

Kohteessa 4 eli Suomenlinnan telakalla paikannettiin maanalaisen vedenpoistotunneli, jonka täsmällinen sijainti oli tuntematon. Tunnelin alku- ja loppupisteet sekä reitti muutaman metrin tarkkuudella tunnettiin, joten mittaukset voitiin kohdistaa tarkasti. Poistotunnelin ohella paikannettiin alueet, joissa vesi liikkuu maan alla, jotta voitiin selvittää telakka-altaaseen tihkuvan meriveden kulkureitti (Kuva 6). Suomenlinnan telakalla on merkittävää historiallista ja maailmanperintöarvoa, sillä se on maailman vanhin edelleen toimiva kuivatelakka. Suojelukohteessa on erityisen arvokasta, että tiedot saatiin pinnalta tehtävillä ja rakenteita rikkomattomalla menetelmällä.



Kuva 6. Maanalainen vuotoreitti näkyy tulokuvassa keskellä tummana alueena. Tummat muodot mitatun alueen reunoilla kuvaavat kalliota, vaaleat värit täyttemaata. Luvut ovat metrejä. Mittauslinjoissa olevat elektrodit näkyvät mustina pisteinä pinnalla.

5. Yhteenveto

Esitellyissä esimerkeissä saatujen tulosten perusteella sähköinen tomografia on tehokas ja luotettava tapa saada tietoa maanalaisista olosuhteista ja rakenteista rakennuskohteissa. Mittaus on nopea ja se voidaan tehdä pinnalta ilman kaivamista, poraamista ja muutenkin rakenteita rikkomatta ja sillä nähdään myös rakennusten alle. Esimerkkien perusteella menetelmä soveltuu niin uudisrakentamiskohteisiin kuin olemassa oleviin rakennuksiin. Tuloksena syntyy 3D-kuviin saadaan näkyviin laajasti erilaisia hyödyllisiä tietoja kuten esimerkiksi maanalaiset rakenteet ja niiden materiaalit, putket ja kaapelit, maalajit kerroksittain, maaperässä oleva kosteus, pohjavesi ja peruskallio. Yhdistämällä tulokset CAD- ja BIM-malleihin, tuloksilla voi olla mullistava vaikutus käytettävissä olevan maanalaisen tiedon laajuuteen rakennusprojekteissa.

Lähdeluettelo

- [1] Loke, M.H., Chambers, J.E., Rucker, D.F., Kuras, O. ja Wilkinson, P.B. 2013: Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. *Journal of Applied Geophysics* 95, 135–156.
- [2] Kemna, A., Binley, A. ja Slater, L. 2004: Crosshole IP imaging for engineering and environmental applications. *Geophysics* 69, 97–107.
- [3] Slater L. ja Lesmes D. 2002: IP interpretation in environmental investigations, *Geophysics*, 67, 77–88.
- [4] Flores Orozco, A., Kemna, A. ja Zimmermann, E. 2012: Data error quantification in spectral induced polarization imaging. *Geophysics* 77 (3), E227–E237.
- [5] Flores Orozco, A., Gallistl, J., Bücker, M. ja Williams, K.H. 2018. Decay curve analysis for data error quantification in time-domain induced polarization imaging. *Geophysics* 83 (2), E75–E86.
- [6] Korkealaakso, J. ja Kaila J. 2013: 3D time-lapse electrical imaging of processes and heterogeneities in the landfill body. ISWA BEACON 2nd International Conference on Final Sinks, Espoo, Aalto Yliopisto.
- [7] Korkealaakso, J. and Bohner, E. 2019: *Geophysical Methods for Repository Monitoring*. Espoo, Teknologian tutkimuskeskus VTT.
- [8] Maurer, H., Manukyan, E., Koskova, L., Hokr, M., Korkealaakso, J., Bohner, J., De Carvalho Faria Lima Lopes, B. ja Tarantino, A. 2019: Modern2020 – Geophysical monitoring of high-level radioactive waste repositories. 2nd International Conference on Monitoring in Geological Disposal of Radioactive Waste, Pariisi.

Ovatko riskirakenteet rakennusvirheitä oikeudessa?

Tiina Koskinen-Tammi
Asianajotoimisto Alfa Oy

Tiivistelmä

Suomessa ilmenee satoja, jopa tuhat kiinteistökauppariitaa vuosittain. Hyvin usein talokauppariidoissa on kyse kiinteistön tai asunnon laatuvirheestä, joka ilmenee käytännössä omakotitalon tai rivitaloasunnon riskirakenteiden kosteus- ja mikrobivaurioina. Sellaiset rakenteet ovat aikanaan olleet vallinneen ja tavanomaisen rakennustavan mukaisia. Ne on vasta myöhemmin ymmärretty rakennusfysikaalisesti huonosti toimiviksi ja mikrobivaurioitumiselle herkiksi. Joissakin riitaoikeudenkäynneissä on tuomioistuin todennut, että esim. valesokkeli on ollut määräysten vastainen rakenne ja siten rakennusvirhe. Artikkelissa käsitellyissä oikeustapauksissa on sekä tapauksia, joissa riskirakenne on todettu aikanaan rakennusvirheeksi, että tapauksia, joissa niitä ei ole pidetty rakennusvirheinä. Ongelmallista on, jos tällä vaihtelevalla tulkinnalla on merkitystä myyjän vastuun ankaruuteen. Tapausten perusteella voidaan todeta, että sillä, ovatko rakenteen mikrobivauriot seurausta rakennusvirheestä vai ei, ei välttämättä ole tapauksen lopputuloksen kannalta suurta merkitystä. Kiinteistön virheellisyyden ja virheen seuraamusten arviointi on kokonaisharkintaa, jossa myös monilla muilla seikoilla on merkitystä.

1. Johdanto

Suomalaisissa tuomioistuimissa käsitellään vuosittain parisen sataa kiinteistö- ja asuntokauppariitaa. Riitoja käydään ja ratkaistaan myös tuomioistuinten ulkopuolella siten, että niitä on vuosittain arviolta yhteensä tuhat kappaletta.[1] Hyvin usein talokauppariidoissa on kyse kiinteistön tai asunnon laatuvirheestä, joka ilmenee käytännössä omakotitalon tai rivitaloasunnon riskirakenteen kosteus- ja mikrobivaurioina. Erilaisia riskirakenteita on toteutettu menneillä vuosikymmenillä esim. 1960–1980-luvuilla pientalojen rakenteisiin mm. alapohjassa ja ulkoseinissä.[2] Tuollaiset rakenteet on vasta myöhemmin ymmärretty rakennusfysikaalisesti huonosti toimiviksi tai joissain olosuhteissa jopa toimimattomiksi ja siten mikrobivaurioitumiselle herkiksi.

Hovioikeuksien oikeuskäytännöstä löytyy erilaisia ratkaisuja siitä, onko kiinteistökauppariidassa riskirakenne aikanaan vuosikymmeniä sitten tehtynä tulkittu rakennusvirheeksi vai ei. Käsitelen tässä kirjoituksessa tällaisia tapauksia sekä tutkin sitä, onko tällä tulkinnalla vaikutusta johonkin juttujen oikeudellisessa tulkinnassa.

2. Riskirakenteet kiinteistökauppariidoissa

Riskirakenteen olemassaolo rakennuksessa ei sellaisenaan oikeudellisesti merkitse kiinteistön laatuvirhettä, mutta riskirakenteessa ilmenneet vauriot voivat hyvinkin merkitä laatuvirhettä.[3] Tässä arvioinnissa tarkastellaan paitsi rakennuksen rakennustekniikkaa ja mikrobiologista tilannetta, myös tehtyä oikeustointa eli talokauppaa ehtoineen ja sen aikaan käytettävissä olleine tietoineen. Talokauppariidan oikeudellisessa arvioinnissa arvioidaan kiinteistön laatuvirheperusteita, ostajan velvollisuuksia sekä virheen oikeudenmukaista seuraamusta. Maakaari tuntee laatuvirheperusteina sopimuksenvastaisuuden, tiedonantovirheen sekä salaisen

virheen. Käytännössä kaikkein tavallisin virheperuste on salainen virhe (kaupan kohde poikkeaa salaisen virheen perusteella merkittävästi ostajan perustelluista odotuksista). Oikeuskäytännössä on usein todettu, että jos muuta ei ole sovittu tai luvattu, omakotitalon ostajan perusteltu odotus on, että rakennus on rakennettu rakennusajan määräysten ja hyvän rakennustavan mukaisesti. Myyjän virhevastuulla suojellaan tätä perusteltua odotusta. Jos kohde poikkeaa merkittävästi tästä odotuksesta, siinä on virhe.[4]

Talokauppaa koskeva riitaoikeudenkäynti perustuu ja siinä käsitellään asianosaisten väitteitä, joiden paikkansapitävyyttä tuomioistuin arvioi esitetyn näytön perusteella. Talokauppariidassa osapuolten väitteet rakennuksen vaurioista ja vaurioitumismekanismeista perustuvat rakennusta tutkineen rakennusteknisen asiantuntijan havaintoihin ja tulkintoihin. Joissain kiinteistökauppariidoissa asianosainen (käytännössä talon ostaja) esittää, käyttämiinsä rakennusalan asiantuntijoihin vedoten, että rakennuksessa oleva riskirakenne on rakennusvirhe. Tuomioistuin ratkaisee esitetyn kokonaisnäytön perusteella, onko väite toteen näytetty vai ei.

3. Rakennusvirheen määrittelyminen

Rakennusvirhe on määritelty rakennusurakkakirjallisuudessa työntuloksessa ilmenevänä virheellisyytenä. Se kytkeytyy ennen kaikkea sopimusrikkomukseen eli työntulos poikkeaa sovitusta (suoritusvirhe). Tällöin moite kohdistetaan rakentajan ja tilaajan välisessä sopimussuhteessa rakentajaan ja virheestä seuraa rakentajan vastuu jossakin muodossa.[5] Rakennusvirhe voidaan määritellä toisaalta myös niin, että rakentamisen työntulos poikkeaa rakennusajankohdan hyvästä rakennustavasta tai rakentamismääräyksistä. Tällöin tarkastelu voi liittyä rakentamista koskevaan sopimussuhteeseen tai täysin muunlaiseen tilanteeseen, jossa ei ole välttämättä kyse rakentajan moittimisesta tai vastuusta.

Yleensä on ajateltu, että tietyllä tavalla jollakin aikakaudella tavanomaisesti rakennettaessa on kyse tuolloin vallinneesta rakennustavasta, jota voidaan pitää silloisena ”hyvänä rakennustapana”. Usein oikeudenkäynnissäkin todetaan esimerkiksi, että valesokkeli tai puukoolattu lattia on ollut aikanaan hyväksytty ja hyvän rakennustavan mukainen rakennustapa. Näiden rakenteiden rakennusfysikaalinen vaurioherkkyys on ymmärretty vasta vuosikymmeniä myöhemmin. Valesokkelin aikanaan toteuttanut rakentaja ei ole voinut tiedostaa vallitsevan yleisen tietämyksen perusteella, jota ammattitaitoiselta rakentajalta on voitu perustellusti odottaa, että hän on tekemässä virhettä valesokkelia toteuttaessaan.

Suomen rakennusmääräyskokoelman ensimmäiset Veden- ja kosteudeneristys määräykset C2 vuodelta 1976 antoivat vain yleisen tason määräyksiä rakenteiden kosteudenkestävyydelle. Määräysten kohdan 2.2.1. mukaan ”*Rakenteiden on estettävä maaperän kosteuden ja maahan valuvien pintavesien haitallinen tunkeutuminen rakenteisiin ja sisätiloihin.*” Kohta 2.2.4. puolestaan määräsi, että ”*Ulkoseinän on oltava sellainen, ettei seinään tunkeutuvalla sade- ja sulamisvedellä, maaperän kosteudella tai sisätilasta tunkeutuvalla vesihöyryllä ole haitallisia vaikutuksia seinään ja siihen liittyviin rakenteisiin.*” Jos kosteus kuitenkin on vuosien kuluessa päässyt tunkeutumaan rakenteisiin, onko kyse näiden määräysten rikkomisesta rakentamisessa ja sitä myöden virheellisestä rakentamisesta? Riskirakenteen mieltäminen jo alun perin rakennusvirheeksi sopii huonosti yhteen sen kanssa, että rakennusfysiikkaan liittyvä tietämys on lisääntynyt vuosikymmenten kuluessa ja vasta sen myötä on todettu, että aiempi yleisesti käytetty rakennustapa osoittautuu kokemuksen myötä vaurioalttiiksi ja se tällöin tuomittaisiin takautuvasti rakennusvirheeksi rakentajan moittimisen näkökulmasta.

4. Kiinteistökauppariidat rakennusvirheen kontekstina

Kun rakennusurakkariidoissa keskitytään uuden rakennuksen tai ainakin melko vastikään tapahtuneen rakentamisen virheisiin (urakoitsijan vastuu tilaajalle), voi kiinteistökauppariidoissa puolestaan olla kyse ääripäässä erittäin vanhankin rakennuksen vioista (myyjän vastuu ostajalle). Kiinteistökauppariidassa ei ole kyse rakentajan vastuusta eikä siinä yleensä sanktoida rakennuksen rakentajaa hänen tekemästään virheestä. Kiinteistökauppariidassa määritellään virhevastuu ostajan ja myyjän välisessä oikeussuhteessa. Useimmiten kumpikaan heistä ei ole ollut missään tekemisissä kyseisen rakennuksen rakentamisen kanssa eikä ole näin vaikuttanut rakentamisen rakenneratkaisuihin eikä ole niistä tarkemmin tietoinen.

Vaikka riitatapauksessa ei olisikaan kyse kiinteistön myyjän menettelyyn kohdistuvasta moitteesta ja moiteperusteisesta vastuusta, riskirakenteen tulkitsemisella rakennusvirheeksi voi olla oikeudellisesti merkitystä esimerkiksi arvioitaessa ylittykö salaisen laatuvirheen merkittävyyskynnys sekä virheen seuraamusten arvioinnissa. Rakennusvirhe voi vaikuttaa salaisen virheen merkittävyyskynnyksen ylittymiseen helpommin kuin jos kyseessä on vaurio, joka ei ole seurausta rakennusvirheestä, jos arvioidaan, että ostajan perusteltu ja suojeltava odotus talokaupassa on rakennusaikaisen hyvän rakennustavan noudattaminen.

Jos taas rakennusvirheen on aiheuttanut itse kiinteistön myyjä, voidaan vauriot katsoa luonteeltaan tiedonantovirheeksi salaisen virheen sijaan, mikä voi vaikuttaa virheen seuraamuksiin. Tällöin hinnanalennuksen tai kaupan purun ohella mahdollinen on myös myyjän tuottamukseen eli huolimattomuuteen perustuva vahingonkorvaus.

Hovioikeusiemme ratkaisukäytännössä on erilaisia ratkaisuja siitä, tulkitaanko aikanaan vallitsevan tavan mukaan toteutettu rakenne, joka nykyään tunnustetaan riskirakenteeksi, aikanaan tehdyksi rakennusvirheeksi. On ongelmallista, jos tulkinta vaihtelee jutusta toiseen. Ongelmallista on myös, jos sattumanvarainen rakennusvirheeksi tai ei-rakennusvirheeksi tulkitseminen vaikuttaa jutun lopputulokseen. Käsittelen seuraavassa muutamia hovioikeuksien antamia kiinteistökauppariitojen tuomioita, joissa on käsitelty esimerkiksi valesokkeliä tai puukoolattua alapohjarakennetta rakennusvirheenä tai ei-rakennusvirheenä.

5. Hovioikeuksien ratkaisuja

Vaasan hovioikeuden tuomiossa 6.7.2017 nro 259 oli kyse v. 1979–83 rakennetun omakotitalon kaupasta v. 2010. Kauppahinta oli ollut 156.000 euroa. Osassa taloa oli maanvaraisen betonilaatan päällä puukorokelattia, osassa kaksoisbetonilaatta. Ostaja vetosi virheenä alapohjan kosteus-, laho- ja mikrobivaurioihin ja rakennusvirheisiin, kuten lattiarakenteen kapillaarikatkon puuttumiseen. Alapohjarakenne oli purettu ja uusittu pohjalaattaa ja täyttömaata myöten. Korjauskustannukset olivat olleet 47.935,83 euroa

Myyjä esitti oikeudenkäynnissä, että alapohja oli rakentamisajan rakennustavan mukainen ja vaurioita oli vain laatan pintaa vasten. Muutokset olivat normaalia rakenteen ikääntymistä. Suuri osa teknisestä käyttöiästä oli kulunut. Tehty korjaus oli ylimitoitettu.

Hovioikeus totesi selvitettyksi, että alapohjarakenteessa ja väliseiniä alaosissa oli ostajan esittämät mikrobi-, kosteus- ja lahovauriot. Hovioikeus katsoi kyseessä olleen rakennusvirhe seuraavilla perusteluilla: ”Rakentamisajankohdan määräykset (C2 v. 1976) olivat edellyttäneet, että ala- ja välipohjan sekä seinän rakenteiden on estettävä maaperän kosteuden ja maahan valuvien pintavesien haitallinen tunkeutuminen rakenteisiin ja sisätiloihin. Määräysten

ylimalkaisuudesta huolimatta rakentamisajankohtana oli edellytetty rakentamista siten, että kosteuden pääsy rakenteisiin estetään. Ostaja oli voinut luottaa siihen, että rakennus oli rakennettu rakentamisajankohdan säännösten ja yleisesti käytössä olleen hyvän rakentamistavan mukaisesti.” Hovioikeuden mielestä rakennusvirheitä olivat mm. kapillaarikatkon eli bitumikerroksen puuttuminen laatan ja puukoolauksen sekä villaeristeen välistä, sekä hienojakoinen sora ja virheellisesti limitetty muovi betonilaatan alla.

Hovioikeus katsoi kyseessä olleen merkittävä salainen virhe, jonka perusteella se tuomitsi hinnanalennusta 44.986,31 € eli koko korjauskustannusten määrän verran. Hovioikeuden mukaan korjauksesta ei aiheutunut tasonparannusta, koska talon perustusten, lattia- ja seinärakenteiden voidaan edellyttää kestävän omakotitalon koko elinkaaren. Vaikka em. rakenteet oli uusittu, olivat korjaukset olleet välttämättömiä, eikä omakotitalon käyttöön voitu katsoa pidentyneen tai tason parantuneen siitä, mitä se olisi ollut, jos rakenteet olisi alun alkaen rakennettu rakentamisajan vaatimusten mukaisesti. Ostajat eivät olleet saaneet suorittamistaan korjaustöistä sellaista hyötyä, joka olisi tullut ottaa huomioon hinnanalennuksen määrää arvioitaessa.

Ratkaisussa rakennusvirhe todettiin ja se muiden perusteiden ohella vaikutti ostajan perusteltuihin odotuksiin laatuvirheen perusteena. Toisaalta voisi ajatella, että jos alapohja on rakennettu 1980-luvun alussa ja se on rakennettu aivan oikein, ostajan perusteltu odotus ei voi olla se, että se alkuperäistoteutuksena kestää vaurioitumattomana hyvin paljon pidempään kuin mikä sen tekninen käyttöikä on.

Rovaniemen hovioikeuden tuomiossa 31.5.2019 nro 195 oli kyseessä v. 1982 rakennettu/1988 laajennettu omakotitalo, jonka kauppa oli tehty v. 2010. Kauppahinta oli ollut 162.000 euroa. Talossa oli valesokkeli ja vanhalla osalla puukoolattu lattia. Ostaja vetosi virheenä alapohjan lämmöneristeissä ja ulkoseinien alaosissa todettuihin kosteus- ja mikrobivaurioihin sekä ilmavuotoihin. Korjauskustannukset olivat ostajan mukaan n. 113.600 euroa. Ostaja vaati ensisijaisesti kiinteistökaupan purkua.

Myyjän mielestä talo oli tehty rakennusajan rakentamismääräysten mukaisesti. Hovioikeus katsoi virheet näytetyksi toteen. Hovioikeuden mukaan mikrobikasvusto oli seurausta alapohjan ja ulkoseinän rakenteiden kosteusteknisesti riskialttiista ja virheellisestä rakennustavasta johtuvasta kosteusrasituksesta. Myös tässä tapauksessa hovioikeus viittasi rakentamismääräyksiin toteamalla, että asuinrakennuksen rakentaminen on pitänyt rakentamisajankohtanakin toteuttaa siten, että kosteuden pääsy rakenteisiin estetään. Kyseessä oli luonteeltaan tiedonantovirhe. Myyjä oli rakennusinsinööri, joka oli itse suunnitellut talon ja osallistunut sen rakentamiseen. Hovioikeus katsoi, että myyjä oli ollut tietoinen alapohjan ja ulkoseinien virheistä, kosteuden tiivistymismahdollisuudesta aiheutuneesta vaurioherkkyydestä ja –riskeistä, mikrobivaurioista ja niihin liittyvistä laajoista korjaustarpeista sekä jättänyt tästä huolimatta kertomatta näistä ostajalle, jolta on puuttunut rakennusalan eristystietämystä. Hovioikeus katsoi alapohjan purkamisen perustellummaksi ja varmemmaksi korjausmenetelmäksi tiivistämisen sijaan. Vaurioiden korjauskustannukset olivat 75.000 euroa. Hovioikeus purki kaupan. Ostaja oli voinut edellyttää, ettei rakennuksen alapohjassa tai ulkoseinissä ole lähiaikoina mittavia korjaustarpeita. Laatuvirheen laajuus ja arvioidut korjauskustannukset, virheen vaikutus kiinteistön arvoon ja virheestä aiheutuva terveyshaitta tekivät laatuvirheestä kokonaismerkitykseltään olennaisen.

Virheellistä rakentamista ei edellä käsitellyissä tapauksissa kuitenkaan esitetty perusteeksi virheen seuraamuksen ankaruudelle, vaikka niistä ensimmäisessä määrättiin koko korjauskustannusten määrän suuruinen hinnanalennus ja toisessa tapauksessa kaupan purku. Rakennusvirheellä on ennemminkin ollut vaikutusta laatuvirheen olemassaoloon ylipäättään.

Useimmissa muissa tapauksissa tuomioistuimien ei kuitenkaan ole pitänyt esim. valesokkelirakennetta rakennusvirheenä, jolloin laatuvirheen olemassaoloa ja virhekynnysten ylittymistä on perusteltu kuitenkin muilla argumenteilla.

Turun hovioikeuden tuomiossa 30.11.2018 nro 937 oli kyse v. 1983 valmistuneen omakotitalon kauppariidasta. Talossa oli valesokkeli ja kaksoisbetonilaatta. Kiinteistökauppa oli tehty 240.000 euron kauppahintaan v. 2015. Ennen kauppaa oli tehty kuntotarkastus, jossa ei ollut todettu valesokkelia. Ostaja vetosi virheenä valesokkelirakenteen kosteus- ja mikrobivaurioihin sekä väliseinien alaosien, alapohjan kaksoisbetonilaatan ja yläpohjan lämmöneristeiden mikrobivaurioihin. Korjauskustannukset olivat n. 140.000 euroa. Ostaja vaati ensisijaisesti kaupan purkua.

Rakenteiden kosteus- ja mikrobivauriot olivat riidattomia. Hovioikeus totesi selvitettyksi, että vauriokohdista oli yhteys sisäilmaan ja että vaurioista voi aiheutua terveyshaittaa, ja lopputuloksena purki kaupan. Vaurioiden korjaus edellytti ulkoseinien, kantavien väliseinien sekä yläpohjan korjaamista. Kustannusarviot vaihtelivat 63.700–170.000 euron välillä. Hovioikeus totesi, että alimmankin arvion perusteella rakennuksen korjauskustannukset asumiskuntoon olivat noin 26 prosenttia kauppahinnasta, mitä ei voida pitää sellaisina kohtuullisina korjauskustannuksina, joihin ostaja oli voinut kauppaa tehtäessä varautua.

Vaasan hovioikeuden tuomiossa 28.8.2017 nro 304 oli kyse v. 1979–1980 rakennetun valesokkelitalon kaupasta. Kiinteistökauppa oli tehty 111.000 euron kauppahintaan v. 2016. Ostaja vetosi laatuvirheenä alapohjan kosteus- ja mikrobivaurioihin ulkoseinien ympärillä valesokkelirakenteen sekä salaojituksen toimimattomuuden seurauksena; painovoimaisen ilmanvaihdon puutteelliseen toimintaan sekä lattiarakenteen (muovimatto) vaurioihin. Korjauskustannukset olivat 49.882 euroa. Ostaja vaati ensisijaisesti kaupan purkua ja toissijaisesti 49.800 euron hinnanalennusta. Myyjä kiisti vaatimukset mm. sillä perusteella, että kiinteistö oli ollut teknisen käyttöikänsä loppupäässä, koska peruskorjauksia ei ollut tehty.

Käräjäoikeus katsoi, että kyseessä oli merkittävä salainen virhe. Käräjäoikeus purki kaupan. Kiinteistö oli ostettu asuinkäyttöön, johon se ei virheiden ja terveyshaitan vuoksi soveltunut ilman korjauksia. Ostajan asuminen kiinteistöllä oli estynyt jo 8 kuukauden ajan ja korjaus kestäisi ainakin 2–3 kuukautta. Korjauskustannusten katsottiin nousevan yli 50.000 euroon, mikä oli merkittävä määrä suhteessa kauppahintaan. Vaikka rakennus oli kaupantekohetkellä n. 36 vuotta vanha, korjauskustannukset olivat uskottavasti olennaisesti suuremmat kuin ostaja oli kauppaa tehtäessä voinut ennakoita joutuvansa lähitulevaisuudessa kohtuullisina korjauskustannuksina maksamaan. Kun vielä huomioitiin epävarmuus vaurioiden laajuudesta ja korjausten riittävydestä, kaupan purkamista oli pidettävä oikeampana ja kohtuullisempaan ratkaisuna kuin hinnanalennusta.

Hovioikeus ei myöntänyt asialle jatkokäsittelylupaa, koska asiassa ei ilmennyt aihetta epäillä käräjäoikeuden ratkaisun lopputuloksen oikeellisuutta eikä näytön arvioinnin oikeellisuutta. Näin ollen käräjäoikeuden tuomio pysyi voimassa.

6. Yhteenveto

Rakennusvirhe määriteltynä siten, että tarkoitetaan rakennusajankohdan rakentamismääräysten tai hyvän rakennustavan vastaista rakentamista, sisältää moitteen rakentajaa kohtaan. Kiinteistökauppariidoissa, joissa vastakkain ovat useimmiten vanhan talon ostaja ja myyjä, ei olla moittimassa rakentajaa vaan asettamassa vastuuta ostajan ja myyjän kesken.

Rakennusmääräykset 1970-luvulta ovat määränneet, että rakennukset tulee rakentaa niin, etteivät ne vaurioidu kosteudesta. Samaan aikaan on rakennettu hyvin yleisesti monia tunnettuja riskirakenteita, jotka on myöhemmin todettu vaurioherkiksi. Riskirakenteet ovat olleet vallinneen rakennustavan mukaisia eikä niiden rakentajia voida syyllistää vääränlaisesta rakentamisesta aikanaan. Jos rakentajaakaan ei voida moittia aikanaan vallinneen tavan mukaisesta rakentamisesta, vielä vähemmän voidaan aikanaan vallinneen tavan mukaisesti rakentamisen perusteella moittia/rangaista ankarasti vanhan omakotitalon myyjää, joka ei ole kyseiseen rakentamiseen lainkaan edes osallistunut.

Tietyissä riitaoikeudenkäynneissä on kuitenkin tuomioistuimien todennut, että esim. valesokkeli on ollut rakennusvirhe. Ongelmallista on, että sama rakenne tulkitaan toisinaan rakennusvirheeksi ja toisinaan ei virheeksi. Ongelmallisena pidän myös sitä, jos tällä tulkinnalla on merkitystä myyjän vastuun ankaruuteen. Tutkin kirjoituksessa sitä, mitä merkitystä on sillä, onko riskirakenne tulkittu rakennusvirheeksi tai ei ole siksi tulkittu. Oikeuskäytännöstä on vaikea eritellä, mikä merkitys on ollut nimenomaan sillä seikalla, että vaurioitunut rakenne on tulkittu rakennusvirheeksi, koska virheen merkittävyyttä ovat puoltaneet yleensä muutkin seikat kyseisissä tapauksissa (vaurioiden laatu ja laajuus, terveyshaitta sekä vaurioiden korjauskustannusten suuri määrä). Vaikka rakennus olisi rakennettu aikansa määräysten mukaisesti eikä ostaja väitäkään kyseessä olevan virheellinen rakentaminen aikanaan, kiinteistössä voi hyvinkin olla laatuvirhe löydettyjen vaurioiden johdosta. Eli sillä, ovatko vauriot seurausta rakennusvirheestä vai ei, ei välttämättä ole jutun lopputuloksen kannalta suurta merkitystä.

Joka tapauksessa tämänkin kysymyksen kannalta olisi tärkeää lisätä vanhan omakotitalon kaupan tekijöiden tietoisuutta aiempien vuosikymmenten rakenneratkaisuista ja riskirakenteista, tutkia talot kunnolla ennen kauppaa ja saada kauppaa tekevät varautumaan riskirakenteiden vaurioihin paremmin kaupassa siten, etteivät ne merkitsisi niin isoja ongelmia kaupan jälkeen. Riskirakenteiden vaurioihin liittyvän oikeudenkäynnin lopputulos on sekä ostajan että myyjän kannalta vaikeasti ennakoitavissa ja oikeudenkäynti aiheuttaa merkittäviä kustannuksia. Riitatilanne kannattaa yrittää välttää jo etukäteen. Kaikkien tunnistettujen tunnettujen riskirakenteiden tulisi olla kaupan osapuolten tiedossa jo ennen kauppaa. Riskirakenteet tulisi ottaa vakavasti ja mieltää niihin hyvin mahdollisesti liittyvä korjaustarve jo ennen kaupantekoa.

Lähdeluettelo

- [1] Mäki S., Säkkinen K., Salmela A., Lampi J., Pekkanen J., Hyvärinen A., Koskinen-Tammi T., Laurila L., Rämö H., Sainio M., Puolanne M. Sisäilmaongelmia kohdanneiden ihmisten auttaminen ja tukeminen, 2021, Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2021:48 s. 120 ja siinä mainitut aiemmat selvitykset.
- [2] Ympäristöministeriö Hometalkoot 2012. Tunnista ja tutki riskirakenne Opetusmateriaali Pientalojen riskirakenteet.
- [3] Koskinen-Tammi, T., Laurila, L. ja Väisälä, P., Valesokkeli oikeudessa. Sisäilmastoseminaari 2020, s. 287–289.
- [4] Kiinteistön laatuvirheestä Hoffren, M. 2013. Virhevastuu asunnon ja asuinkiinteistön kaupassa. s. 99–127.
- [5] Laine, J. 1993. Rakennusvirheistä, s. 67–70.

A7. Kosteusturvallisen rakentamisen palkinnon voittajaehdokkaat

Terve talo RT-kortit on uusittu

Leif Wirtanen, Magnus Stagnäs ja Timo Turunen
Ramboll Finland Oy

Tiivistelmä

Terveen talon toteutuksen uusitut RT-kortit julkaistaan syksyn 2023 aikana. Korteissa kuvataan tavoitteet ja tehtävät sekä ohjeistetaan käytännön toimenpiteitä Terveen talon toteutukselle hankesuunnittelusta rakennuksen käyttöönottoon ja käyttöön. Vanhentuneet Terveen talon toteutuksen kriteerien RT-kortit korvataan kahdella täysin uudella RT-kortilla, joista toinen on kohdistettu uudisrakennushankkeille ja toinen korjaushankkeille. Tarpeen päivitystyölle on luonut niin lainsäädännössä kuin alan yleisessä ohjeistuksessa tapahtuneet merkittävät muutokset. Näitä ovat olleet mm. uusien rakentamista koskevien asetusten voimaantulo, Sisäilmastoluokituksen päivitys, rakennushankkeen kosteudenhallinnan Kuivaketju10-toimintamallin julkaisu sekä uusitut julkaisut RIL 250 ja RIL 107. Korjaushankkeita varten on lisäksi julkaistu mm. ympäristöministeriön oppaat Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus ja Kosteus- ja mikrobivaurioituneiden rakennusten korjaus. Uusitut RT-kortit toimivat erityisesti tilaajan oppaana, mutta ne ovat luonnollisesti myös rakennushankkeen muiden osapuolten hyödynnettävissä. RT-korttien tueksi julkaistaan rakennushankkeen vaihekohtaiset tehtävät sekä suunnittelualakohtainen tarkastuslista rakennusosittain.

1. Johdanto

Rakentamista säätelevien asetusten voimaantulon seurauksena oli havaittavissa tilaajien tavoitteiden fokuksen siirtymistä Terve talo -hankkeista enemmän kohti kosteudenhallintaa. Yksi potentiaalinen syy tähän saattoi olla kosteudenhallinnan korostuminen lainsäädännön myötä ja toinen vanhentuneiden Terve talo RT-korttien [1,2] käytön hankaloituminen niiden sisältämän vanhentuneen ohjeistuksen myötä. Vanhentuneella ohjeistuksella ei tässä tarkoiteta itse Terve talo -hankkeen toteutusprosessin kuvauksen vanhentumista vaan lainsäädännössä ja alan yleisessä ohjeistuksessa tapahtuneita muutoksia. Viime aikoina on jälleen ollut havaittavissa, että kiinnostus Terve talo -hankkeiden toteutukselle on tilaajien keskuudessa lisääntynyt.

2. Lainsäädännössä ja ohjeistuksessa viime vuosien aikana tapahtuneita muutoksia

Uusien rakentamista koskevien asetusten julkaisun myötä vuoden 2018 alussa rakennushankkeiden kosteudenhallinnan vaatimusten ja ohjeistuksen lisäksi uudistettiin mm. rakennuksen lämpöoloihin, ilmavirtoihin, ääniolosuhteisiin, painesuhteisiin ja veden lämpötilaan liittyviä vaatimuksia [3-5]. Sisäilmastoluokitus, joita sekä vanhentuneet että uusitut Terve talo -kortit täydentävät, on päivitetty vuosina 2008 ja 2018 [6,7]. Sisäilmastoluokituksen vuoden 2018 päivityksessä tehtiin muutoksia mm. lämpöolosuhteiden tavoitearvoihin sekä puhtaudenthallintaan. Uusia rakennusten kosteudenhallintaa käsitteleviä ohjeita on esitetty mm. julkaisussa RIL 250-2020 [8]. Rakennusten ja rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden uudistettua ohjeistusta on julkaistu mm. ympäristöministeriön ohjeessa rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta [9] ja RIL 107-2022:ssa [10]. Peruskorjaushankkeisiin liittyen on vanhentuneiden Terve talo RT-korttien julkaisemisen jälkeen julkaistu mm.

ympäristöministeriön oppaat rakennuksen kosteus- ja sisäilmateknisistä kuntotutkimuksista [11] ja kosteus- ja mikrobivaurioituneiden rakennusten korjauksesta [12].

3. Uusitut Terve talo RT-kortit

Hyvä sisäilmasto on yksi rakentamisen tärkeimpiä tavoitteita. Vanhentuneissa Terveen talon toteutuksen RT-korteissa on kirjattu, että Terveen talon kriteereillä ja ohjeilla kuvataan ne tärkeimmät suunnitteluun ja rakentamiseen liittyvät vaatimukset, jotka toteuttamalla aikaansaadaan toimiva, terveellinen ja vaaditut sisäilmasto-olosuhteet täyttävä rakennus. Uusituissa ohjeissa ei esitetä suoranaisia vaatimuksia, vaan vaatimusten osalta viitataan olemassa olevaan lainsäädäntöön. Tämä ei kuitenkaan poista mahdollisuutta, etteikö tilaaja voisi asettaa määräyksiä ja ohjeita tiukempia hankekohtaisia vaatimuksia. Muuten peruslähdekohta säilyy samana, eli uusituissa ohjekorteissa pyritään esittämään, kuinka Sisäilmastoluokituksessa määritetyt sisäilmaston laatutavoitteet laatuluokissa S1 ja S2 voidaan toteuttaa käytännössä hankkeen hankesuunnittelusta valmiin rakennuksen käyttöön ja ylläpitoon.

Vanhentuneissa Terveen talo toteutuksen RT-korteissa oli varsinaisen leipätekstin seassa tarkastuskohtia ja liitteinä erilaisia tarkastuslistoja ja ohjeita. Uusituissa Terveen talo RT-korteissa on kuvattu tärkeimmät suunnitteluun ja rakentamiseen liittyvät ohjeet. Toinen kortista käsittelee uudisrakennushankkeita ja toinen korjaushankkeita, eikä niissä ole enää eroteltu rakennustyyppiä, vaan molemmat kortit koskevat kaikkia rakennustyyppisiä hankemuodosta riippumatta. Ohjekortteja täydentävät vaihekohtainen tehtäväluettelo ja suunnittelualakohtainen tarkastuslista toimivat hankkeiden käytännön toteutuksen työkaluina ja tukena.

Uusitut Terve talo RT-kortit ovat:

- Terve talo – Uudisrakennushanke – tilaajan ohje
- Terve talo – Korjaushanke – tilaajan ohje

Näitä kortteja täydentävät:

- Terve talo – Vaihekohtaiset tehtävät
- Terve talo – Suunnittelualakohtainen tarkastuslista rakennusosittain.

Uusituissa ohjekorteissa korostetaan, että päätös hankkeen toteuttamisesta Terve talo -ohjeita noudattaen on tilaajalla. Tilaajalla tarkoitetaan ohjekorteissa rakennushankkeelle tavoitteet asettavaa tahoa. Tilaajan on hyvä tunnistaa, että Terve talo -hankkeessa on monia asioita, joita tulee ohjata, yhteensovittaa sekä määritellä vastuutahot, jotta valmiissa rakennuksessa saavutetaan tavoitetason mukaiset sisäilmasto-olosuhteet. Näin ollen tulisi päätös Terve talo-ohjeiden noudattamisesta tehdä mieluiten jo ennen hankesuunnitteluvaihetta, jotta asia tulee otettua huomioon jo suunnittelutarjouspyyntöjä laadittaessa.

Uutena asiana on esitetty, että tilaajan päätöksellä voidaan hankkeeseen kiinnittää erillinen Terve talo -koordinaattori, joka toimii tilaajan tukena hankkeessa koko sen ajan. Terve talo -tavoitteiden toteutumisen seuranta voidaan vaihtoehtoisesti sisällyttää jollekin hankkeessa jo muutenkin mukana olevalle taholle. Erillisen Terve talo -koordinaattorin kiinnittämistä hankkeeseen suositellaan etenkin suuremmissa ja monimuotoisissa hankkeissa. Mikäli hankkeeseen päätetään kiinnittää erillinen Terve talo -koordinaattori, on suositeltavaa, että hänen tehtäviinsä sisältyisivät myös kosteuden- ja puhtaudenhallintakoordinaattorin tehtävät.

Seuraavissa kappaleissa on esitetty voimassa olevien ja uusien korttien eroja rakennushankkeen eri vaiheiden mukaisesti. Tässä yhteydessä on hyvä ottaa huomioon, että nykyään saattaa olla käytössä hankemuotoja, kuten erilaiset yhteistoiminnalliset hankkeet, joihin ei seuraavassa esitetyt hankkeen vaiheet sinällään suoraan sovellu, mutta peruseriaate Terveen talon toteutukselle säilyy kuitenkin samana hankemuodosta riippumatta.

3.1 Hankesuunnittelu

Vanhentuneissa Terveen talo toteutuksen RT-korteissa ohjeistetaan, että hankesuunnitteluvaiheen tärkeimpiä asioita on tavoitteiden määrittely ja päätös siitä, tullaanko hankkeessa noudattamaan Terveen talon toteutuksen kriteereitä ja ohjeita vai ei. Toimistorakennusten RT-kortissa ohjeistetaan, että Terve talo -asioita ei tarvitse yleensä määrittää hankesuunnitteluvaiheessa tarkemmin, koska toimistorakentamisessa ohjeet eivät yleensä aiheuta periaatteellisia muutoksia, vaan niiden avulla varmistetaan asetettujen tavoitteiden saavuttaminen. Asuntorakentamisen Terve talo -ohjekortissa tavoitteet asetetaan asunnoille ja tarvittaessa rakennuksen muille tiloille. Ne ovat:

- Ilman laadun ja lämpöolojen tavoitearvot ovat Sisäilmastoluokitus 2000:n mukaiset. Lähtökohtana asunnoissa on sisäilmastoluokka 2.
- Rakennesuunnittelutehtävän vaativuusluokkaa vastaavan lämpö- ja kosteusteknisen suunnittelun tarve on määritelty.
- Rakennustöiden ja ilmanvaihtojärjestelmän puhtausluokka on P1 tai P2.
- Rakennusmateriaalien päästöluokka on M1 tai M2.
- Rakennuspaikan terveellisyys on varmistettu.

Yllä esitetystä luettelosta havaitaan nykyohjeistukseen verrattaessa esimerkiksi, että rakennustöiden ja ilmanvaihtojärjestelmän puhtausluokkaa P2 ei enää ole. Se poistettiin Sisäilmastoluokituksen 2018 julkaisemisen myötä. Rakennusmateriaalien päästöluokan osalta on uusituissa ohjeissa kirjattu seuraavaa: Rakennusmateriaalien ja kalusteiden päästöluokka M1 tai vastaava M1-luokituksen täyttävä materiaali tai tuote (vastaavuus tulee osoittaa).

Hankesuunnitteluvaiheen tärkeimpiä asioita on tavoitteiden määrittely ottamalla huomioon rakennettavan rakennuksen tyyppi ja koko, rakennuksen tuleva käyttö sekä muuntojoustavuus.

Uusituissa korteissa on esitetty kaikkia rakennustyyppejä koskevat sisäilmaston laatutavoitteet:

- Tilojen lämpöolosuhteet (lämmitys, jäähdytys, vetoisuus)
- Sisäilman laadun tavoitearvot (hiilidioksidipitoisuus, radonpitoisuus, pienhiukkaset (PM_{2,5}))
- Ääniympäristö (ääniolosuhteet, ääneneristävyys, meluntorjunta)
- Valaistusolosuhteet
- Energiatehokkuus (ilmanpitävyys/q₅₀-luku, E-luku yhteistyössä elinkaarisuunnittelijan kanssa)
- Rakennustuotteiden ja -materiaalien vaatimustasot (kemialliset päästöt, akustiset ominaisuudet, siivottavuus, väri jne.)
- Rakennustöiden ja ilmanvaihtojärjestelmän puhtausluokka P1.

Kosteudenhallintaa koskevat tavoitteet tulee nykyvaatimusten mukaisesti kirjata hankkeelle laadittavaan kosteudenhallintaselvitykseen. Puhtaudenhallintaa koskevat tavoitteet ohjaavat hankkeen rakentamisvaiheen pölyn- ja puhtaudenhallintaa. Puhtaudenhallinnan

arviointimenetelmät ja raja-arvot tulee esittää hankkeelle laadittavassa puhtaudenhallinta-asiakirjassa.

Korjaushankkeiden ohjekortissa on korostettu, että on ensiarvoisen tärkeää tietää korjattavan rakennuksen kunto ja korjausmenetelmien valintaan vaikuttavat erityispiirteet mahdollisimman aikaisin. Tärkeänä korjaussuunnittelun lähtötietona toimiikin kohteeseen tehtyjen kosteus- ja sisäilmateknisten kuntotutkimusten perusteella laadittu kuntotutkimusraportti.

3.2 Ehdotus- ja yleissuunnittelu

Ehdotus- ja yleissuunnitteluvaiheessa tehdään lähes lopulliset valinnat arkkitehtuurin, rakenneratkaisujen, teknisten järjestelmien ja rakennuksen tyyppillisten tilojen osalta. Tällöin myös Terve talo -tavoitteet on otettava huomioon vaihtoehtoisten ratkaisujen ja niiden taloudellisten ja ekologisten vaikutusten tarkasteluissa. Tässä vaiheessa tarkennetaan sisäilmaston tavoitteet tilakohtaisiksi tavoitearvoiksi.

Uusitussa korteissa ehdotus- ja yleissuunnitteluvaiheen tehtävien osalta viitataan lähinnä suunnittelualakohtaisiin tehtäviin. Ns. erikseen tilattavat tehtävät (esim. laadunvarmistussuunnitelma) on esitetty määriteltäväksi suunnittelutarjouspyynnöissä ottaen huomioon rakennushankkeen erityispiirteet. Rakennesuunnittelussa on tärkeää määritellä myös rakennusfysikaaliset suunnittelutehtävät hyödyntäen rakennesuunnittelun RAK18 tehtäväluettelon liitettä 10 [13].

Rakenne- tai rakennusfysiikan suunnittelijaa suositellaan tekemään rakennusfysikaaliset riskiarviot/riskianalyysit sekä tarvittaessa rakennusfysikaaliset laskelmat. Rakennusfysikaalisessa suunnittelussa otetaan huomioon myös ennustetun ilmastonmuutoksen vaikutukset rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan. Kosteusriskiluokan 3 (erittäin vaativa) edellyttämät tarkemmat rakennusfysikaaliset tarkastelut tulee tehdä vähintään vuoden 2080 ilmasto- vastaavissa olosuhteissa.

Yleissuunnitteluvaiheessa sisäilmastoon liittyviä tavoitteita suositellaan käsiteltäviksi erillisissä kokouksissa tai niitä voidaan vaihtoehtoisesti käsitellä suunnittelukokousten yhteydessä. Isoissa ja/tai monimuotoisissa hankkeissa suositellaan näiden asioiden käsittelyä erillisissä kokouksissa. Kokousten tavoitteena on varmistaa, että suunnittelutyö etenee Terve talo -tavoitteiden mukaisesti.

Korjaushankkeissa rakennesuunnitteluun ehdotetaan sisällytettäväksi myös purkusuunnitelmien laadinta. Lisäksi ehdotetaan selvitettäväksi, tarvitaanko hankkeessa erillistä kosteusvaurion korjaustyön suunnittelijaa.

Korjaustyön peruseriaatteeksi esitetään, että joko vaurioituneet materiaalit ja muut epäpuhtauslähteet poistetaan tai epäpuhtauksien pääsy sisäilmaan estetään. Rakennesuunnittelijan tai kosteusvaurion korjaustyön suunnittelijan esitetään tekevän rakennusosakohtaisen yhteenvedon käytettävistä korjausvaihtoehdoista käyttökineen ja niihin sisältyvine riskeineen. Yhteenvedossa tulisi lisäksi esittää, että korjaukset kohdistuvat tutkimuksissa havaittuihin ongelmiin ja että ne saadaan poistettua korjausten avulla. Yhteenvedon on tarkoitus toimia jo rakennuslupaa haettaessa dokumenttina siitä, miten vaurioiden aiheuttama haitta tai niiden vaikutus sisäilmaan poistetaan sekä miten korjattu rakenne tai järjestelmä toimii sen suunnitellun käyttöikänsä aikana.

3.3 Toteutussuunnittelu

Vanhentuneissa Terveen talon toteutuksen RT-korteissa käsitellään toteutussuunnittelun tavoitteita sekä urakkaohjelman ja urakkarajaliitteen sisällytettäviä asioita tarkastuslistojen avulla.

Toteutussuunnitteluvaiheen aikana on edelleen varmistettava, että suunnittelussa otetaan huomioon hankkeen Terve talo -tavoitteet ja että kaikissa rakenteissa, detaljeissa ja liittymissä on kiinnitetty erityistä huomiota niiden rakennusfysikaaliseen toimivuuteen, toteutettavuuteen ja vikasietoisuuteen. Aluksi keskitytään suunnitelmien tavoitteiden- ja vaatimustenmukaisuuteen, rakennusosien rakennusfysikaaliseen toimivuuteen, kosteusteknisiin riskeihin ja pintamateriaalien valintaan. Lopuksi paneudutaan rakennusosien liittymädetaljeihin sekä rakennusselostuksen ja työmaan laadunvarmistustoimenpiteiden sisällön ja dokumentoitavan määrittelyyn.

Korjaushankkeissa keskitytään aluksi rakennusosakohtaisten korjausmenetelmien rakennusfysikaaliseen toimivuuteen edellä esitettyjen seikkojen lisäksi. Korjaussuunnitelmissa ehdotetaan esitettäväksi purettavat, korjattavat ja uusittavat rakenteet sekä korjaustyömenetelmät ja korjauksissa käytettävät materiaalit ottaen huomioon uudelleen käytettävien rakennusosien ja materiaalien käyttö ja tähän liittyvä kelpoisuuden arviointi. Suunnitelmissa ehdotetaan kiinnitettäväksi erityistä huomiota eri rakennusosien liittymien yksityiskohtaiseen esittämiseen ottaen huomioon liittymien ilmanpitävyys/ilmatiiviys. Piirustuksissa olisi tärkeää osoittaa selkeästi, mitkä ovat jääviä, alkuperäisiä rakenteita ja materiaaleja ja mitkä ovat uusia rakenteita ja materiaaleja.

3.4 Rakentamisvaihe

Vanhentuneissa Terveen talon toteutuksen RT-korteissa korostetaan rakentamisvaiheen osalta hyvää työmaasuunnittelua sisäilmariskien hallinnassa. Tähän vaikuttavat ratkaisevasti myös vedenpoisto sekä kosteuden- ja pölynhallinta rakennustyön aikana. Tavoitteita käsitellään pääasiassa tarkastuslistojen avulla.

Uudet kortit eivät poikkea rakentamisvaiheen osalta merkittävästi vanhentuneista korteista joitakin tarkennuksia lukuun ottamatta. Yksi tarkennuksista on ympäristöministeriön asetuksen rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta mukanaan tuoma velvoite laatia rakennushankkeen toteutusvaiheelle työmaan kosteudenhallintasuunnitelma. Toinen tarkennus liittyy Sisäilmastoluokitus 2018:ssä esitettyyn muutokseen rakennustöiden puhtaudenhallinnassa, mm. jo aikaisemmin mainittu rakennustöiden puhtausluokan P2 poisjäänti sekä pölynhallintaan liittyvän uuden lainsäädännön huomioon ottaminen.

3.5 Vastaan- ja käyttöönotto

Vanhentuneissa Terveen talon toteutuksen RT-korteissa käytetään vastaanotto- ja käyttövaiheesta termejä viritys ja vastaanotto sekä käyttö ja huoltovaihe. Uusituissa korteissa esitetty ohjeistus ei poikkea merkittävästi vanhentuneiden korttien ohjeistuksesta. Niissä on kuitenkin esitetty joitakin tarkennuksia vastaanotto- ja käyttöönottovaiheelle, joita ovat mm.:

- Käyttäjien muuton ohjeistamisen tarkeys.
- Kiinteistönomistajan huolehtimisvastuu siitä, että rakennus säilyy tavoitteiden mukaisessa kunnossa.
- Rakennuksen tilojen puhtausvaatimukset suositellaan kuvattaviksi, missä voidaan käyttää lähtökohtana INSTA:800-standardissa [14] esitettyä ns. hyvän sisäilman laatutasoa 4.

4. Yhteenveto

Syksyllä 2023 julkaistaan uudistetut Terveen talo -toteutuksen ohjeistuksen RT-kortit. Toinen korteista on kohdistettu uudisrakennushankkeille ja toinen korjaushankkeille. Korteissa kuvataan tavoitteet ja tehtävät Terveen talon toteutukselle hankkeen eri vaiheissa. RT-korttien tueksi julkaistaan rakennushankkeen vaihekohtaiset tehtävät sekä suunnittelualakohtainen tarkastuslista rakennusosittain. Uusitut RT-kortit toimivat erityisesti tilaajan oppaana, mutta ne ovat luonnollisesti myös rakennushankkeen muiden osapuolten hyödynnettävissä.

Ohjekortit on laatinut Rakennustietosäätiö RTS:n toimikunta TK 435 Terveen talon toteutuksen kriteerit Magnus Stagnäsén, Timo Turusen ja Leif Wirtasen käsikirjoituksen pohjalta. Toimikunnan jäsenet ovat: Jorma Säteri (Metropolia Ammattikorkeakoulu (pj.)), Mervi Ahola (Sisäilmayhdistys ry), Lari Eskola (A-Insinöörit Suunnittelu Oy), Kiia Miettunen (Sweco PM Oy), Juha-Ville Mäkinen (LVI-Tekniset Urakoitsijat LVI-TU ry), Tero Niemelä (Skanska), Katja Outinen (Valtioneuvoston kanslia), Tommi Pihlajamäki (Rakennustieto Oy, (siht.)), Topi Rissanen (A-Insinöörit Suunnittelu Oy), Hemmo Sumkin (Sitowise Oy), Juha Takkunen (Sirate Oy), Katja Tähtinen (Rakennustietosäätiö) ja Leif Wirtanen (Ramboll Finland Oy).

Lähdeluettelo

- [1] RT 07-10805. Terveen talon toteutuksen kriteerit. Kriteerit ja ohjeet toimitilarakentamiselle. (2003) Rakennustietosäätiö RTS. Helsinki. 20 s.
- [2] RT 07-10832. Terveen talon toteutuksen kriteerit. Kriteerit ja ohjeet asuntorakentamiselle. (2004) Rakennustietosäätiö RTS. Helsinki. 20 s.
- [3] YMa 782/2017. Ympäristöministeriön asetus rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta. (2017) Annettu Helsingissä 24.11.2017.
- [4] YMa 1009/2017. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta. (2017) Annettu Helsingissä 20.12.2017.
- [5] YMa 1047/2017. Ympäristöministeriön asetus rakennusten vesi- ja viemärlaitteistosta. (2017) Annettu Helsingissä 22.12.2017.
- [6] RT 07-10946. Sisäilmastoluokitus 2008. (2009) Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. Rakennustietosäätiö RTS. Helsinki. 22 s.
- [7] RT 07-11299. Sisäilmastoluokitus 2018. (2018) Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. Rakennustietosäätiö RTS. Helsinki. 24 s.
- [8] RIL 250-2020. Kosteudenhallinta ja homevaurioiden estäminen. (2020) Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry. Helsinki 2020. 332 s.
- [9] Ympäristöministeriön ohje rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta. (2020) 53 s.
- [10] RIL 107-2022. Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet. (2022) Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry. Helsinki 2022. 233 s.
- [11] Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus. (2016) Ympäristöopas 2016. Ympäristöministeriö. Helsinki. 238 s.
- [12] Kosteus- ja mikrobivaurioituneiden rakennusten korjaus. (2019) Ympäristöministeriön julkaisuja 2019:18. Ympäristöministeriö. Helsinki. 199 s.
- [13] RT 103087. Rakennesuunnittelun tehtäväluettelo RAK 18. (2019). Rakennustietosäätiö RTS. Helsinki. 19 s.
- [14] SFS-INSTA 800-1:2019. Siivouksen tekninen laatu. Osa 1: Siivouksen teknisen laadun määrittely- ja arviointijärjestelmä (INSTA 800-1:2018)

Kosteusturvaa ja optimoitua energiansäästöä tilojen ylläpitoon älykkäällä kuivanapitolämmityksellä

Juha Vinha^{1,2}, Teemu Jokela¹, Juhani Heljo² ja Juho Kantanen²

¹ Tampereen yliopisto

² MoistMaster Oy

Tiivistelmä

Älykkäässä kuivanapitolämmityksessä tilan lämpötila ja suhteellinen kosteus pidetään sellaisina, että tiloihin ei synny kosteusvaurioita, joita ovat home- ja mikrobikasvu, kosteuden kondensoituminen ja metallien korroosio. Suhteellisen kosteuden noustessa tilaa lämmitetään tarpeen mukaan, jolloin suhteellinen kosteus saadaan laskemaan turvalliselle tasolle. Turvallinen suhteellisen kosteuden taso vaihtelee lämpötilan mukaan, jolloin tilojen lämmitys voidaan tehdä mahdollisimman pienellä energiankulutuksella.

Tässä artikkelissa kuvataan älykkään kuivanapitolämmityksen periaatetta ja tarkastellaan sen vaikutusta ympäröivien vaipparakenteiden homeutumisiin. Tutkimuksen tulokset osoittavat, että sisätilojen lisäksi älykkäällä kuivanapitolämmityksellä voidaan suojata myös ympäröiviä vaipparakenteita samalla tavalla kuin nykyisin käytössä olevalla peruslämmityksellä, jossa lämpötila pidetään vakiona.

1. Johdanto

Suomessa ja muissa maissa on paljon ajoittain käyttämättömiä tai varastokäytössä olevia tiloja, joita pidetään joko peruslämmössä (eli vakiolämpötilassa) tai täysin lämmittämättöminä. Peruslämmössä olevat tilat kuluttavat tarpeettoman paljon lämmitysenergiaa ja toisaalta täysin lämmittämättömissä tiloissa on riski kosteusvaurioille, joka lisääntyy ilmastonmuutoksen edetessä. Tällaisia tiloja ovat esimerkiksi vapaa-ajanrakennukset, talousrakennukset, varastot, asuntoautot ja -vaunut, ullakot ja kellarit sekä autotallit.

Tiloja voidaan lämmittää myös siten, että lämpöenergian kulutus on vähäinen, mutta tilojen olosuhteet ovat silti kosteusturvalliset. Tätä lämmitystapaa kutsutaan kuivanapitolämmitykseksi. Kun lämpöenergian kulutusta säädetään tiloissa optimoidusti vain tarpeen mukaan, voidaan puhua älykkästä kuivanapitolämmityksestä.

Tutkimus kuivanapitolämmityksestä alkoi Tampereen teknillisessä yliopistossa jo vuonna 2007 ja sen peruseriaatteet julkaistiin ensimmäisen tutkimuksen tuloksena vuonna 2010 [1] ja sen jälkeen myös vertaisarvioituissa konferenssiartikkeleissa 2017 ja 2019 [2] ja [3]. Tutkimuksia jatkettiin laajassa Business Finlandin rahoittamassa tuotekehitysprojektissa 2018–2020. Tutkimuksien pohjalta perustettiin MoistMaster Oy niminen yritys huhtikuussa 2021. Ensimmäinen älykäs tilojen kuivanapitosäädin tuli markkinoille maaliskuussa 2022.

2. Älykkään kuivanapitolämmityksen toimintaperiaate

Liian korkeasta ilman suhteellisesta kosteudesta aiheutuu seuraavia kosteusvaurioita:

- Home- ja mikrobikasvu
- Kosteuden kondensoituminen

- Metallien korrosio, kuten raudan ruostuminen

Korkea suhteellinen kosteus aiheuttaa lisäksi mm. erilaisten kemiallisten yhdisteiden päästöjen lisääntymistä sekä kosteusmuodonmuutoksia.

Näiden lisäksi kosteusvaurioita aiheuttavat erilaiset rakenteissa tapahtuvat kosteusvuodot ja kapillaarinen kosteuden siirtyminen, mutta niitä ei tarkastella tarkemmin tässä yhteydessä.

Korkean ilman suhteellisen kosteuden aiheuttamat kosteusvauriot on mahdollista välttää pitämällä suhteellinen kosteus riittävän alhaisena. Eri vaurioitumisilmiöille on omat suhteellisen kosteuden raja-arvot eri lämpötiloissa, joita ei saa ylittää.

Suhteellista kosteutta voidaan alentaa monella tavalla: lämmittämällä, kuivattamalla ja ilmaa vaihtamalla. MoistMaster -kuivanapitosäädin (kuva 1) alentaa tilan suhteellista kosteutta lämmittämällä. Suhteellisen kosteuden alentaminen tilaa lämmittämällä perustuu siihen, että lämpimämpään ilmaan mahtuu enemmän vesihöyryä, jolloin tilassa oleva vesihöyrypitoisuus muodostaa sinne alemman suhteellisen kosteuden. Tämä säätötapa toimii silloin, jos tilassa ei ole kosteustuottoa.



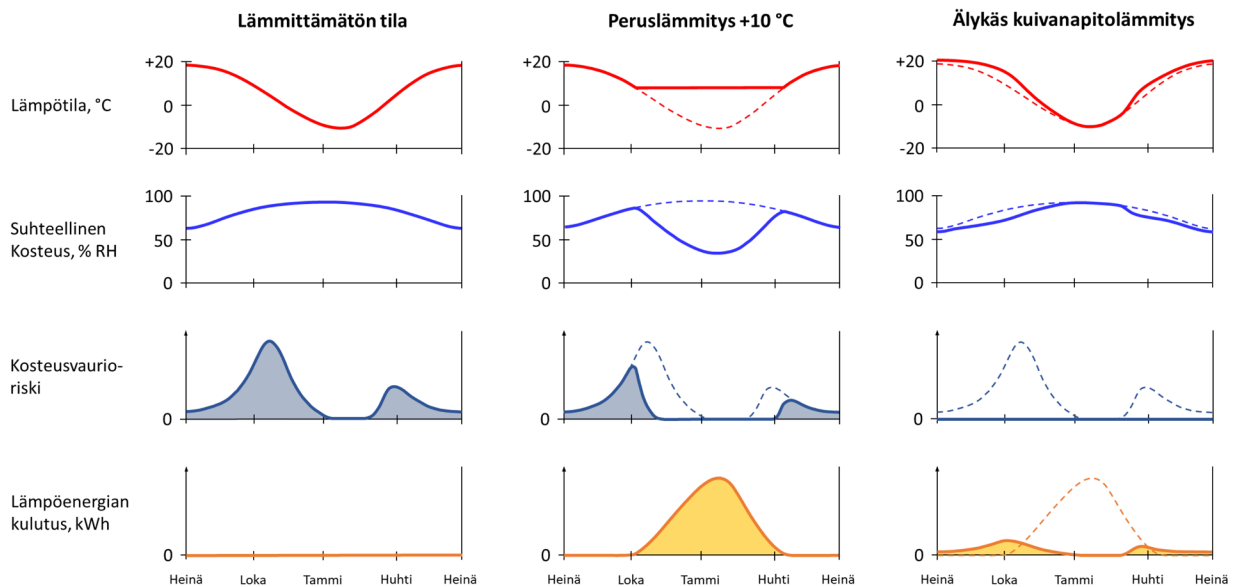
Kuva 1. MoistMaster® E10 LD kuivanapitosäädin. Säädin mittaa tilan lämpötilaa ja suhteellista kosteutta ja kytkee siihen liitettyyn lämmityslaitteeseen virran, kun suhteellinen kosteus ylittää sallitun raja-arvon. [4]

Suhteellisen kosteuden alentaminen pelkästään ilmaa vaihtamalla ei varmista tilassa kosteusturvallisia olosuhteita, koska ilmanvaihdon mukana ulkoa tulevassa ilmassa vesihöyrypitoisuus voi olla ajoittain niin korkea, että se synnyttää tilaan kosteusvaurioriskin. Ilmanvaihto voidaan kuitenkin tarvittaessa yhdistää tilan kuivanpitolämmitykseen, jolloin sitä voidaan käyttää sellaisissakin tiloissa, joissa on ajoittain kosteustuottoa. Tällaisia tiloja ovat esimerkiksi autotallit, joihin tuodaan välillä märkiä ja lumisia ajoneuvoja.

Kuivatuksen haasteena on, että kuivaimen vesisäiliöön kertyvä vesi täytyy välillä poistaa. Tällöin tilassa täytyy käydä säännöllisesti, ellei vettä ole johdettu esimerkiksi letkulla viemäriin. Suhteellisen kosteuden alentaminen lämmittämällä ei sen sijaan vaadi näitä käyntejä.

2.1 Tilan olosuhteet eri lämmitystavoilla

Kuvassa 2 on esitetty tarkasteltavan tilan olosuhteet, kosteusvaurioriski ja energiankulutus eri tilanteissa. Kuvan vasemmassa reunassa on esitetty lämmittämätön tila, keskellä peruslämmitetty tila ja oikealla älykkäästi kuivanapitolämmitetty tila.



Kuva 2. Periaatekuva olosuhteiden vaihtelusta, kosteusvaurioriskistä ja lämpöenergian kulutuksesta lämmittämättömässä tilassa, peruslämmitettyssä tilassa (+10 °C) ja älykkäästi kuivanapitolämmitettyssä tilassa vuoden ajanjaksolla.

Kuvasta 2 nähdään, että lämmittämättömässä tilassa lämpötila ja suhteellinen kosteus muuttuvat ulkoilman olosuhteiden mukaisesti. Olosuhteiden muutos tapahtuu sisätilassa viiveellä, johon vaikuttavat mm. tilan ilmanvaihto, lämmöneristys ja pintamateriaalien kosteuskapasiteetti. Tällaisissa tiloissa esiintyy ajoittain kosteusvaurioriskin (home- ja mikrobikasvu, kosteuden kondensoituminen ja metallien korroosio) aiheuttavia olosuhteita varsinkin loppukesästä ja syksyllä, mutta myös keväällä. Ilmastonmuutoksen edetessä nämä riskit lisääntyvät. Tässä tapauksessa tilan lämmitykseen ei kulu kuitenkaan energiaa.

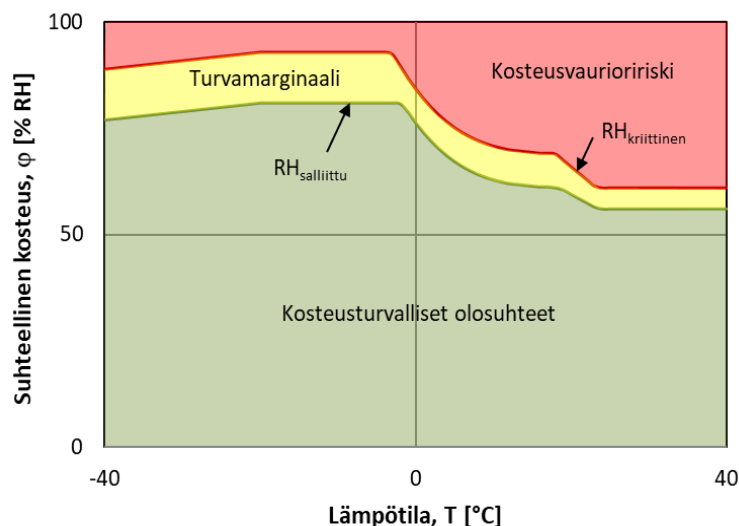
Peruslämmitettyssä tilassa lämpötila pidetään talvikauden ajan koko ajan valitussa lämpötilassa. Kuvan 2 esimerkkiin lämpötilaksi on valittu +10 °C. Talvikaudella suhteellinen kosteus laskee tällaisessa tilassa oleellisesti ulkoilmaa alhaisemmaksi. Sen sijaan loppukesästä ja alkusyksystä sekä myös loppukevällä voi esiintyä kosteusvaurioriskin aiheuttavia olosuhteita, koska tilan sisälämpötila on säädettyä peruslämpötilaa korkeampi, mutta suhteellinen kosteus on kuitenkin korkea. Peruslämmitystä käytettäessä talvella kuluu paljon lämpöenergiaa, joka on suurelta osin tarpeetonta, koska home- ja mikrobikasvua ei tapahdu pakkasolosuhteissa ja raudan ruostuminenkin on silloin vähäistä.

Älykkäässä kuivanapitolämmityksessä tilaa lämmitetään ainoastaan silloin, kun se on tarpeellista. Lämmitysjaksot sijoittuvat siten tyypillisesti loppukesään, syksyyn ja keväälle. Kuivanapitolämmityksessä riittää, että tilan lämpötilaa nostetaan näinä ajanjaksoina tyypillisesti

muutaman asteen verran ulkolämpötilaa korkeammaksi. Pakkasolosuhteissa, jolloin ei esiinny yleensä kosteusvaurioriskiä, tilaa ei ole tarvetta lämmittää lainkaan. Näin ollen tilan lämmittäminen kuluttaa energiaa lähinnä syys- ja kevätkaudella. Älykkäässä kuivanapitolämmityksessä energiankulutus on tyypillisesti n. 5–20 % peruslämmityksen energiankulutuksesta [5]. Jos tilassa on kuitenkin pidettävä lämpötila yli 0 °C esimerkiksi vesikalusteiden vuoksi tai muuten nesteiden jäätyneen ehkäisemiseksi, ei energiansäästöä ole saavutettavissa, jos peruslämmössä käytetään samaa vakiolämpötilaa.

2.2 Älykkään kuivanapitolämmityksen säätötavat

Kriittinen suhteellisen kosteuden arvo ($RH_{\text{kriittinen}}$), jonka yläpuolella syntyy kosteusvaurioriski, muuttuu lämpötilan funktiona (kuva 3). Tästä syystä MoistMaster kuivanapitosäätimessä myös suhteellisen kosteuden sallittu yläraja-arvo (RH_{sallittu}) muuttuu lämpötilan funktiona, jolloin lämmitysenergian kulutus voidaan optimoida mahdollisimman pieneksi. Kosteusvaurioriskin aiheuttavan suhteellisen kosteuden ja sallitun suhteellisen kosteuden välillä käytetään turvamarginaalia, joka voi myös muuttua lämpötilan muuttuessa. Tämä säätötapa on myös patentoitu Suomessa [6].



Kuva 3. Periaatekuva kriittisen suhteellisen kosteuden ja sallitun suhteellisen kosteuden vaihtelusta eri lämpötiloissa. MoistMaster kuivanapitosäätimessä näiden arvojen väliin jätetään turvamarginaali, joka voi myös vaihdella lämpötilan funktiona.

Säätötapoina on käytetty ns. *optimiturvasäätöä*, joka ehkäisee tiloissa home- ja mikrobikasvun sekä kosteuden kondensoitumisen. Toisena säätövaihtoehtona on käytetty ns. *lisäturvasäätöä*, joka ehkäisee myös metallien korroosiota, kuten raudan ruostumisen. Tässä säätötavassa suhteellisen kosteuden sallitut raja-arvot ovat jonkin verran alhaisemmat kuin optimiturvasäädössä.

3. Kuivanapitolämmityksen vaikutus ympäröiviin rakenteisiin

Tampereen yliopistossa on tarkasteltu myös MoistMasterin käyttämien säätötapojen (optimiturva ja lisäturva) vaikutusta sisätilaa ympäröivien rakenteiden kosteustekniseen toimintaan. Tarkasteluja on tehty laskennallisesti sekä nykyisissä että tulevaisuuden ilmasto-olosuhteissa. Tuloksia on verrattu myös +10 °C ja +15 °C peruslämmityksen vaikutukseen rakenteiden toiminnassa. Tarkasteluissa on käytetty Suomalaista homemallia [7–9] ja määritetty homeindeksin maksimi-arvo puurunkorakenteisissa ulkoseinissä tuulensuojan sisäpinnassa sekä

tuulettetuissa yläpohjarakenteissa kattoristikon yläpaarteissa erilaisilla lämmöneristyspaksuuksilla vuoden ajanjaksolla. Tarkastelut on tehty rakennusfysikaalisen mitoitusvuoden Jokioinen 2050 ja Jokioinen 2100 olosuhteissa. Viime vuosien ulkoilman olosuhdemittauksissa on havaittu, että kosteusrasitetuimmat nykyilmaston vuodet vastaavat jo Jokioisten 2050 olosuhteita.

Laskentatarkasteluissa sama mitoitusvuosi laskettiin kaksi kertaa peräkkäin, joista viimeiseltä vuodelta laskettiin homeindeksin maksimi-arvo tammikuun alusta joulukuun loppuun.

Laskentatuloksia tarkasteltaessa on todettu, että homeindeksi on saavuttanut maksimi-arvonsa ennen joulukuun loppua. Laskentatarkasteluissa on käytetty Delphin 5.9 ohjelmaa.

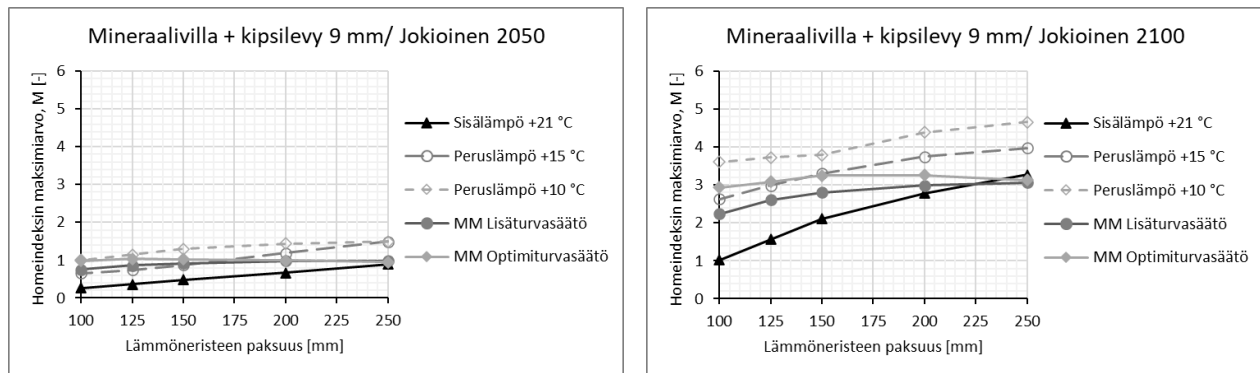
3.1 Ulkoseinärakenteiden tarkastelut

Ulkoseinärakenteissa käytetty rakennetyyppi on seuraava ulkoa sisälle päin:

- puuverhous 23 mm
- tuuletusväli 25 mm, puukoolaus 50×25 mm
- tuulensuojalevy (kipsilevy 9 mm/ huok. kuitulevy 12 mm/ 25 mm/ min.villalevy 25 mm)
- lämmöneriste 100–250 mm (mineraalivilla), jossa puurunko k600
- höyrynsulkumuovi 0,2 mm
- kipsilevy 13 mm

Viistosateen imeytyminen puuverhoukseen on jätetty tarkasteluissa pois, koska Tampereen yliopiston koerakennuksilla tehdyissä viimeaikaisissa tutkimuksissa [10] on todettu sen parantavan laskentatulosten tarkkuutta verrattaessa niitä ulkoseinärakenteista mitattuihin tuloksiin. Mineraalivillan lämmönjohtavuutena on käytetty laskelmissa arvoa 0,035 W/(mK).

Kuvassa 4 on esitetty homeindeksin maksimi-arvot 9 mm kipsilevyn sisäpinnassa eri lämmöneristyspaksuuksilla Jokioisten 2050 ja 2100 olosuhteissa. Kipsilevyn homehtumisherkkyysluokka on ollut tarkasteluissa HHL1.

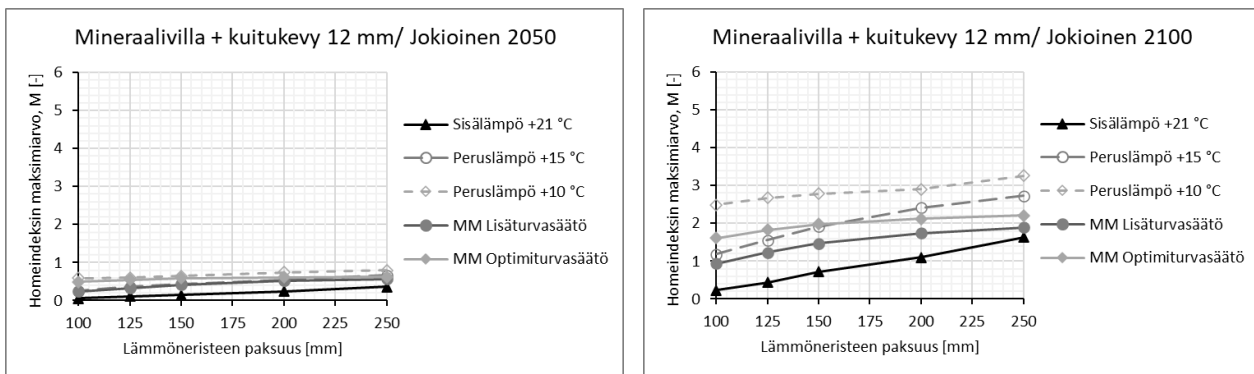


Kuva 4. Homeindeksin maksimi-arvot tuulensuojalevyn sisäpinnassa puuverhotussa puurunkoisessa ulkoseinärakenteessa, jossa lämmöneristeenä on käytetty mineraalivillaa ja tuulensuojana 9 mm kipsilevyä.

Kuvasta 4 havaitaan, että nykyilmastoa vastaavassa Jokioisten 2050 ilmastossa kipsilevyn sisäpinnassa homeindeksin maksimi-arvo on hyväksyttävän raja-arvon > 1 (ei homekasvua) tuntumassa tai alapuolella, jos sisällä on normaali huonelämpötila tai jos käyttämättömän tilan lämmittämiseen käytetään MoistMaster optimiturvaa tai lisäturvaa. Sen sijaan $+10\text{ °C}$ ja $+15\text{ °C}$ peruslämmitystä käytettäessä homeindeksin maksimi-arvo nousee selvemmin tämän arvon yläpuolelle suuremmilla lämmöneristyspaksuuksilla.

Tarkasteltaessa rakenteen toimintaa Jokioisten 2100 olosuhteissa tuulensuojakipsilevyn sisäpinnassa esiintyy homeenkasvua kaikissa tarkastelluissa tapauksissa lukuun ottamatta 100 mm lämmöneristeellä tehtyä ulkoseinää normaalissa sisälämpötilassa. MoistMaster optimiturvaa käytettäessä homeindeksin maksimi-arvot jäävät alemmiksi kuin +10 °C peruslämmitystä käytettäessä ja vastaavasti MoistMaster lisäturvaa käytettäessä alemmiksi kuin +15 °C peruslämmitystä käytettäessä. Yleisesti ottaen voidaan todeta, että 9 mm kipsilevy on riskialtis tuulensuojaratkaisu vuosisadan loppupuolen kosteusrasituksissa, joka on todettu jo monissa muissakin tutkimuksissa [11].

Kuvassa 5 on esitetty homeindeksin maksimi-arvot 12 mm huokoisen kuitulevyn sisäpinnassa eri lämmöneristyspaksuuksilla Jokioisten 2050 ja 2100 olosuhteissa. Huokoisen kuitulevyn homehtumisherkkyysluokka on ollut tarkasteluissa HHL1.



Kuva 5. Homeindeksin maksimi-arvot tuulensuojalevyn sisäpinnassa puuverhotussa puurunkoisessa ulkoseinärakenteessa, jossa lämmöneristeinä on käytetty mineraalivillaa ja tuulensuojana 12 mm huokoista kuitulevyä.

Kuvasta 5 nähdään, että nykyilmastoa vastaavissa Jokioisten 2050 olosuhteissa homeindeksin maksimi-arvot jäävät vielä alle hyväksyttävän raja-arvon > 1 kaikissa tarkasteluvaihtoehdoissa. Jokioisten 2100 olosuhteissa homeindeksin maksimi-arvot ovat yleisesti ottaen yli hyväksytyn raja-arvon lukuun ottamatta ohuemmilla lämmöneristyspaksuuksilla toteutettuja ulkoseinärakenteita normaalissa sisälämpötilassa. Tässäkin tapauksessa MoistMaster optimiturväsäädöllä homeindeksin maksimi-arvot jäävät selvästi alemmiksi kuin +10 °C peruslämmityksellä ja vastaavasti MoistMaster lisäturväsäädöllä alemmiksi kuin +15 °C peruslämmityksellä. Myöskään 12 mm huokoinen kuitulevy ei ole riittävän hyvin lämpöä eristävä tuulensuojamateriaali vuosisadan loppupuolen ilmasto-olosuhteissa.

Laskentatarkasteluja tehtiin myös 25 mm huokoisella kuitulevyllä ja 25 mm mineraalivillatuulensuojalla. Näissä tapauksissa homeindeksin maksimi-arvot pysyivät kaikissa laskentavaihtoehdoissa alle 1 myös Jokioisten 2100 ilmastossa, joten nämä tuulensuojat ovat hyväksyttäviä vaihtoehtoja, kuten todetaan myös uudessa RIL 107 kirjassa [12].

3.2 Yläpohjarakenteen tarkastelut

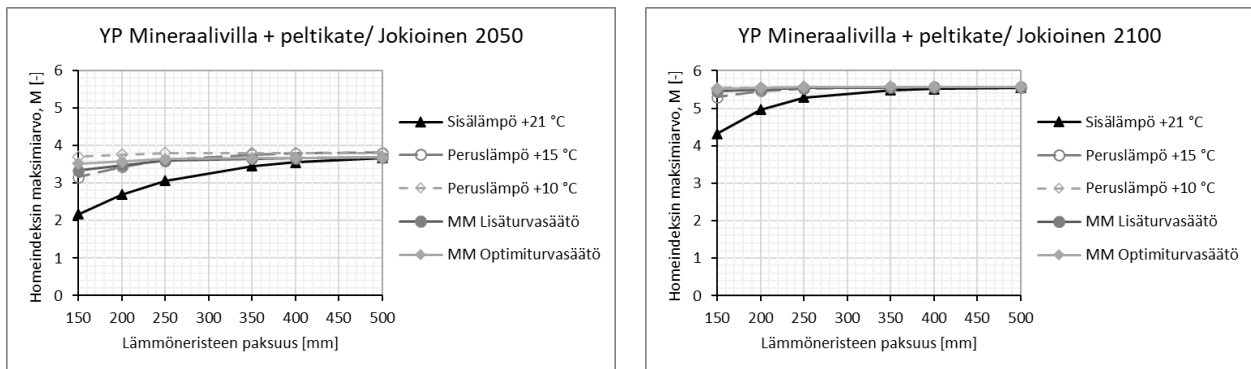
Yläpohjarakenteen rakennetyyppi on seuraava ulkoa sisälle päin:

- peltikate 0,6 mm
- tuuletustila 50 mm
- aluskate 1 mm
- tuuletusväli 1000 mm, jossa kattoristikot k900 ja yläpaarre 50×150 mm
- lämmöneriste 150–500 mm (mineraalivilla), jossa kattoristikon alapaarre 50×120 mm

- höyrynsulkumuovi 0,2 mm
- kipsilevy 13 mm

Ilmanvaihtuvuus tuuletusvälissä oli 2,0 l/h. Mineraalivillan lämmönjohtavuutena on käytetty laskelmissa arvoa 0,035 W/(mK).

Kuvassa 6 on esitetty homeindeksin maksimi-arvot kattoristikon yläpaarten sisänurkassa eri lämmöneristyspaksuuksilla Jokioisten 2050 ja 2100 olosuhteissa. Kattoristikon homehtumisherkkyysluokka on ollut tarkasteluissa HHL1.



Kuva 6. Homeindeksin maksimi-arvot kattoristikon yläpaarten sisänurkassa puurakenteisessa tuuletetussa yläpohjassa, jossa lämmöneristeenä on käytetty mineraalivillaa.

Kuvasta 6 voidaan todeta, että tarkasteluihin valitun tuuletetun yläpohjan tuuletustilassa on homeen kasvulle otolliset olosuhteet jo nykyistä ilmastoa vastaavissa Jokioisten 2050 olosuhteissa riippumatta valitusta lämmöneristepaksuudesta tai sisätilan lämpötilasta. Tämä on ymmärrettävää, koska sisältä pääsee siirtymään vähemmän lämpöä yläpohjaan ja toisaalta ilmanvaihtokerroin on niin suuri, että tuuletustilan olosuhteet ovat lähellä ulkoilman olosuhteita. Homehtumisriski kasvaa entisestään siirryttäessä Jokioisten 2100 ilmastoon. Näissä olosuhteissa homeindeksin maksimi-arvot indikoivat erittäin voimakasta home- ja mikrobikasvua kattoristikoidessa. Tuuletetun yläpohjan tapauksessa MoistMaster optimisäätö ja lisäturvasäätö eivät eroa merkittävästi +10 °C ja +15 °C peruslämmityksestä homehtumisriskin osalta.

Homeindeksin hyväksyttävänä raja-arvona käytetään myös puurunkoisessa tuuletetussa yläpohjassa arvoa < 1 [13], mikä tarkoittaa sitä, että niissä tarvitaan selkeitä rakenteellisia muutoksia, jotta tavoitteeseen voidaan päästä myös vuosisadan loppupuolen ilmasto-olosuhteissa. Tuuletustilan olosuhteita voidaan merkittävästi parantaa mm. pienentämällä sen ilmanvaihtokerrointa (suositeltava arvo 0,5–1,0 l/h), käyttämällä lämmöneristeenä hygroskooppista materiaalia ja lisäämällä vesikatteen alle lämpöä eristävä aluskate [14]. Myös kattoristikoiden päälle laitettava umpilaudoitus sekä kosteutta kestävämpään höylätyn kuusen käyttö puuosissa parantavat puurakenteiden kosteusteknistä toimintaa.

4. Yhteenveto

Älykkäällä kuivanpitolämmityksellä voidaan ylläpitää tiloissa kosteusturvallisia olosuhteita oleellisesti pienemmällä energiankulutuksella verrattuna nykyisin yleisesti käytettävään peruslämmitykseen. Älykäs kuivanpitolämmitys lämmittää tiloja ainoastaan tarpeen mukaan lähinnä syksyllä ja keväällä. MoistMasterin kuivanpitosäätimessä suhteellisen kosteuden sallittu yläraja-arvo muuttuu lämpötilan funktiona, jolloin lämpöenergian kulutusta saadaan entisestään vähennettyä.

Älykäs kuivanapitolämmitys suojaa myös tilaa ympäröiviä vaipparakenteita yhtä hyvin tai paremmin kuin peruslämmitys. MoistMasterin käyttämä optimiturvasäätö suojaa ympäröiviä vaipparakenteita yhtä hyvin tai paremmin kuin +10 °C peruslämmitys ja lisäturvasäätö yhtä hyvin tai paremmin kuin +15 °C peruslämmitys.

Ilmastonmuutoksen edetessä kosteusvaurioriski lisääntyy erityisesti sellaisissa puurunkoisissa ulkoseinä rakenteissa, joissa on käytetty ohuita tuulensuojia ja paksumpia lämmöneristeitä. Näissä rakenteissa voi esiintyä mikrobikasvua tuulensuojan sisäpinnassa riippumatta siitä, millaista sisäilman lämpötilaa rakennuksissa pidetään.

Puurunkoisissa tuuletetuissa yläpohjissa ilmastonmuutos muuttaa tuuletustilan olosuhteet erittäin suotuisiksi home- ja mikrobikasvulle. Yläpohjissa tarvitaan merkittäviä rakenteellisia muutoksia, jotta niissä voidaan välttyä mikrobikasvulta tulevaisuudessa.

Lähdeluettelo

- [1] Piironen, J. ja Vinha, J. 2010. Vakiotehoisen kuivanapitolämmityksen vaikutus hirsimökkien lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan. Tutkimusraportti 150. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos 79 s. + 16 liites.
- [2] Piironen, J., Vinha, J. ja Kiviste, M. 2017. Modelling hygrothermal performance of roof and floor structures with an energy efficient constant output heating. The 11th Nordic Symposium on Building Physics, NSB 2017, Trondheim, Norway, June 11–14. Energy Procedia, Vol. 132, pp. 694-699.
- [3] Vinha, J., Piironen, J. ja Kiviste, M. 2019. Impacts of energy efficient constant output heating on the moisture conditions of unoccupied summer cottages in Finland. The 9th International Cold Climate Conference – Sustainable new and renovated buildings in cold climates, Cold Climate HVAC 2018, Kiruna, Sweden, March 12–15, 2018. Springer Proceedings in Energy, e-published 12 December 2018, pp. 79-86.
- [4] MoistMaster Oy:n kotisivut: www.moistmaster.fi, viitattu 3.10.2023.
- [5] MoistMaster Oy:n sähköenergian kulutuksen laskuri: www.moistmaster.fi/energielaskuri, viitattu 3.10.2023.
- [6] FI 129390 B. Apparatus, method and computer program product for controlling indoor conditions. Finnish patent and registration office, 31.1.2022, 29 p. + 4 app.
- [7] Viitanen, H., Vinha, J., Salminen, K., Ojanen, T., Peuhkuri R., Paajanen, L. & Lähdesmäki, K. 2010. Moisture and biodeterioration risk of building materials and structures. Journal of Building Physics, e-published 21 August 2009, Vol. 33 (3), pp. 201-224.
- [8] Ojanen, T., Viitanen, H., Peuhkuri, R., Lähdesmäki, K., Vinha, J. & Salminen, K. 2010. Mould growth modeling of building structures using sensitivity classes of materials. Proceedings of Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XI International Conference, Buildings XI, Clearwater Beach, Florida, USA, December 5–9. Session II-B, 10 p.
- [9] Suomalainen homemalli: <https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/suomalainen-homemalli>
- [10] Vinha, J., Tuominen, E., Valovirta I., Hietikko, J., Tuurala I., Huttunen, P., Jokela, T., Forss, A., Saari, A., Joensuu, T., Malaska, M., Alanen, M., Salkinoja-Salonen, M., Vaali, K. ja Brander J. 2023. Kosteusturvalliset ja ympäristöystävälliset kutterinlastueristeiset puurakenteet. ECOSAFE ja ECOSAFE 2-hankkeiden loppuraportti, Tutkimusraportti 5, Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka. *Julkaistaan vuonna 2023*.
- [11] Jokela, T. 2018. Kipsilevytuulensuojallisten puurunkoisten ulkoseinien rakennusfysikaalinen toiminta. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikka. 113 s + 29 liites.
- [12] RIL 107-2022. Rakennusten veden ja kosteudeneristysohjeet. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL, 233 s.
- [13] RIL 250-2020. Kosteus- ja homevaurioiden ehkäiseminen. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL, 332 p.
- [14] Laukkarinen, A. 2015. Tuulettuvien yläpohjien lämpö- ja kosteustekninen toiminta nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikka. 82 s. + 25 liites.

Ilmastonmuutokseen varautuminen ja vikasietoiset rakenteet uuden RIL 107-2022:n kantavina teemoina

Pekka Talaskivi¹, Pekka Laamanen², Ismo Heimonen³, Tommi Mutanen⁴, Lasse Rajala⁵, Antti Souto⁶, Timo Turunen⁷ ja Juha Vinha⁸

¹ RIL ry

² AFRY Buildings Finland Oy, Rakennusfysiikka

³ Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

⁴ Sweco Finland Oy

⁵ Katepal Oy ja Kattoliitto ry

⁶ A-Insinöörit Suunnittelu Oy

⁷ Ramboll Finland Oy

⁸ Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka

Tiivistelmä

Uudistettu RIL 107 Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet on ilmestynyt. Julkaisu on kattavin ja arvostetuin koko rakennuksen rakennusfysiikan suunnittelua ohjaava käytännön ohje Suomessa. Ohje korvaa ohjeen RIL 107-2012 ja sen käyttöönottoa suositellaan välittömästi alkavissa uudisrakennus- ja korjaushankkeissa.

Uudessa RIL 107 kirjassa pyritään ohjeistamaan rakenteiden suunnittelua ja toteutusta kohti vikasietoisempia ratkaisuja, jotka ottavat huomioon myös ilmastonmuutoksen vaikutukset. Suunnittelussa tulee pyrkiä yksinkertaisiin ja toimintavarmoihin rakenneratkaisuihin. Rakennukset on suunniteltava myös pitkäikäisiksi, korjattaviksi, muunneltaviksi ja purettaviksi vähähiilisyiden ja kestävien elinkaariominaisuuksien vaatimuksista.

Ohjeen päivityksestä on vastannut RILin kokoama rakennusalaan monipuolisesti tunteva asiantuntijaryhmä. Laajalta valtakunnalliselta lausuntokierrokselta saadut kommentit antoivat arvokasta palautetietoa ohjeen viimeistelyä varten.

1. Johdanto

RIL ry:n ohje ilmestyi ensimmäisen kerran vuonna 1976. Ohje on tämän jälkeen uudistettu vuosina 1981, 1989, 2000 ja 2012 eli vuoden 2022 päivitys on järjestyksessään jo kuudes.

Ennen RIL 107 -ohjetta on ollut käytössä Rakennusinsinööriyhdistyksen julkaisu A10 *Talonrakennuksen kosteus- ja vesieristystöiden normaalimääräykset* vuodelta 1948 ja se käsitti 14 sivua. RIL 107 vuodelta 1976 oli laajuudeltaan jo merkittävästi laajempi: 73 sivua. Julkaisu pysyi lähes samassa sivumäärässä päivityksissä 1981 ja 1989. Näissä ensimmäisissä julkaisuissa sisällön päähuomio kohdistui vesikattoihin. RIL 107-2000 sisälsi edeltäjiinsä nähden merkittäviä uudistuksia. Sivumäärä kasvoi 211 sivuun ja vesikattojen ohella myös muut rakennusosat ja kosteusrasitetut tilat saivat aikaisempaa selvästi enemmän sisältöä. Kirja täydentyi sisällöllisesti edelleen julkaisussa RIL 107-2012, jossa sivujen koko kasvoi ja sivumääräksi tuli 219 sivua. Nyt valmistunut uusi ohje on laajuudeltaan 233 sivua.

Nykyisin RIL 107 on kattavin ja arvostetuin koko rakennuksen rakennusfysiikan suunnittelua ohjaava käytännön ohje Suomessa.

RIL 107 sisältää käytännön teknisiä ohjeita ja ratkaisuja rakennusten kosteustekniseen suunnitteluun, toteutukseen, ylläpitoon ja korjaukseen tavoitteena kosteusteknisesti varmatoimiset ja terveelliset rakennukset.

Ohje muodostaa yhdessä RILin muiden julkaisujen kanssa kattavan tietopaketin kosteuden ja rakennusfysikaalisten ilmiöiden hallintaan:

- *RIL 255 Rakennusfysiikan käsikirja*
käsittelee rakennusten rakennusfysikaalista suunnittelua ja tutkimuksia.
- *RIL 250 Kosteudenhallinta ja homevaurioiden estäminen*
käsittelee erityisesti rakennushankkeen kosteudenhallintaprosessia eri osapuolten kannalta sekä keskeisiä rakennuksen ja rakenteiden toteutusperiaatteita mikrobivaurioiden estämiseksi.
- *RIL 107 Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet*
sisältää eri rakennusosien kosteusteknisiä ohjeita ja ratkaisuja.
- *RIL 126 Rakennuspohjan ja tonttialueen kuivatus*
käsittelee tonttialueen sekä alapohjan ja perustusten kuivatusta.

2. Hyvällä suunnittelulla vähennetään toteutuksen riskejä

Viime vuosina rakennuksen terveellisyyteen ja rakenteiden kosteustekniseen toimintaan liittyvät haasteet ovat monimutkaistuneet. Aikaisempia ennusteita nopeammin etenevä ilmastonmuutos, matalaenergiarakentaminen ja huonetilojen kasvavan lämpökuormituksen myötä yleistyvät jäähdytysratkaisut ovat esimerkkejä erityisesti vaipparakenteiden kosteusteknisiä olosuhteita ratkaisevasti muuttavista tekijöistä. Vaikka ilmastonmuutosta pyritäänkin hillitsemään erilaisin aktiivisin toimin, rakentamisessa on varauduttava kasvaviin säärasituksiin. Muuttuvan ilmaston myötä moni aikaisemmin hyvää rakentamistapaa edustanut rakenneratkaisu voi jälkikäteen osoittautua kosteusfysiikan näkökulmasta riskirakenteeksi.

Vähähiilisyys ja rakennusten elinkaariominaisuuksien edistäminen ovat myös keskeisiä vihreään siirtymään liittyviä tavoitteita, ja ne ovat olleet ohjenuorana myös uuden rakentamislain valmistelussa. Vähähiilisyys tarkoittaa hyvän energiatehokkuuden ohella sitä, että uudisrakentamisen hiilijalanjälki minimoidaan mm. kestäväillä materiaalivalinnoilla ja mahdollistamalla entistä paremmin uudelleenkäyttö- ja kierrätystuotteiden hyödyntäminen. Elinkaariominaisuuksien edistäminen taas tarkoittaa sitä, että lainsäädännössä annettujen määräysten ja ohjeiden noudattamisen ohella rakennukset on suunniteltava pitkäikäisiksi, muunneltaviksi, korjattaviksi ja purettaviksi.

Rakennusten laadukas suunnittelu, toteutus, huolto ja käyttö edellyttää osaavia työntekijöitä. Rakennusalan ongelma on krooninen osaajapula, joka koskee sekä toisen asteen ammattitaitoista työvoimaa että korkea-asteen asiantuntijoita. Työvoiman tarve kasvaa edelleen tulevaisuudessa ja jo nyt 90 % yrityksistä pitää työtehtävissä vaadittua ammattiosaamista omaavien henkilöiden löytämistä haastavampana, kuin tarvittavan työvoiman löytämistä ylipäänsä [1]. Työvoimapulan takia esimerkiksi talonrakennusalalla yli viidennes työmaiden henkilövahvuudesta on ulkomaalaisia. Työvoiman heikon saatavuuden ja osaamiseen liittyvien puutteiden ohella erilaisten työkuultuurien yhteensovittaminen voi tuoda muassaan laatuhaasteita.

Suunnitteluun on panostettava entistä enemmän niin uudisrakentamisessa kuin nykyisen rakennuskannan uudistamisessa seuraavista syistä:

- Kasvavat ilmatorasitukset ovat tosiasia ja niihin on pakko varautua
- Kosteustekninen toimivuus on keskeinen osa kestävästä rakentamisesta

- Rakennusten vähähiilisyys- ja pitkäikäisyysvaatimuksiin on pakko reagoida
- Työmaatoteutuksen virheettömyyttä ei voida pitää oletuksena

Ympäristöministeriön asetus rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta (782/2017) [2], jota kutsutaan yleisesti nimellä kosteusasetus, tuli voimaan 1.1.2018. Asetukseen liittyen on julkaistu vuonna 2020 ympäristöministeriön ohje rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta [3], jossa taustoitetaan sekä selostetaan pykäläkohtaisesti asetuksen sisältöä. Kosteusasetuksen ohjeen punaisena lankana on pyrkimys rakenteiden vikasietoisuuteen ja samaa periaatetta on noudatettu RIL 107 päivitystä tehtäessä.

Vikasietoisuudella tarkoitetaan ratkaisuja, joissa suunnittelussa, rakentamisessa, rakennusten huollossa ja käytössä ilmenevät vähäisimmät virheet ja puutteet eivät vielä johda rakenteiden haitalliseen vaurioitumiseen. Vikasietoiset rakenteet mahdollistavat siten tiettyyn rajaan asti myös osaamattomuutta ja inhimillisiä virheitä suunnittelussa, rakentamisessa sekä rakennusten huollossa ja käytössä. Varmatoimiset ja vikasietoiset rakenteet ovat tie parempaan sisäilman laatuun ja matalampiin elinkaarikustannuksiin.

Julkaisua päivitettäessä työryhmä on pyrkinyt esittämään sellaisia ohjeita ja suosituksia, jotka edistävät kosteusteknisesti entistä varmatoimisempaa ja vikasietoisempaa rakentamista.

Ohjeessa on korostettu myös muuttuvan ilmaston myötä esiintyvien sääilmiöiden huomioimista riittävän yksityiskohtaisella suunnittelulla sekä suunnitteluvaiheessa määriteltävien ja toteutusvaiheessa tehtävien mallitöiden, työvaihetarkastusten sekä laadunvarmistuksen merkitystä.

3. Tuulensuojalle asetetut vaatimukset ja suositukset

Yhtenä esimerkkinä vikasietoisemmista rakenteista, joissa otetaan huomioon myös ilmastonmuutoksen vaikutukset, on puurunkoisten rakenteiden tuulensuojille annetut aiempaa yksityiskohtaisemmat vaatimukset ja suositukset.

Tutkimuksissa on havaittu, että puurunkoisten rakenteiden ulkopintaan tarvitaan ilmastonmuutoksen edetessä aiempaa kosteutta kestävämpiä ja lämpöä eristävämpiä tuulensuojia [4].

Kosteudenkestävyyden huomioon ottamiseksi tuulensuojille on määritetty Suomalaisen homemallin [5] mukaiset vaadittavat homehtumisherkkyysluokat eri käyttökohteissa. Nämä homehtumisherkkyysluokat ovat seuraavat:

- HHL1 Hyvin herkkä
- HHL2 Herkkä
- HHL3 Kohtalaisen kestävä
- HHL4 Kestävä

Eri rakennusmateriaalien homehtumisherkkyysluokat on esitetty mm. RIL 250-2020:ssa [6] tämän jaottelun mukaisesti. Niiden listaa päivitetään Tampereen yliopiston Rakennusfysiikan ryhmän kotisivuilla [7].

Tuulensuojan homehtumisherkkyysluokan on oltava HHL2 tai kestävämpi yläpohjissa ja alapohjissa sekä HHL1 tai kestävämpi ulkoseinissä. Tiiliverhotuissa ulkoseinissä tuulensuojan homehtumisherkkyysluokan on oltava HHL2 tai kestävämpi.

Suosittelava homeutumisherkkyyssluokka ryömintätalaisissa alapohjissa on HHL3 tai kestävämpi, puuverhotuissa ulkoseinissä HHL2 tai kestävämpi ja tiiliverhoilluissa ulkoseinissä HHL3 tai kestävämpi.

Ohuita heikosti lämpöä eristäviä tuulensuojia (kalvoja tai levyjä) voidaan käyttää yksinään rakenteen tuulensuojana, jos niiden homeutumisherkkyyssluokka on HHL3 tai HHL4.

Taulukossa 1 on esitetty tavanomaisimpien tuulensuojamateriaalien homeutumisherkkyyssluokat.

Taulukko 1. Tavanomaisimpien tuulensuojamateriaalien homeutumisherkkyyssluokat.

Tuulensuoja	Homeutumisherkkyyssluokka
Diffuusioavoin muovikuitukalvo	HHL3
Muovipohjainen tuulensuojakalvo tai -laminaatti	HHL3
Mineraalivillalevy	HHL3
Huokoinen kuitulevy	HHL1
Bitumoitu tai suojäkäsittely huokoinen kuitulevy	HHL2
Kartonkipintainen kipsilevy	HHL1
Lasikuituvahvisteinen kipsilevy	HHL2–HHL3
Kuitusementtilevy	HHL3
Havuvaneri	HHL1–HHL2
Homesuojattu havuvaneri.	HHL2–HHL3

Puurankarakenteissa käytettävän tuulensuojan kokonaislämmönvastuksen on oltava aina vähintään $0,5 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$, jos tuulensuoja kiinnitetään suoraan puurunkoon tai -koolaukseen. Lämpöä eristävän tuulensuojan käyttö nostaa lämpötilaa ja laskee suhteellista kosteutta sen sisäpuolella ehkäisten samalla homeen kasvuun suotuisten olosuhteiden syntymistä tuulensuojan sisäpinnassa ja puurungon ulko-osissa.

Herkästi homehtuvia tuulensuojalevyjä (HHL1–HHL2) ei saa käyttää rakenteen ulommaisena tuulensuojana, ellei tuulensuojan kokonaislämmönvastus ole $\geq 0,5 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$. Ohut herkästi homehtuva tuulensuoja tulee asentaa aina lämpöä eristävän tuulensuojan sisäpuolelle.

Edellä mainittu sääntö koskee myös kartonkipintaista kipsilevyä. Kartonkipintaista kipsilevyä voidaan kuitenkin käyttää edelleen tuulensuojana, jos sen ulkopuolelle asennetaan lämpöä eristävä tuulensuoja. Tämä mahdollistaa sen käytön jatkossakin mm. rakenteen ulkopuoliseen jäykistämiseen.

Kovalevyä, lastulevyä tai OSB-levyä ei saa käyttää rakenteen tuulensuojana suurten kosteusmuodonmuutosten vuoksi. Myöskään magnesiittilevyä ei saa käyttää tuulensuojana, koska sen sisältämät suolat voivat kerätä kosteutta, joka kastelee rakenteita ja aiheuttaa mikrobivaurioita.

Taulukossa 2 on esitetty yhteenvetona puurankarakenteissa käytettävältä tuulensuojalta vaadittavat homeutumisherkkyyssluokat ja kokonaislämmönvastukset eri rakennusosissa.

Taulukko 2. Tuulensuojalta vaadittavat kokonaislämmönvastukset ja homehtumisherkkyysluokat rankarakenteisissa rakennusosissa.

Rakennusosa		Tuulensuojan homehtumis-herkkyysluokka	Tuulensuojan kokonaislämmönvastus [m ² K/W]
Yläpohja	Vino palkkikatto ⁽¹⁾	≥ HHL2	≥ 0,5
Puu- ja levyverhottu ulkoseinä	Tuulensuoja kiinnitetty puurunkoon tai -koolaukseen	≥ HHL1 ≥ HHL2	≥ 0,5
	Tuulensuojan ja puurungon välissä metalliranka tai vastaava koolaus ja puurungon ulkopuolen lämmönvastus koostuu tuulensuojan ja välissä olevan lämmöneristeen vastuksesta ⁽¹⁾	≥ HHL3	Puurungon ulkopuolella yhteensä ≥ 0,5
Tiiliverhottu ulkoseinä, enintään 10 m korkea	Tuulensuoja kiinnitetty yhtenäiseen puurunkoon	≥ HHL2	≥ 2,0 ≥ 3,0
	Tuulensuoja kiinnitetty vaakakoolaukseen tai muuhun runkovaihtoehtoon	≥ HHL2	≥ 3,0
	Tuulensuojan ja puurungon välissä metalliranka tai vastaava koolaus ja puurungon ulkopuolen lämmönvastus koostuu tuulensuojan ja välissä olevan lämmöneristeen vastuksesta	≥ HHL3	Puurungon ulkopuolella yhteensä ≥ 3,0
Tiiliverhottu ulkoseinä, yli 10 m korkea	Metalliohutlevy tai vastaava diffuusioeste tiiliverhouksen takana, tuulensuoja kiinnitetty puurunkoon tai -koolaukseen	≥ HHL1 ≥ HHL2	≥ 0,5
	Metalliohutlevy tai vastaava diffuusioeste tiiliverhouksen takana, tuulensuojan ja puurungon välissä metalliranka tai vastaava koolaus ja puurungon ulkopuolen lämmönvastus koostuu tuulensuojan ja välissä olevan lämmöneristeen vastuksesta	≥ HHL3	Puurungon ulkopuolella yhteensä ≥ 0,5
Alapohja	Ryömintätilainen alapohja ⁽¹⁾	≥ HHL2 ≥ HHL3	≥ 0,5

1) Metallirangalla tai vastaavalla kosteutta kestäväällä koolauksella toteutettuja ratkaisuja voidaan käyttää myös vinoissa palkkikatoissa ja ryömintätilaisissa alapohjissa kantavien puurakenteiden ulkopuolella, jolloin tuulensuojan ja lämmöneristykseen vaatimukset noudattavat puu- ja levyverhotuille ulkoseinille asetettuja vaatimuksia.

4. Eristerapatut kivirakenteiset ulkoseinät

Viime vuosina ulkoseinissä käytettävistä rakennetyypeistä on paljon huomiota saanut eristerapatut kivirakenteiset ulkoseinät. Eristerappausta käytetään yleisnimenä suoraan lämmöneristeen päälle tehtävistä rappauksista. Eristerappausten kantavana rakenteena on aina betoni-, tiili- tai harkkorakenteinen seinä, joka toimii myös rakennuksen vaipan ilmatiiviinä kerroksena. Eristerappaukset jaetaan paksu- ja ohutrappauseristejärjestelmiin, jotka eroavat toisistaan merkittävästi mm. rappauskerroksen paksuuden, kiinnitystavan sekä rakennusfysikaalisen toiminnan osalta. Eristerappauksia voidaan toteuttaa joko kokonaan työmaalla tehtävinä tai elementtjärjestelminä.

Puutteellisesti suunnitelluissa tai toteutetuissa eristerappauksissa on esiintynyt vesivuotoja rappauksen halkeamista, saumoista ja liittymistä. Erityisesti mineraalivillan päälle tehdyissä ohutrappauksissa ulkoseinissä on esiintynyt vaurioita jo nopeasti kohteen valmistumisen jälkeen tai muutaman vuoden sisällä valmistumisesta. Rakenteella on heikko vikasietoisuus. Kovan eristeen EPS tms. päälle rapattaessa ongelmat ovat olleet vähäisempiä. Mineraalivillan päälle tehdyissä paksurappauksissa, lähinnä kolmikerrosrappaukset, on ollut myös vaurioita, mutta selvästi vähemmän kuin ohutrappauksella.

Uudessa RIL 107 ohjeissa annetaan huomattavasti enemmän ohjeita eristerappauksen tekemiseen ja annetaan myös suositukset, milloin sitä ei tulisi käyttää lainkaan. Kirjan liitteessä on esitetty lisäksi kattava lista eristerappauksissa havaituista vaurioista ja niiden syistä.

Kirjassa suositellaan myös, että eristerappausten tilalla käytetään tuuletusvälistä levyrapppausta. Tämä rakenne on vikasietoisempi ja sen pintakerros on mahdollista uusien siten, että varsinainen lämmöneriste ei vaurioidu pintakerroksen uusimisen yhteydessä. Levyrapppauksissa julkisivuissa ei ole toistaiseksi havaittu merkittäviä ongelmia.

Kaikille eristerappauksille on aina tehtävä kohdekohtainen detaljisuunnittelu, joka sisältää liittymät ympäröiviin rakenteisiin pohjautuen yhteisten ohjeiden malleihin (by 57 Eriste- ja levyrapppaus 2016) [8] ja järjestelmän toimittajan toimivaksi todettuihin malleihin. Rakennesuunnittelijan on määritettävä eristerappausjärjestelmien kohdekohtaiset laatuvaatimukset sekä tarvittavat laadunvarmistustoimenpiteet.

Eristerappauksen alaosa sekä ikkunoiden ja muiden eristerappauksen katkaisevien rakenteiden päältä on järjestettävä poistumisreitit rappauksen taakse mahdollisesti päässeelle vedelle. Vesien poisohjaus vaatii huolellista detaljointia, esimerkiksi järjestelmätoimittajan rei'itettyllä alareunaprofiililla. Rappauksen sisäpinnan on sijaittava vähintään 10 mm sokkelipintaa ulompana vesien poisohjaamiseksi. Rappauksen alareunassa on otettava huomioon myös lämpöliikkeet. Avohuokoisten lämmöneristeiden huokoisuus mahdollistaa vuotovesien ja epäpuhtauksien leviämisen lämmöneristekerroksessa laajemmalle kuin solumuovieristeessä. Myös mikrobikasvu on mahdollista avohuokoisen lämmöneristeen sisällä [9].

Eristerappaus ei ole tuulettuva rakenne, ja sitä ei suositella käytettäväksi julkisivuun kohdistuvan suuren sade- ja tuulirasituksen takia rakennuksissa, joiden korkeus on yli 30 metriä tai ovat ympäristöään korkeampia tai jotka sijaitsevat tuulisilla paikoilla, kuten rannikolla.

Toteutuksen laadunvalvonnassa on kiinnitettävä huomiota:

- rappauksen tehtävien läpivientien välttämiseen aina kun se on mahdollista
- lämpö- ja kosteusliikkeiden mahdollistamiseen suunnitelmien mukaisilla liitoksilla ja liikuntasaumoilla
- rappauksen alustana olevan eristyksen ulkopinnan tasaisuuteen. Tarvittavat korjaukset on tehtävä eristeen alle eikä esimerkiksi laastilla eristeen päälle
- suunnitelmien mukaisten rappauspaksuuksien toteutumiseen
- käytettävien materiaalien laadun toteutumiseen
- mekaanisten kiinnikkeiden, rappausverkon ja lisäverkotuksen ohjeiden mukaiseen asentamiseen
- rappauksen työstöön, rappausolosuhteisiin ja jälkihoitoon
- pintakäsittelyn mukaisen rappauksen halkeiluluokan vaatimusten täyttymiseen

- detaljien, mm. ikkuna- ja oviliittymien, huolelliseen, suunnitelmien ja järjestelmätoimittajan ohjeiden mukaiseen toteutukseen
- rappauksen alapäässä vesien poistumisen mahdollistamiseen esim. järjestelmätoimittajan rei'itetyllä alareunaprofiililla.

Eristerapattujen julkisivurakenteiden toimiminen edellyttää julkisivujen aktiivista huoltoa, joka tarkoittaa mm. suojaavien pinnoitteiden uusintakäsittelyä noin 10–15 vuoden välein sekä kaikkien liitosten ja tiivistysten huolellista toteutusta sekä niiden kunnosta huolehtimista.

5. Vikasietoiset rakenteet ovat tie parempaan sisäilman laatuun ja matalampiin elinkaarikustannuksiin

Suunniteltujen ja toteutettujen rakenteiden on oltava vikasietoisia siten, että ne kestävät lyhytkestoisia kosteusrasituksia vaurioitumatta. Suunnittelussa valitaan ensisijaisesti testattuja tai kokemusperäisesti toimiviksi todettuja rakenneratkaisuja ja materiaaleja. Ratkaisut, joiden toiminnasta rakennuspaikan ilmasto-olosuhteissa ei ole ennalta olemassa olevaa kokemusperäistä tietoa, osoitetaan koko rakennusosan suunnitellun käyttöajan toimiviksi joko laskennallisesti tai käytännön dokumentoiduin kokein.

Kosteusteknisessä suunnittelussa tavoitellaan vikasietoisuutta mm. seuraavin keinoin:

- Valitaan teknisesti tarkoitukseensa sopivia, mutta mahdollisimman yksinkertaisia ratkaisuja, jolloin toteutuksen virheriski pienenee.
- Valitaan teknisiä ratkaisuja ja materiaaleja, joiden toimintavarmuudesta on kokemusperäistä tietoa rakennuspaikan ilmasto-olosuhteissa.
- Valitaan ratkaisuja ja materiaaleja, joiden kuivumiskyky kastumisen jälkeen on mahdollisimman hyvä.
- Hallitun vuodon mahdollistavissa rakennetyypeissä, kuten esimerkiksi useimmissa ulkoseinissä, detaljisuunnittelussa varmistetaan, että tuuletusvälejä voidaan hyödyntää uloimman vaippapinnan läpi tulevien vuotovesien ulosohjauksessa rakenteen tuuletuksen ohella.
- Valitaan rakennusmateriaaleja, joiden kastuminen asennusvaiheessa on hyväksyttävää, mikäli rakennuskokonaisuuden suojaaminen sateelta on työmaavaiheessa taloudellisesti mahdotonta.
- Valitaan rakenteet, rakennustarvikkeet ja -materiaalit niin, että käytön aikana niihin joutuva kosteus ei heikennä rakenteiden ja materiaalien toimintakelpoisuutta haitallisessa määrin.
- Valitaan ratkaisuja, joiden huoltotarve on mahdollisimman vähäinen ja huoltoväli pitkä.
- Eri rakenneosien käyttöikä otetaan huomioon suunnittelussa esittämällä rakenteen huolto- ja korjausvälit tai niiden oletetaan kestävän rakennuksen suunnitellun käyttöajan ajan.
- Laitteistot, joihin liittyy vesivuodon mahdollisuus, sijoitetaan niin, että ne ovat helposti tarkastettavissa ja korjattavissa ja mahdolliset vesivuodot ja kondenssivedet ohjataan näkyville tai viemäriin.
- Teknisiä järjestelmiä suunniteltaessa tulee varmistaa, ettei niiden toimimattomuus aiheuta kosteusteknisiä ongelmia ja ettei käyttäjä pysty sulkemaan välttämättömiä järjestelmiä.

Rakennetyyppien valinnalla ja yksityiskohtien suunnittelulla on keskeinen merkitys sääsuojausmenetelmiin. Rakenne voi toimia mallinnuksen perusteella käyttötilanteessa täysin moitteettomasti. Ongelmaksi voi kuitenkin muodostua rakentamisen aikana puutteellisen sääsuojauksen takia rakenteisiin tunkeutunut vesi.

Lähtökohtaisesti rakenteisiin, jotka ovat toimivia mutta edellyttävät täysin virheetöntä ja täydellistä suoritusta rakennustyön aikana, tulee suhtautua varauksella. Sama pätee rakenteisiin, joiden puutteellinen huolto tai virheellinen käyttö voi vaarantaa rakenteen kosteusteknisen toiminnan.

Yleisesti ottaen ulkovaipan kantavat rakenteet ja lämmöneristykset tulisi suunnitella aina vähintään 50 vuoden käyttöiälle, jotta rakentamisen hiilijalanjälkeä saadaan alennettua. Pitkän käyttöiän saavuttaminen edellyttää myös sitä, että rakenteita huolletaan käytön aikana säännöllisesti.

6. Yhteenveto

RIL 107-2022 Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet on uudistunut. Julkaisussa esitettyjen ohjeiden ja suositusten tavoitteena on parantaa veden- ja kosteudeneristykseen liittyvän suunnittelun, toteutuksen ja ylläpidon laatutasoa. Alkaen vuodesta 1976 ohjeen päivitysversiona esitetyt toiminnalliset, rakenteelliset ja työhön liittyvät suositukset sekä tuotteilta ja tarvikkeilta edellytettävät ominaisuudet on pyritty esittämään kunkin ajanhetken parhaan tietämyksen ja hyvän rakentamistavan mukaisena.

Tuoreimmassa RIL 107 -päivityksessä punaisena lankana on vikasietoiset rakenteet. Tällä varaudutaan ilmastonmuutoksen rakenteisiin kohdistamiin haasteisiin. Vikasietoisuudella tarkoitetaan ratkaisuja, joissa suunnittelussa, rakentamisessa, rakennusten huollossa ja käytössä ilmenevät vähäisimmät virheet ja puutteet eivät vielä johda rakenteiden haitalliseen vaurioitumiseen. Vikasietoiset rakenteet mahdollistavat siten tiettyyn rajaan asti myös osaamattomuutta ja inhimillisiä virheitä suunnittelussa, rakentamisessa sekä rakennusten huollossa ja käytössä. Varmatoimiset ja vikasietoiset rakenteet ovat tie parempaan sisäilman laatuun ja matalampiin elinkaarikustannuksiin.

Lähdeluettelo

- [1] Rakennusteollisuus RT ry:n osaamistarveselvitys 29.10.2021.
- [2] Ympäristöministeriön asetus rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta (782/2017).
- [3] Rakennusten kosteustekninen toimivuus, ympäristöministeriön ohje rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta 2020.
- [4] Vinha, J., Laukkarinen, A., Mäkitalo, M., Nurmi, S., Huttunen, P., Pakkanen, T., Kero, P., Manelius, E., Lahdensivu, J., Köliö, A., Lähdesmäki, K., Piironen, J., Kuhno, V., Pirinen, M., Aaltonen, A., Suonketo, J., Jokisalo, J., Teriö, O., Koskenvesa, A. & Palolahti, T. 2013. Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Rakennetekniikka, Tutkimusraportti 159. 354 s. + 43 liites.
- [5] Viitanen, H., Vinha, J., Salminen, K., Ojanen, T., Peuhkuri R., Paajanen, L. & Lähdesmäki, K. 2010. Moisture and biodeterioration risk of building materials and structures. Journal of Building Physics, Vol. 33 (3), pp. 201-224.
- [6] RIL 250-2020 Kosteudenhallinta ja homevaurioiden estäminen. RIL ry. Helsinki 2020.
- [7] Suomalainen homemalli, Tampereen yliopisto, rakennusfysiikan tutkimusryhmä <https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/suomalainen-homemalli/>
- [8] by 57 Eriste- ja levyrappaus 2016. BY-Koulutus. Helsinki 2016.
- [9] Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus, Ympäristöopas 2016, Ympäristöministeriö, Helsinki 2016.

Ilmastonmuutokseen sopeutuminen rakentamisen suunnittelussa – opas rakennuttajille ja kiinteistönomistajille

Elli Kinnunen, Arttu Lehtonen ja Lauri Savolainen
A-Insinöörit Suunnittelu Oy

Tiivistelmä

A-Insinöörit on julkaissut oppaan, joka käsittelee lisääntyvien sateiden, muuttuvien luonnonkuormien ja lisääntyvien hellejaksojen vaikutusta rakennusten suunnitteluun. Oppaan avulla huomioidaan ilmastonmuutoksen vaikutukset rakennushankkeissa ja varmistetaan, että niihin sopeudutaan jo suunnitteluvaiheessa. Lisääntyvät sateet lisäävät rakennusten kosteusrasitusta erityisesti syys- ja talvikausina. Viistosade on haitallista rakennusten julkisivuille, ja siksi sen kasvava vaikutus tulee huomioida muun muassa materiaalivalinnoissa. Tulevaisuuden kosteusrasituksen vaikutuksia julkisivuille tulisikin ennakoida mallintamalla. Lisääntyvät hellejaksot vaikeuttavat rakennusten sisälämpötilojen hallintaa. Rakennusten lämmönsäätelyyn voidaan vaikuttaa oikein suunnitellulla aurinkosuojauksella ja jäähdytysratkaisuilla.

1. Johdanto

Maapallon ilmasto on lämmennyt reilun asteen verran esiteollisen ajan jälkeen. Keskimääräinen globaali lämpötila on nyt 0,95–1,2 °C korkeampi kuin 1800-luvun lopulla, ja viimeisen vuosikymmenen aikana lämpötilan nousu on vain kiihtynyt. [1] Hallitustenvälisen ilmastopaneelin IPCC:n (Intergovernmental Panel on Climate Change) uusimpien raporttien [2] mukaan ilmaston lämpeneminen on jatkunut erittäin nopeana, ja mikäli päästöt pysyvät nykyisellä tasolla, voivat ilmastonmuutoksen vaikutukset olla jopa aiempia, kaikkein pessimistisimpiä arvioita suuremmat.

Rakennusalan merkitys ilmastonmuutokseen on merkittävä: arviolta kolmannes globaaleista kasvihuonekaasupäästöistä syntyy rakennusalalla. Syynä ovat muun muassa raaka-aineiden käyttö ja energiankulutus. Puolet globaaleista raaka-aineista käytetään rakennusalalla ja 40 prosenttia primäärienergiasta rakennuksiin ja rakentamiseen. Rakennusten energiankulutusta on säädelty EU:ssa ja Suomessa rakennusten energiatehokkuusdirektiivillä vuodesta 2012 lähtien, jonka pyrkimyksenä on parantaa rakennusten energiatehokkuutta. Myös energiantuotantomuotoja on ohjattu yhä enemmän kohti uusiutuvia energiamuotoja ja pienempiä päästöjä.

Jo tehdyistä toimista huolimatta globaalit kasvihuonekaasupäästöt ovat jatkaneet kasvuaan ja ilmaston muutos etenemistään. Suomen ympäristöministeriö julkisti vuonna 2017 tiekartan vähähiilisten rakentamisen säädösohjauksesta. Siinä esitettiin, että Suomessa ohjattaisiin rakennusten hiilijalanjälkeä vuonna 2025. Rakentamisen päästösäätely on osa kansallista ilmastonmuutoksen hillinnän strategiaa. Suomi pyrkii olemaan hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä, jolloin ilmaston lämpeneminen ei enää – ainakaan periaatteessa – etene.

Vaikka ilmaston lämpeneminen saataisiin tulevaisuudessa pysähtymään, on ilmastomme jo muuttunut. Siksi myös suunnittelemaamme rakennusten on tulevaisuudessa kestävä uudenlaisia rasisolosuhteita, jotka johtuvat erilaisista sääilmiöistä. On ennustettu, että mitä enemmän ilmasto lämpenee, sitä enemmän merenpinta nousee ja sään ääri-ilmiöt, kuten puuskatuulet,

rankkasateet ja hellejaksot, lisääntyvät.

Rakennusten ja rakennusmateriaalien käyttöikää pyritään pidentämään, jotta materiaaleihin sitoutunut hiilidioksidi jakaantuisi mahdollisimman pitkälle aikajaksolle ja näin vältettäisiin uusien materiaalien tuottamisesta syntyviä päästöjä. Mitä pidemmälle tulevaisuuteen rakennuksia suunnitellaan käytettävän, sitä erilaisemmassa ilmastossa niitä käytetään. Nyt suunniteltavissa rakennuksissa tulee jo suunnitteluvaiheessa huomioida ilmastossa tapahtuneet ja tulevaisuudessa tapahtuvat muutokset. [3]

2. Sateet lisääntyvät – julkisivun materiaalivalintojen merkitys korostuu

Kosteusrasitus lisääntyy tulevaisuudessa erityisesti syys- ja talvikausina, jotka ovat jo nykyilmastossa haastavia julkisivurakenteille. Kun rakenteet altistuvat kosteudelle ja kuivumisolosuhteet ovat heikkommat, rakenteiden riski homehtua kasvaa. Julkisivurakenteiden kosteusrasitus aiheuttaa rakenteille aiempaa suuremman kosteuskuorman, jonka rakenteiden on kestävä koko niiden suunnitellun käyttöajan.

Mitä korkeampi rakennus on, sitä kovempi siihen kohdistuvan tuulen nopeus on ja sitä suurempaan osaan julkisivua viistosade osuu. Tuulen pyörteisyyttä rakennuksen nurkka-alueilla lisää myös osaltaan viistosaderasitusta rakennuksen julkisivuille.

Rakenteelle tulevan kosteusrasituksen määrään vaikuttavat suuresti valittu pintamateriaali ja rakenteen pinnoite sekä niiden kyky imeä vettä. Tiivis pintamateriaali, esimerkiksi lasi, metalli, muovi, tiivis maalipinta tai klinkkerilaatta, ei ime vettä syvemmälle rakenteeseen. Sateella tiiviiseen pintaan muodostuu kuitenkin nopeasti vesikalvo, joka tuulen vaikutuksesta voi liikkua julkisivupinnalla mihin tahansa suuntaan. Vesi voi kulkeutua tuulen painamana saumojen, tuuletusrakojen, räystäsrakenteiden tai julkisivupinnan mahdollisten halkeamien kautta syvemmälle rakenteeseen.

Huokoisissa julkisivumateriaaleissa sadevesi imeytyy kapillaarisesti rakenteen sisään. Julkisivun pintaan muodostuu vesikalvo siinä vaiheessa, kun julkisivulle tuleva vesimäärä ylittää materiaalin vedenimunopeuden. Eri rakenteiden vedenimukyky vaihtelee suuresti. Tiilet ja pinnoittamaton rappauslaasti imevät kosteutta kapillaarisesti hyvin nopeasti. Betonin kapillaarinen imunopeus puolestaan riippuu etenkin betonin tiiveydestä. Huokoisen materiaalin vedenimunopeuteen voidaan vaikuttaa suojaavalla pintakäsittelyllä, joka hidastaa veden imeytymistä rakenteeseen. Toisaalta pinnoitteella yleensä heikennetään rakenteen kuivumiskykyä. Samalla julkisivupinnalla liikkuva vesikalvo kasvaa, jolloin on mahdollista, että pinnoitteen halkeamien tai muiden rajapintojen kohdalta rakenteisiin imeytyy suurempi vesimäärä. Suurempi kosteusmäärä yhdistettynä korkeampiin lämpötiloihin tarkoittaa, että myös homeen kasvulle rakenteissa on suotuisammat olosuhteet.

Erilaisten julkisivurakenteiden rakennusfysikaalista toimintaa tutkittiin opinnäytetyössä Ilmastomuutoksen rakennusfysikaaliset vaikutukset – julkisivurakenteiden suunnittelu. [4] Työssä mallinnettiin erilaisten julkisivurakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa vuoden 2100 ilmastossa ja verrattiin tuloksia vaikutuksiin vuoden 2007 ilmastossa. Mallinnukset tehtiin suhteellisen ankarissa rasisolosuhteissa korkean, räystäättömän rakennuksen julkisivulla.

2.1 Kuorimuuraus

Rakenteessa julkisivupintana toimivan muurauksen takana on ilmarako, tuulensuojavilla,

lämmöneristeet ja kantava runkorakenne, joka oli opinnäytetyössä tehdyissä laskelmissa betoninen sisäkuori. Tiilikuori imee herkästi vettä ja siirtää sitä kapillaarisesti syvemmälle rakenteeseen. Märkä tiilimuuri aiheuttaa tulevaisuuden ilmasto-olosuhteissa loppukesällä ja syksyllä myös vesihöyryn siirtymistä diffuusiolla kohti rakenteen sisempiä kerroksia.

Tulevaisuuden ilmastossa rakenteen sisällä olevat olosuhteet lämmöneristeen ja betonin rajapinnassa mahdollistavat homeen kasvun jo muutamassa vuodessa rakennuksen valmistumisesta. Julkisivurakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan mallinnukset osoittivat, että suhteellinen kosteus rakenteen sisällä on vuoden 2100 ilmastossa selkeästi suurinta loppukesällä ja syksyllä. Suhteellinen kosteus lämmöneristeen ja betonisen sisäkuoren rajapinnassa on silloin jopa yli 95 prosenttia. Mikäli rakenteessa on villaa herkemmin homehtuvia materiaaleja, esimerkiksi puisia apukarmeja, homeen kasvu niissä on hyvin todennäköistä tulevaisuudessa.

Tiilikuorimuureissa rakenteen toimintaan vaikuttaa oleellisesti tuuletuksen toiminta muurauksen takana. Riittävän suuri ja hyvin tuulettuva tuuletusrako parantaa rakenteen toimivuutta. Nykyohjeissa suositellaan kaksinkertaista tuuletusväliä, eli niin sanottua sadetakkipellin käyttöä. Ratkaisu on rakennusfysikaalisesti turvallinen, mutta melko hintava. Tiilimuuratusta rakenteessa detaljien suunnittelu ja toteutus täytyy tehdä erityisen huolellisesti. Kuorimuurauksen käyttöä on harkittava tapauskohtaisesti, ja kohdekohtaista rakennusfysikaalista mallinnusta suositellaan.

2.2 Eristerappausjärjestelmä

Villan päälle tehtävät eristerappausjärjestelmät osoittautuivat mallinuksissa hieman riskialttiiksi jo nykyilmastossa. Laskennallisesti tarkasteltuna rappauserroksen ja lämmöneristeenä toimivan villan rajapinnassa on homeen kasvun mahdollistavat olosuhteet jo tälläkin hetkellä ja tilanne pahenee vuoteen 2100 mennessä selvästi. Homeen kasvun kannalta mineraalivilla tai rappauslaasti eivät ole kovin herkkiä materiaaleja, mutta esimerkiksi eristeen sisässä olevat ikkunoiden puiset apukarmit ovat homeelle huomattavasti herkempiä. Toisaalta rakenteissa on tyypillisesti tiivis betoninen sisäkuori, mikä pienentää mahdollisen homeen kasvun aiheuttamaa haittaa.

Eristerapattuissa kohteissa on varmistettava, että detaljiikka, esimerkiksi ikkuna- ja julkisivuliitokset, on suunniteltu oikein, vedet ohjautuvat ulospäin eikä rakenteisiin tule keskitettyä kosteusrasitusta. Rakenneliittymien tulee olla tiiviitä ja pinnoitteiden vettähyлкiviä, mutta rakenteiden kuivumisen sallivia. Detaljiikkaa täytyy suunnitella riittävästi, jotta työmaalla ei jouduta ratkomaan niitä rakentamisen aikana.

Detaljien toteutuksen valvonta on oleellista, jotta uusiin rakenteisiin ei synny halkeilua, josta julkisivupinnalle satanut vesi voi päästä tuulen painamana syvemmälle rakenteeseen. Muun muassa verkon sijaintia, aloituslistojen limitystä ja peltien raappausreunoja on valvottava.

Eristerapattujen ratkaisujen käyttöä on myös harkittava tapauskohtaisesti kohteen rasisitustason perusteella. Mikäli halutaan tehdä rapattu pinta ankariin rasisitusolosuhteisiin, on levyrappaus huomattavasti turvallisempi vaihtoehto kuin eristerappaus.

2.3 Tuulettavat julkisivut

Tuulettavat julkisivuratkaisut toimivat rakennusfysikaalisesti hyvin myös tulevaisuuden ilmasto-olosuhteissa. Hyvin toimiva tuuletusrako pystyy kuivattamaan rakenteista myös nykyistä

suuremman kosteusrasituksen. Homeen kasvua voi tulevaisuudessa esiintyä tuuletusraon sisäpinnassa, mikäli tuulensuoja on herkästi homehtuvaa materiaalia kuten tuulensuojakipsilevyä. Homehtumisriski voidaan käytännössä poistaa tuulensuojamateriaalin valinnalla.

Sandwich-elementeillä on huolehdittava, että rakenteessa on toimivat tuuletusurat eristeen ulkopinnassa, tuuletuskotelot tai -putket saumoissa sekä erityisesti toimivat sadevedenpitävät elementtisaumat. Elementtisaumoilla on muuta rakennetta huomattavasti lyhyempi tekninen käyttöikä, joten saumauksia täytyy uusia rasisolosuhteiden perusteella 15–20 vuoden välein. Taas levyverhotun tai levyrapatun tuulettuvan julkisivurakenteen detaljiikka on suunniteltava huolellisesti. Avosaumaiseen rakenteeseen saadaan lisää varmuutta käyttämällä saumalistoja tai -profiileja, joilla varmistetaan sadevesitiiveys.

3. Hellejaksot lisääntyvät – ratkaisuja sisäilman pitämiseen viileänä

Lämpimät jaksot nostavat väistämättä sisälämpötiloja merkittävästi erityisesti jäähdyttämättömissä rakennuksissa. Ulkopuolinen lämpökuorma siirtyy sisälle pääasiassa säteilylämpönä ikkunoiden tai ilmastoinnin tuloilman kautta. Ilmanvaihdon kautta lämmintä ilmaa tulee sisätiloihin, jos sisällä on viileämpää kuin ulkona.

Erilaisilla lasimateriaaleilla saapuvasta auringon säteilystä voidaan suodattaa eri aallonpituuksia pois. Kaikki ikkunan läpi tuleva säteily muuttuu kuitenkin lopulta lämmöksi sisätiloissa. Usein toivottavinta olisi, että lasi suodattaisi pois mahdollisimman vähän näkyvää valoa, mutta mahdollisimman paljon muita aallonpituuksia. Hyvien sisäolosuhteiden takaamiseksi auringon säteilystä voi olla tarpeen suodattaa pois lähes 70 prosenttia. Tällöin ikkunapintojen määrästä ei tarvitse tinkiä ja tiloihin saadaan mahdollisimman paljon luonnonvaloa.

Jos rakennuksessa on suuria ikkunapintoja, suunnittelussa on erittäin tärkeää huomioida lasimateriaalin auringonsuojaominaisuudet. Tehokkailla auringonsuojalaseilla voidaan helpottaa sisäilmaolosuhteiden hallintaa ja vähentää merkittävästi sisäilman jäähdytyksen tarvetta sekä sisäilman lämpötilan vuorokautisia vaihteluita. Tämä lisää usein rakennusten käyttäjien tyytyväisyyttä.

Sälekaihtimilla voidaan suojautua liialta auringon säteilyltä. Tärkeää on kuitenkin se, miten kaihtimet sijoitetaan suhteessa lämpöä eristävään lasielementtiin. Jos kaihtimet sijoitetaan eristävän lasielementin huoneen puolelle, lämmöltä suojautuminen onnistuu heikosti. Lasielementin ulkopuolelle sijoitettuna kaihtimet suojaavat erittäin tehokkaasti ylimääräiseltä lämpökuormalta. Ulkopuolinen sälekaihdin tai muu ikkunan ulkopuolelle sijoitettu säteilyä läpäisemätön materiaali onkin tehokkain passiivinen auringonsuojaratkaisu. Ratkaisu on yleinen lämpimissä maissa, mutta meillä Suomessa ulkopuolisia kaihtimia ei vielä suosita. Lasin ulkopuolelle sijoitetut kaihtimet vaikuttavat merkittävästi julkisivujen arkkitehtuuriin ja huollettavuuteen. Tyypillisin ratkaisu Suomessa yleisimmin käytetyissä MSE-ikkunoissa on sijoittaa sälekaihdin ikkunaväliin eristävän lasielementin ulkopuolelle. Tällöin lämpökuormasta suuri osa jää ikkunaväliin, josta se tuulettuu ja siirtyy ulkoilmaan ulomman yksittäisen lasikerroksen läpi.

Muut passiiviset auringonsuojausratkaisut ovat myös tehokkaita, jos ne pystytään sijoittamaan siten, että ne varjostavat auringon säteilyltä. Ikkunan yläpuolelle sijoitetuilla lipoilla tai markiiseilla pystytään suojautumaan hyvin yläviistosta saapuvalta auringon säteilyltä. Ne eivät kuitenkaan auta aamulla, illalla tai kun aurinko muutoin paistaa matalalta – ainakin suojausvaikutus jää hyvin heikoksi. Kun halutaan suuria ikkunapintoja ja paljon luonnonvaloa,

tulisi ikkunat sijoittaa muualle kuin etelä- tai länsiseinustalle. Jos näin joudutaan kuitenkin rakennuksen sijoittelun vuoksi tekemään, on syytä miettiä, voidaanko ikkunat sijoittaa esimerkiksi suurten katosrakenteiden alle. Matalille rakennuksille suojana toimivat myös suuret puut, erityisesti lehtipuut. Kesäaikaan ne luovat varjoa, mutta talvella lehdettöminä ne päästävät valoa lävitseen.

Yötuuletus ilmanvaihdolla varustelluissa rakennuksissa vaikuttaa lämpötilan hallintaan suhteellisen vähän ja auttaa vain tiloissa, joissa ilmanvaihto on yöllä pois päältä. Rakennusautomaatioon pystytään kuitenkin ohjelmoimaan niin sanottu yötuuletustoiminto, joka käynnistyy, kun ulkoilman lämpötila on öisin riittävän matala. Mikäli yöt ovat hellejaksojen aikaan lämpimiä, yli +20 astetta, ei edes yötuuletuksella saavuteta riittävää jäähdytysvaikutusta. Yötuuleduksesta ei ole merkittävää apua, jos ilmanvaihto on muutenkin pidettävä täysillä.

Ikkunoiden avaaminen on maailmalla yleisesti hyväksytty vaihtoehto jäähdyttämiseen. Silloin tuloilman suodatus on kuitenkin puutteellista, äänieristys kaupunkiympäristössä todennäköisesti riittämätöntä eikä tuuletus auta, jos avattavat ikkunat ovat pienehköjä tai jos niitä on vähän. Tämäkään vaihtoehto ei tuota toivottua tulosta, jos ulkoilma ei ole merkittävästi viileämpää kuin sisäilma. Näistä syistä ikkunoiden avaaminen öisin ei ole relevantti vaihtoehto, kun pyritään hallitsemaan rakennusten yllälämpenemistä.

Sisäilman jäähdytys on usein välttämätöntä, jos sisätiloihin tavoitellaan ulkolämpötilaa matalampia olosuhteita. Koneellisella jäähdytyksellä on siis merkittävä rooli myös tulevaisuudessa sisäolosuhteiden hallinnassa. Tämä tulisi huomioida uudisrakennusten suunnittelussa ja merkittävässä saneerauksissa.

Sisätiloihin vaikuttava jäähdytetyn tuloilman jäähdytysteho riippuu ilmanvaihtomääristä. Normaalisissa asuinrakentamisissa ilmanvaihtomäärät ovat niin pieniä, että jäähdytetyllä tuloilmalla ei voida ratkaista kaikkia yllälämpenemisen ongelmia. Sillä voidaan kuitenkin huomattavasti vähentää niitä. Uudisrakentamisessa tuloilman jäähdytykseen pitäisi aina varautua siten, että se voidaan lisätä jälkikäteen ilman ilmanvaihtokanaviston eristyksiin tehtäviä muutoksia. Tämä onnistuu helpommin rakennuksissa, joissa on keskusilmanvaihtokone.

Jäähdytys on mahdollista lisätä myös huoneistokohtaisiin ilmanvaihtokoneisiin, mutta putkiston rakentaminen jälkikäteen voi olla hankalaa. Jäähdytetyllä tuloilmalla voidaan pienentää myös sisäilman suhteellista kosteutta, mikä vaikuttaa siihen, miten lämpimänä sisäilma koetaan. Korkea suhteellinen kosteus vähentää lämmön haihtumista ihmisen iholta ja hengityksen mukana. Tällaisissa olosuhteissa sisäilma voidaan kokea tunkkaiseksi tai tukalan kuumaksi, vaikka lämpötila itsessään ei olisi niin korkea.

Huonejäähdytyksellä tarkoitetaan huonetilaan sijoitettua jäähdytyslaitetta, esimerkiksi jäähdytyskonvektoria, jäähdytyspalkkia tai jäähdytyspaneelia. Näistä vaihtoehdoista jäähdytyskonvektori on ainoa, joka poistaa sisäilmasta myös kosteutta. Jäähdytyspaneelien ja -palkkien käyttö edellyttää myös tuloilman jäähdyttämistä, eli kosteuden poistamista sisään tulevasta ilmasta, jotta ilman sisältämä vesihöyry ei kondensoidu jäähdytyslaitteeseen.

4. Yhteenveto

Kun kohteita suunnitellaan tuleviin rasisolosuhteisiin, on jo alussa tärkeä tutkia tarkkaan rakennuspaikan sijainti ja siellä vallitsevat olosuhteet. Paikalliset olosuhteet ja rasisustaso selvittämällä voidaan valita jo hankesuunnitteluvaiheessa oikeantyyppinen rakennuksen

massoittelu ja perusrakennetyyppi julkisivuun. Tähän vaikuttaa osaltaan asemakaava. Siksi jo kaavoitusta tekevilla henkilöillä olisi hyvä olla tietoa ja ymmärrystä rakennuspaikalle tulevassa ilmastossa soveltuvista rakenteista.

Rakenteet olisi tärkeä mallintaa rakennusfysikaalisesti käyttämällä paikallisia olosuhteita vuosisadan lopun ilmastossa. Näin voidaan varmistaa valitun rakennetyypin toiminta tulevaisuudessa. Mallinnuksella voidaan tarkastella myös jo olemassa olevaa rakennusta ja sen rakenteiden toimivuutta tulevaisuuden ilmastossa. Eri julkisivurakenteet on luonnollisesti suunniteltava huolellisesti ja myös rakenteiden toteutusta täytyy valvoa ja seurata.

Myös sisäilmaolosuhteet tulisi mallintaa erityisesti kesäajan ylikuumenemisen näkökulmasta, jotta voidaan todeta passiivisten keinojen riittävyys ja mahdollinen jäähdytystarve jo nyt tai varautuminen tulevaisuudessa. Järjestelmät ja niitä ympäröivät rakenteet tulee suunnitella niin, että jäähdytyksen lisääminen tulevaisuudessa ei aiheuta tarpeettoman suurta purku- ja korjaustarvetta.

Lähdeluettelo

- [1] Euroopan parlamentti (2022). EU:n ratkaisut ilmastonmuutoksen ehkäisemiseksi. Haettu 2.6.2022 ja viitattu 21.7.2023
<https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/society/20180703STO07129/eu-n-ratkaisut-ilmastonmuutoksen-ehkaisemiseksi>
- [2] IPCC (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- [3] Kinnunen, E. ym. (2022) Ilmastonmuutokseen sopeutuminen rakentamisen suunnittelussa-opas rakennuttajille ja kiinteistönomistajille. Saatavilla
<https://www.ains.fi/oppaat/ilmastonmuutokseen-sopeutuminen-rakentamisen-suunnittelussa?hsCtaTracking=362d1395-c76c-4d4a-9d23-4ad29ab3605e%7C4fc0b7def6f2-458b-812d-bbec97c3ad03>
- [4] Lehtonen, A. (2020). Ilmastonmuutoksen rakennusfysikaaliset vaikutukset – julkisivurakenteiden suunnittelu. YAMK-opinnäytetyö.

Puurunkoisten mineraalivillaeristeisten ulkovaipparakenteiden suunnittelu kosteuskonvektion kannalta

Klaus Viljanen^{1,2} ja Jari Puttonen²

¹ Ramboll Finland Oy

² Aalto-yliopisto

Tiivistelmä

Suomessa ilmavuodot on tunnistettu yhdeksi merkittävimmistä vaurionaiheuttajista kevytrakenteisissa ulkovaipparakenteissa, mutta yleispäteviä ratkaisuja ilmavuotojen fysikaalisesti monimutkaisten ilmiöiden haittavaikutuksien estämiseksi ei ole voitu esittää. Tässä kokeelliseen tutkimukseen perustuvassa artikkelissa arvioidaan sisäilmasta rakennuksen ulkovaippaan kohdistuvien ilmavuotojen vaikutusta ulkovaipan rakennusfysikaaliseen toimintaan. Koetulosten perusteella tehokkain toimenpide on varmistaa ilmansulun virheetön toteutus, mutta käytännön rakentamisessa tämä ei aina toteudu. Artikkelissa esitetäänkin DPD-menetelmä ja lämmönvastussuhde keinoina arvioida suunnitteluvaiheessa ulkovaipan kosteusriskiä. Riittävällä, vähintään 10–20 %, tuulensuojan lämmönvastuksen ja rakenteen kokonaislämmönvastuksen suhteella voidaan parantaa merkittävästi ulkovaipparakenteen kykyä sietää suunnittelemattomia ilmavuotoja.

1. Johdanto

Rakennuksen lämmöneristetyin ulkovaipan lämpö- ja kosteusteknistä toimivuutta arvioidaan yleensä pääasiassa vesihöyryn diffuusion kannalta. Puurunkoisissa, kalvomaisen höyrynsulun omaavissa rakenteissa rakenteiden toimivuuteen voi vaikuttaa merkittävästi myös hallitsemattomien ilmavirtauksien kuljettama lämpöenergia ja vesihöyry. Käytännön esimerkkinä ovat korkeat hallirakennukset, joissa katon rajassa mahdollisesti pitkäaikaisesti ulkoilman suhteen ylipaineisena oleva sisäilma voi aiheuttaa riskin kosteuden kulkeutumiselle ja kertymiselle kattorakenteeseen.

Tässä artikkelissa arvioidaan ilmavuotojen vaikutusta puurunkoisten ja mineraalivillaeristeisten ulkoseinien lämpö- ja kosteustekniseen toimivuuteen ja esitetään laskentaperiaatteita, joilla voidaan arvioida rakenteen toimivuutta kosteuskonvektion kannalta. Arvio perustuu pääosin kokeellisiin tutkimuksiin vähän lämpöä läpäisevistä, puurunkoisista, mineraalivillaeristeisistä ulkoseinistä [1].

2. Lähtökohtana sisäilman kastepistelämpötila

Rakennusten sisäilma Suomen ilmastossa on useimmiten ulkoilmaa lämpimämpi. Sisäilman kosteustaso puolestaan riippuu rakennuksen käyttötarkoituksesta. Esimerkiksi kevytrakenteisissa omakotitaloissa sisäilman kosteuslisä talvella on tyypillisesti luokkaa 1,8 g/m³ [2]. Sisäilman virratessa rakennuksen ulkovaipassa kohti vaipan ulkopintaa kylmänä vuodenaikana ilma voi saavuttaa alueen, jonka alhainen lämpötila mahdollistaa vesihöyryn tiivistymisen. Tätä lämpötilatasoa kutsutaan usein kastepistelämpötilaksi, joka voidaan laskea kaavan 1 mukaan [3].

$$T_{dew} = (b \cdot \alpha) / (a - \alpha) \quad (1)$$

ja $\alpha = (a \cdot t) / (b + t) + \ln(RH)$

missä a = 17,27
 b = 237,3 °C
 t = lämpötila (°C)
RH = suhteellinen kosteus (-)

Sisäilma ei saisi olla kosketuksissa rakenteeseen tai rakenneosaan, jonka lämpötila on alle kastepistelämpötilan, jolloin vesihöyry tiivistyisi pinnalle vedeksi. Tosin korkea suhteellinen kosteus voi ilman vedeksi tiivistymistäkin aiheuttaa homeenkasvua rakenteen sisäpinnalla tai sen sisällä.

3. Virtauskenttä sekä lämmön- ja kosteudensiirtyminen rakenteen sisällä

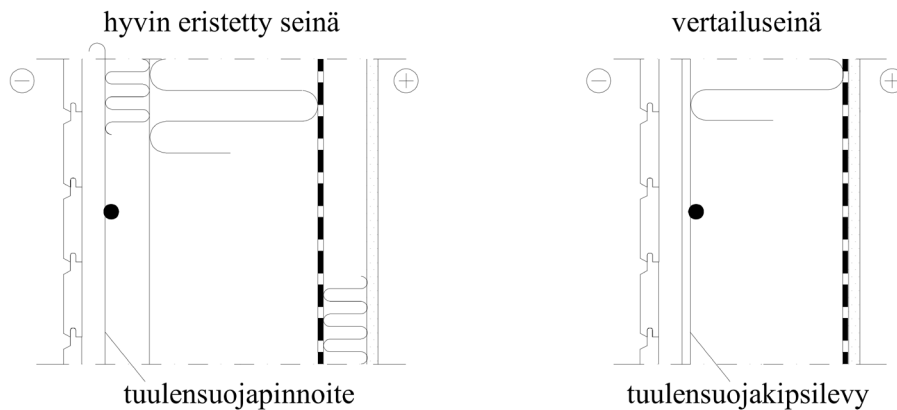
Ilman virtausreitit rakenteen sisällä tai ilmapuotojen vaikutusta rakenteen sisällä vaikuttaviin olosuhteisiin on tutkittu verrattain vähän [1,4]. Tällainen tutkimus on kuitenkin ensiarvoisen tärkeää ilmapuotoihin liittyvien riskien ymmärtämiseksi. Ilman virtauskentän arviointi testaamalla tai laskennallisesti on välttämätöntä, jotta voidaan ymmärtää konvektion vaikutusta rakenteeseen. Ilman virtauskenttä määräytyy rakenteen materiaalien ja niiden välisten kontaktipintojen muodostamista virtausvastuksista. Puurunkoisissa seinissä itse runko, höyrinsulku ja tuulensuoja ovat yleensä pääosin ilmatiiviitä, kun taas avohuokoinen lämmöneriste ja materiaalien väliset epäideaaliset kontaktipinnat vastustavat ilmavirtausta vähemmän. Yleensä ilmavirtaus pyrkii etenemään rakenteessa suoraviivaisesti ulospäin. Ilmapuodon syntymisen edellytys on vuotoreitti rakenteen läpi ja riittävä paine-ero rakenteen yli. Niinpä kosteuskonvektion syntymiseen vaikuttaa esimerkiksi rakennuksen sisätilan korkeus, rakenteen materiaalikerrokset, rakennustyön laatu ja ilmanvaihdon toiminta. Ilmapuoto voi syntyä myös pelkästä ilmansulun epätiiveydestä, jos ilma pääsee kiertämään rakenteessa sopivasti [5].

Koetulosten perusteella selkeä ilmapuoto rakenteeseen syntyi sisäilman ollessa 10 Pascalia ylipaineinen ulkoilmaan nähden, jos höyrinsulkukalvossa oli 1 x 1 cm² kokoinen reikä ja tuulensuojakipsilevyssä oli halkaisijaltaan 1 cm kokoinen reikä [1]. Tällöin sisäilman suhteellinen kosteus 52 % todettiin riittäväksi nostamaan 19–30 päivässä suhteellinen kosteus tasolle 98–100 % [1]. Tässä tilanteessa sisäilman lämpötila oli 21,0 °C ja sen kastepistelämpötila 10,8 °C sekä lämpötila tuulensuojalevyn sisäpuolella 6°C. Ilman virtaus mineraalivillatuulensuojaisen rakenteen läpi edellyttää tuulensuojan vuotoaukon ulottuvan sekä villan että tuulensuojakalvon läpi [1].

Ilmapuoto vaikuttaa sekä rakenteen lämpötilaan että kosteuteen. Kylmänä vuodenaikana ilmapuoto lämmittää rakennetta ja yleensä nostaa sen kosteuspitoisuutta. Ilmapuoto lämmittää rakennetta sitä enemmän mitä suurempi ilman virtausmäärä on. Eräessä tutkimuksessa 0,04–4 L/m²min ilmamäärä ei vaikuttanut rakenteen lämpötilajakaumaan merkittävästi, mutta ilmamäärällä 22 L/m²min rakenteen ulko-osan lämpötilat nousivat selvästi [6]. Pistemäinen ilmapuoto, jonka ilmamäärä on 1–3 L/min, nostaa rakenteen ulko-osan lämpötilaa paikallisesti noin 0,5–2 °C [1]. Lämpöä eristävällä tuulensuojalla lämpötilan nousu tuulensuojalevyn ulko-osissa on vähäistä, koska ilma virtaa tuulensuojan sisäpinnalla ulosvirtauskohtaan. Tulosten perusteella vuotoilma ei pääse tunkeutumaan tuulensuojavillan sisään [1].

Kosteus siirtyy ilmapuodon mukana kohti rakenteen ulko-osaa. Vain pieni osa ilmavirtauksen kosteudesta sitoutuu puurunkoon tai runkovälin mineraalivillaeristeeseen [1]. Vesihöyryvoimessa seinässä, jossa tuulensuojan s_d -arvo on noin 0,1 m, suurin osa kosteudesta

siirtyy rakenteen läpi ulkoilmaan diffuusiolla ja konvektiolla, mutta noin 20 % kosteudesta jää rakenteen tuulensuojaan [1]. Kosteus kertyy paikallisesti tuulensuojamateriaaliin alueelle, joka sijainniltaan seinän pystytasossa vastaa ilmanvuotokohtaa [1,7]. Kriittiset pisteet lämpö- ja kosteusolosuhteiden muodostaman homeriskin kannalta on esitetty kuvassa 1. Kosteuden kertyminen rakenteeseen on hieman suurempaa, jos ulosvirtauskohta on pidentänyt vuotoilman virtausreittiä suhteessa rakenteen paksuuteen [1,6].



Kuva 1. Kriittiset pisteen rankarakenteisessa ulkoseinässä kosteuskonvektion kannalta [1].

4. Kosteuden kertymisriskin arviointi DPD-menetelmällä

Kevytrakenteisten ulkovaipparakenteiden lämpöolosuhteiden arvioimiseksi on kehitetty ns. kastepistevajauksen (engl. dew point depression) kaava, jonka avulla voidaan arvioida kosteuskonvektiosta aiheutuvaa riskiä [1]:

$$DPD(x) = T_i - T_{dew} \quad (2)$$

missä T_i = arviointipisteen i lämpötila ($^{\circ}\text{C}$).

Yleensä arviointipiste i valitaan rakenteen ulko-osasta, sillä kylmänä vuodenaikana lämpötila rakenteen ulko-osassa on alimmillaan.

Kokeellisten konvektiotutkimusten perusteella kosteuden kertymisnopeutta rakenteeseen voidaan arvioida DPD-arvolla [1,8]. Kosteus kertyy sitä nopeammin, mitä suurempi on negatiivisen DPD-arvon itseisarvo. DPD-arvon ollessa lähellä nollaa kosteuden kerääntymisen riski on alhainen riippumatta ilmavuodon kestosta tai määrästä. Ulko-osastaan vesihöyryavoimissa rakenteissa DPD-arvo voi olla -2°C ilman merkittävää kosteuden kertymistä, mutta arvolla $-6,4^{\circ}\text{C}$ puun (esim. seinän puurungon ulko-osa) kosteuspitoisuus nousee 3 paino-%:ia kuukauden aikana. Kosteudenkertyminen on merkittävää jo DPD-arvolla -2°C , jos rakenteessa on vesihöyrytiivis tuulensuoja (s_d -arvo ≥ 10 m). Tällaisissa rakenteissa DPD-arvon tulisi olla vähintään 0°C .

Koetulosten perusteella DPD-arvon ja seinän puurungon ulko-osassa olleen tarkastelupisteen suhteellisen kosteuden välillä on lineaarinen riippuvuus. Toisaalta puun hygroskooppinen kosteuskapasiteetti muuttuu likimain lineaarisesti, jos suhteellinen kosteus on korkea. Siten on ymmärrettävää, että DPD-arvon ja puun kosteuden muutosnopeuden välillä on yhteys.

Rakenteen lämmönläpäisykertoimella (U -arvo) on vain pieni vaikutus DPD-arvoon. Hyvin eristetyssä seinässä (U $0,12$ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$) DPD-arvo on vain $0,1-0,3^{\circ}\text{C}$ alempi verrattuna

vähemmän lämmöneristettyyn seinään ($U\ 0,22\ \text{W}/(\text{m}^2\text{K})$) [1].

DPD-menetelmää voidaan soveltaa lämmönsiirtymisen numeerisessa laskennassa. Tällöin voidaan välttää tarkempi lämpö- ja kosteustekninen laskenta, joka aikariippuvassa tapauksessa on hidas ratkaista. Kuvassa 2a on esitetty puurunkoisen, mineraalivillaeristeisen ulkoseinän alapohjaliittymän laskentamalli, jonka mukaan ratkaistuun lämpötilajakaumaan sovellettiin kaavaa 2. Seinässä on sisäpuolella pystysuuntainen 50 mm koolaus rungon kohdalla. Ulkoilman lämpötila oli tarkastelussa $-10\ ^\circ\text{C}$. Negatiiviset DPD-arvot laskettuna sisäilman lämpötilalla $21\ ^\circ\text{C}$ ja suhteellisella kosteudella 30 % sijaitsevat höyrynsulun ulkopuolella (kuvat 2b ja 2c). Jos höyrynsulun liitos lattiaan ei ole ilmatiivis, on mahdollista, että sisäilman kosteus kertyy ulkoseinän ulko-osiin ilmavuodon jatkuessa riittävän pitkään. Jos sisäilman suhteellinen kosteus on korkeampi 50 %, siirtyy negatiivinen DPD-arvo seinän alaosassa höyrynsulun sisäpuolelle, joten sisäilman kosteus voi tiivistyä paikallisesti höyrynsulun sisäpintaan, vaikka rakenne olisi ilmatiivis (kuva 2d).

DPD-menetelmä ei huomioi konvektion rakennetta lämmittävää vaikutusta. Joissain tapauksissa rakenteen lämpeneminen voi ainakin paikallisesti vähentää kosteuden kertymistä [1]. Rakenteen lämpenemistä ilmavuodon vaikutuksesta voi tarvittaessa arvioida kappaleessa 3 käsitellyn kokeellisten tutkimusten perusteella.

5. Tuulensuojan riittävä lämmönvastus

Rakennesuunnittelussa ei yleensä tarkastella tuulensuojalevyn lämmönvastusta, vaikka sillä on keskeinen vaikutus rankarakenteisen seinärakenteen rakennusfysikaaliseen toimintavarmuuteen. Kuivumispotentiaaliperiaatteen [9] mukaisesti voidaan esittää seuraava lämmönvastussuhteen (%) kaava [1]:

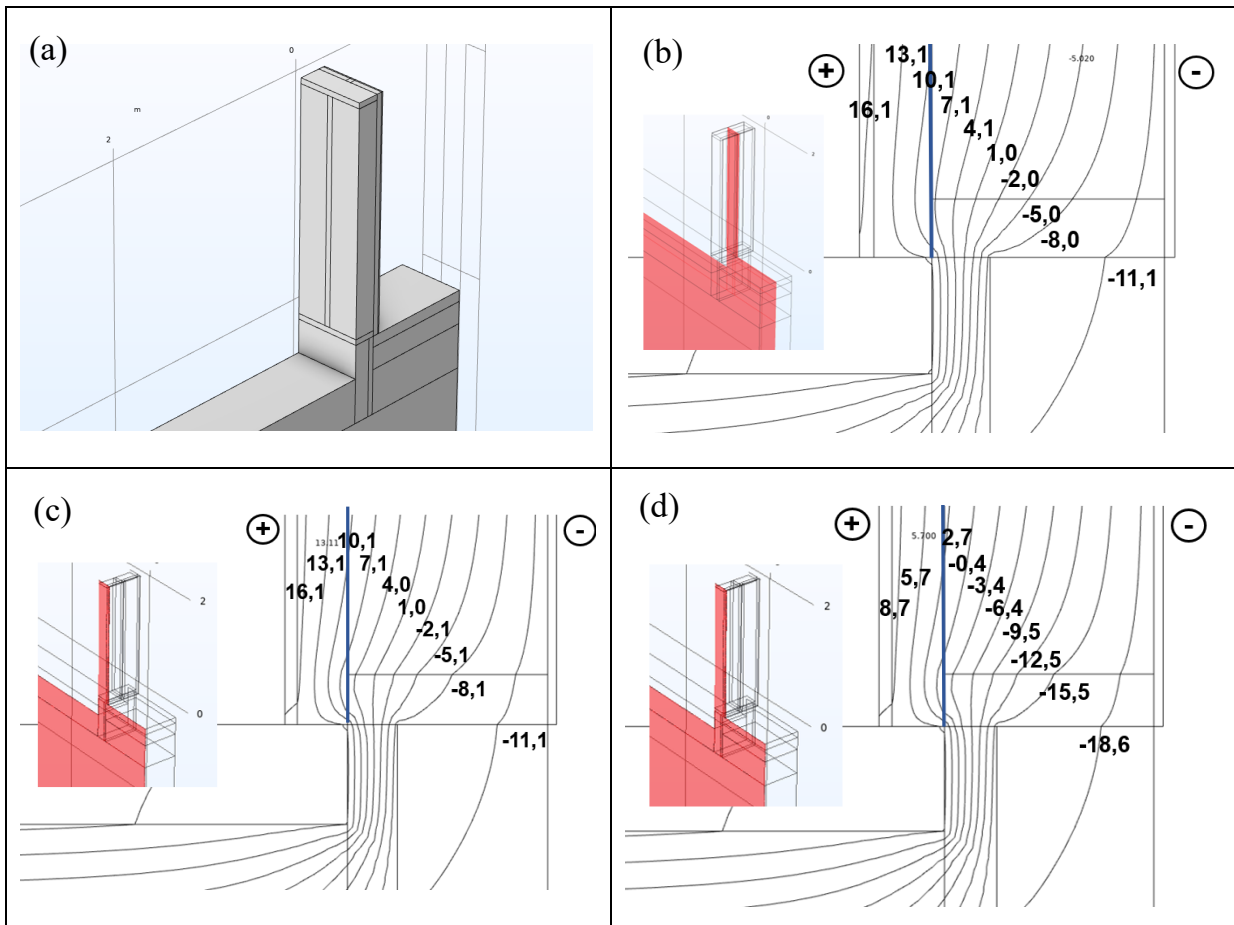
$$\Gamma = 100 * (R_{ext}/R_t) \quad (3)$$

missä R_{ext} = tarkastelupisteen ja rakenteen ulkopinnan välinen lämmönvastus ($(\text{m}^2\text{K})/\text{W}$)
 R_t = rakenteen kokonaislämmönvastus ($(\text{m}^2\text{K})/\text{W}$)

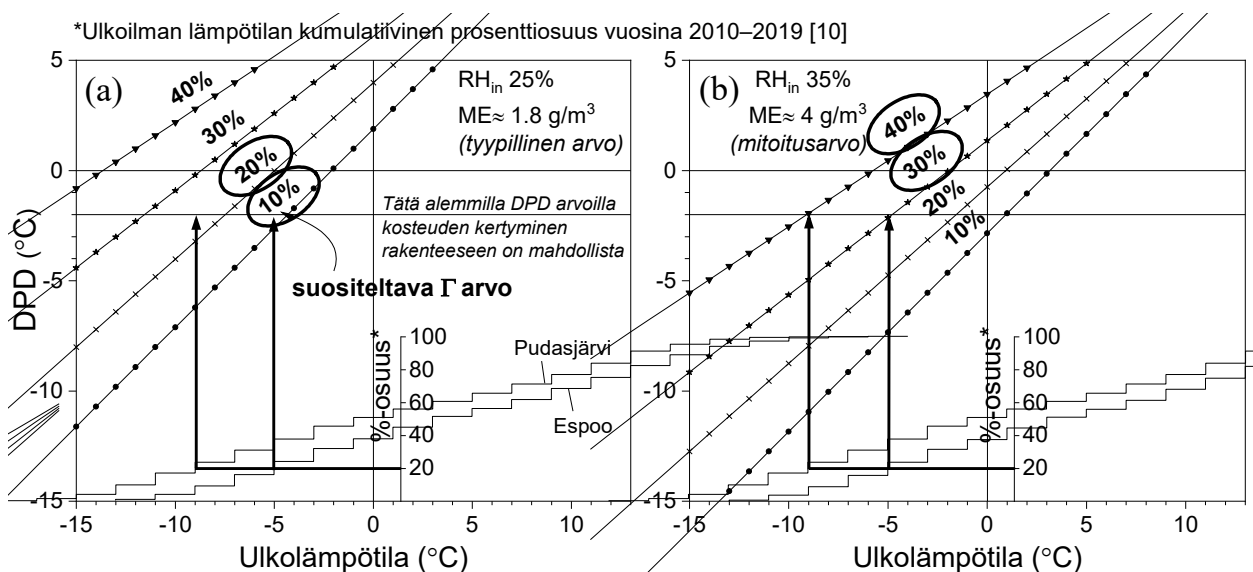
Lämmönvastussuhteen arvo puurungon ulko-osassa on noin 1 %, jos rakenteen tuulensuojana käytetään esimerkiksi kipsilevyä. Hyvin eristetyissä ulkoseinissä, joiden U -arvo on $0,12\ \text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ja joissa on 50 mm paksuinen mineraalivillatuulensuoja, lämmönvastussuhde on noin 20 %. Mitä suurempi lämmönvastussuhde on, sitä kosteusturvallisempi rakenne on ilmavuotojen kannalta. Konvektiokokeiden perusteella rakenne, jonka lämmönvastussuhde on 1 %, on herkkä vaurioitumaan ilmavuodosta, sillä suhteellinen kosteus tuulensuojan sisäpinnassa on ilman konvektiivista kosteuttakin korkea seuraten ulkoilman tasoa [1]. Niinpä työnaikaisen laadunvarmistuksen rooli korostuu, mikäli tuulensuojan lämmönvastussuhde on tätä luokkaa.

Suomessa ilmavuodot voivat aiheuttaa kosteuden kertymistä kipsilevytuulensuojalla toteutettuun ulkoseinään vuosittain 4–7 kuukauden ajan [1]. Tutkimustulosten perusteella on suositeltavaa käyttää tuulensuojan lämmönvastussuhteena vähintään arvoa 10 % [1], joka kuvan 3a mukaan olisi riittävä Etelä-Suomessa, mutta Pohjois-Suomessa arvon pitäisi olla vähintään 20 % [1]. Kuvassa 3a on sisäilman kosteus 25 % vastaten talvikautta ja kosteuslisä on $1,8\ \text{g}/\text{m}^3$. Tällöin ilmavuodoista johtuva nopea kosteuden kertyminen rakenteeseen on mahdollista enintään 2,5 kuukauden aikana vuosittain. Mikäli sisäilman kosteuslisänä käytetään mitoitusarvoa $4\ \text{g}/\text{m}^3$, ja sisäilmalle suhteellista kosteutta 35 %, edellyttäisi tämä tuulensuojalta 30 % (Etelä-Suomi) tai 40 % (Pohjois-Suomi) lämmönvastussuhdetta kosteuden kertymisen rajoittamiseksi vastaavalla

tavalla (kuva 3b). Kosteuslisän arvolla 5 g/m^3 tuulensuojan lämmönvastussuhteen tulisi olla 40 % (Etelä-Suomi) tai 50 % (Pohjois-Suomi).



Kuva 2. Esimerkki (a) DPD-jakauman 3-ulotteisesta laskentamallista puurunkoisen ulkoseinän alapohjaliittymässä. Tuulensuojakipsilevy on piilotettu kuvasta; (b) DPD-jakauma pystyrungon kohdalla, kun sisäilman olosuhteet ovat $21 \text{ }^\circ\text{C}$ ja 30 %; (c) kuten b-kuva, mutta tarkastelukohta lämmöneristeen keskilinjalla; (d) kuten c-kuva, mutta sisäilman suhteellinen kosteus on 50 %.



Kuva 3. Tuulensuojan lämmönvastussuhteen mitoituskäyrästä (a) kosteuslisällä $1,8 \text{ g/m}^3$ ja (b) kosteuslisällä 4 g/m^3 [1]. Käytetty CC BY 4.0 lisenssin luvalla.

6. Yhteenveto

Ilmavuodot voivat aiheuttaa vakavia vaurioita puurakenteisiin ulkoseinä- ja yläpohjarakenteisiin. Tässä artikkelissa on käsitelty peruseriäitä, joilla suunnittelussa voidaan pyrkiä estämään sisäilman kosteuskonvektion haitalliset vaikutukset rakennuksen ulkovaipassa.

Kosteuskonvektion vaikutusten arvioinnin vaikeus johtuu ilmiön monimutkaisuudesta, joka korostuu vaikeudesta määrittää numeerisesti rakenteen sisäinen virtauskenttä riittävällä tarkkuudella. Kosteuskonvektio onkin tästä syystä aina tapauskohtainen ilmiö, ja sen vaikutukset riippuvat muun muassa rakenteesta, rakennustyön laadusta ja rakennetta ympäröivistä olosuhteista. Ilmavirtaus vaikuttaa sekä rakenteen lämpö- että kosteusjakaumaan, jolloin ilmavirtauksen määrä ja jatkuvuus ratkaisee, syntyykö ilmavuodosta vaurioita rakenteeseen.

Koetulosten perusteella kosteuskonvektio on hyvin eristetyissä ulkovaipparakenteissa yksi merkittävimpiä rasiustekijöitä, joka voi pitkään jatkuessaan johtaa rakenteen kosteus- ja homevaurioihin, vaikka rakenteen ulko-osa olisi vesihöyryavoin. Tulokset korostavat rakenteen sisäosan ilmansulun suunnittelun ja toteutuksen sekä toisaalta tuulensuojan riittävän lämmöneristävyyden tärkeyttä. Ohjeellinen vähimmäisarvo puurunkoisen ulkovaipparakenteen tuulensuojan lämmönvastussuhteelle on Etelä-Suomessa 10 % ja Pohjois-Suomessa 20 % tavanomaisella sisäilman kosteustasolla.

Lähdeluettelo

- [1] Viljanen, K., Puttonen, J. ja Lü, X. 2022. Hygrothermal performance of highly insulated external walls subjected to indoor air exfiltration. *Journal of Building Physics* 46(2), 121-175.
- [2] Kalamees, T., Vinha, J. ja Kurnitski, J. 2006. Indoor humidity loads and moisture production in lightweight timber-frame detached houses. *Journal of Building Physics* 29(3), 219-246.
- [3] Schoen, C. 2005. A new empirical model of the temperature–humidity index. *Journal of Applied Meteorology* 44(9), 1413-1420.
- [4] Desmarais, G., Derome, D. ja Fazio, P. 2000. Mapping of air leakage in exterior wall assemblies. *Journal of Building Physics* 24(2), 132-154.
- [5] Langmans, J., Klein, R. ja Roels, S. 2012. Hygrothermal risks of using exterior air barrier systems for highly insulated light weight walls: A laboratory investigation. *Building and Environment* 56, 192-202.
- [6] Ojanen, T. ja Kumaran, M.K. 1995. Effect of exfiltration on the hygrothermal behavior of a residential wall assembly: Results from calculation and computer simulations. *International symposium on moisture problems in building walls*, Porto, Portugal, 11–13 September 1995, pp.157–167.
- [7] Forest, T.W. 1989. Moisture transfer through walls. 4th international conference on thermal performance of the exterior envelopes of whole buildings, Florida, USA, 4–7 December 1989.
- [8] Viljanen, K. 2023. Puurunkoisten, mineraalivillaeristeisten ja vähän lämpöä läpäisevien seinä- ja kattorakenteiden lämpö- ja kosteustekninen toiminta. Väitöskirja. Aalto-yliopisto.
- [9] Lehtinen, T. ja Lehtonen, H. 1997. Rakennusfysikaalisen mitoituksen kehittäminen: puurankaisten ulkoseinien kosteustekninen mitoitusmenetelmä. Teknillinen korkeakoulu, Espoo.
- [10] Ilmatieteenlaitos. 2019. Havaintojen lataus. Viitattu 20.12.2019. Saatavilla: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus#!/>

Rakentamisen Topten-käytännöt Rakennustarkastusyhdistyksen uudella verkkosivualustalla

Emilia Tommila¹, Markku Hienonen² ja Risto Levanto³

¹ Tampereen kaupunki ja Topten-alustan kehittämishanke

² Rakennustarkastusyhdistys RTY

³ Vantaan kaupunki ja Rakennustarkastusyhdistys RTY

Tiivistelmä

Rakennusvalvontojen sekä rakennusalan toimijoiden yhdessä laatimien Rakentamisen Topten-käytäntöjen tavoitteena on tukea rakentamiseen liittyvän lainsäädännön soveltamistyötä, edistää hyvää rakentamistapaa, yhdenmukaistaa rakennusvalvontojen lupa- ja tarkastusmenettelyihin liittyviä käytäntöjä sekä samalla parantaa rakennusvalvontapalvelun ennakoitavuutta asiakkaan suuntaan. Käytännöt on kirjattu kortiston muotoon. Ilmaisen verkkopalveluna jaettava kortisto käsittää runsaat 80 erilaista asiakirjaa, joita rakentamisen lupa- ja katselmuustoiminnasta vastaavat viranomaiset, rakennushankkeisiin ryhtyvät, rakennusten suunnittelusta ja toteuttamisesta vastaavat tahot sekä muut rakennusalan toimijat voivat hyödyntää.

Päättymäisillään olevassa, valtiovarainministeriöltä digikannustinrahoitusta saaneessa hankkeessa kortistopalvelua on kehitetty ja sen ilmettä on uudistettu. Uudistustyön yhteydessä kortiston omistajuus ja hallinnointi on siirretty Helsingin, Espoon ja Vantaan kaupungeilta Rakennustarkastusyhdistys RTY:lle. Lokakuun alussa julkaistavaan uudistettuun Topten-kortistoon pääsee tutustumaan Rakennustarkastusyhdistyksen verkkosivujen kautta tai suoraan osoitteessa www.toptenrava.fi.

1. Johdanto

Osa rakentamista ohjailevasta sääntelystä sisältää väljyyttä, jotta sitä olisi mahdollista soveltaa joustavasti erilaisissa tilanteissa. Säädöstekstiin ei liene tarkoituksenmukaista kirjoittaa auki, selittää tai määritellä yksityiskohtaisesti kaikkia niissä käytettyjä käsitteitä, eikä säädöksiä laatiessa myöskään ole mahdollista ennustaa etukäteen kaikkia niitä tilanteita, joita yksityiskohtaisissa lain soveltamistilanteissa voi tulla eteen. Varsin usein lait ja asetukset osoittavatkin vain ne raamit, joiden sisällä rakentamisessa on toimittava. Niiden lisäksi tarvitaan yksityiskohtaisempia lain soveltamiseen liittyviä ohjeita sekä niitä täydentäviä, rakennusalan toimijoiden yhteisesti sopimia käytänteitä. Uuden rakentamislain voimaan astuessa 1.1.2025 yhteisten käytänteiden tarpeen uskotaan entisestään lisääntyvän. Tässä artikkelissa esitellään maankäyttö- ja rakennuslakia, maankäyttö- ja rakennusasetusta, rakentamismääräyskokoelmaan kuuluvia asetuksia, niiden perustelumuiotioita sekä niitä koskevia ympäristöministeriön ohjeita täydentävien Rakentamisen Topten-käytäntöjen tarkoitus sekä käytäntöjen laatimiseen liittyvä prosessi. Lisäksi tässä artikkelissa kerrotaan päättymäisillään olevan Topten-alustan kehittämishankkeen tavoitteista ja tuloksista.

2. Rakentamisen Topten-käytännöistä

Rakentamisen Topten-käytännöissä on kyse kuntien rakennusvalvontojen ja rakennusalan toimijoiden yhdessä laatimista käytännöistä, joiden tavoitteena on mm. tukea rakentamista ohjailevan lainsäädännön soveltamistyötä, edistää hyvää rakentamistapaa, yhdenmukaistaa

rakennusvalvontojen lupa- ja tarkastusmenettelyihin liittyviä käytäntöjä sekä samalla parantaa rakennusvalvontapalvelun ennakoitavuutta asiakkaan suuntaan. Käytännöt on kirjattu kortiston muotoon.

Ilmaisen verkkopalveluna jaettava kortisto käsittää tällä hetkellä runsaat 80 erilaista asiakirjaa, joita rakentamisen lupa- ja katselmustoiminnasta vastaavat viranomaiset, rakennushankkeisiin ryhtyvät, rakennusten suunnittelusta ja toteuttamisesta vastaavat tahot sekä muut rakennusalan toimijat voivat hyödyntää. Kortistosta suurin osa koostuu rakentamisen lainsäädäntöä täsmentävistä *tulkintakorteista*. Tulkintakorteissa on esitetty yksi mahdollinen käytäntö tai ratkaisu, jota sovellettaessa on huomioitava rakennushankkeen erityispiirteet. Myös muita ratkaisuja voi käyttää, jos ne täyttävät rakentamista koskevat säännökset ja ovat hyvän rakentamistavan mukaisia. Lisäksi kortistossa on esim. hyvään ja laadukkaaseen rakentamista kannustavia, tai vaikkapa rakennuslupaprosessin ja sitä seuraavan katselmusvaiheen kulusta ja asiakkaalta edellytettävistä toimenpiteistä kertovia *ohjekortteja*. Kortistoon kuuluu myös erilaisia *lomakemuotoisia kortteja*, joita rakennusvalvonnan asiakkaat voivat täyttää ja tallentaa rakennuslupa-asioidensa liiteasiakirjoiksi rakennusvalvontojen sähköisiin asiointijärjestelmiin.

Vaikka kortiston nimi viittaa löyhästi kymmeneen suurimpaan, ja vaikka korttien valmistelutyö tehdään valtaosin kymmenen suurimman kaupungin yhteistyönä, kortistoa voivat hyödyntää omassa neuvonta- ja ohjaustyössään kaikki halukkaat kunnat. Kortistoa on tällä hetkellä ilmoittanut hyödyntävänsä 35 erikokoista (2 161–664 028 as. [1]) ja toimintaympäristöltään hyvinkin erilaista kuntaa: Helsinki, Espoo, Tampere, Vantaa, Oulu, Turku, Jyväskylä, Kuopio, Lahti, Pori, Kouvola, Joensuu, Lappeenranta, Vaasa, Lohja, Tuusula, Rauma, Kerava, Kaarina, Raasepori, Mäntsälä, Valkeakoski, Naantali, Akaa, Forssa, Janakkala, Ylivieska, Uusikaupunki, Kalajoki, Kauniainen, Masku, Tammela, Jokioinen, Ypäjä ja Humppila. Kuntakäyttäjien lisäksi myös rakennusvalvonnan asiakkaat ovat löytäneet kortiston: vanhalla toptenrava.fi-verkkosivustolla on vierailut kuukausittain 8 000–10 000 kävijää, ja korttiliitetiedostojen latauksia on tehty kuukausittain 15 000–25 000 kpl.

Topten-kortiston historia juontaa juurensa vuonna 2009 alkaneesta pääkaupunkiseudun kuntien – Helsingin, Espoon, Vantaan ja Kauniaisen – rakennusvalvontojen yhdessä laatimista käytännöistä, jotka tunnettiin PKS-kortiston nimellä. Kun kymmenen suurimman kaupungin rakennusvalvontapäälliköiden yhteistyö alkoi tiivistyä 2010-luvun alkupuolella, huomattiin, että samantapainen kortisto voitaisiin laatia myös kymmenen suurimman kaupungin tulkintojen ja käytäntöjen yhtenäistämiseksi. Tämän mandaatin turvin Topten-kortiston syntyä lähti edistämään asiasta ammatillisesti erittäin innostunut, alkujaan Vantaan kaupungin rakennusvalvonnassa työskennellyt ja nykyisin Espoon kaupungin ympäristö- ja rakennusvalvontakeskuksen johtajana toimiva diplomi-insinööri *Pasi Timo*. Timon henkilökohtainen työpanos ja näkemys on toiminut kantavana voimavarana yhteisen kortiston luomisessa sekä kortistotyöskentelyn kehittämisessä. Ensimmäinen ”Topten”-nimen alla laadittu, kantavien rakenteiden laatusuunnitelmaa koskeva kortti julkaistiin virallisesti vuoden 2017 lopulla pksrava-verkkosivulla. Kesäkuussa 2021 verkkosivusto vaihtoi nimekseen toptenrava.

3. Topten-alustan kehittämishanke

Rakentamisen yhteisten Topten-käytäntöjen digitaalisen tuotanto- ja julkaisualustan kehittämishanke, myöhemmin ”Topten-alustan kehittämishanke”, käynnistyi vuoden 2021 lopulla ja päättyi loppuvuodesta 2023. Hanke toteutetaan kymmenen suurimman kaupungin (Helsinki, Espoo, Tampere, Vantaa, Oulu, Turku, Jyväskylä, Kuopio, Lahti ja Pori) yhteistyönä. Topten-

alustan kehittämishankkeessa tehdään yhteistyötä myös Rakennustarkastusyhdistys RTY ry:n kanssa. Hanketta koordinoi Tampereen kaupunki. Valtiovarainministeriö on myöntänyt hankkeelle digikannustinrahoitusta 205 000 €. Kuntien rahoitusosuus hankkeessa on 105 000 €, ja hankkeen kokonaisbudjetti on 310 000 €.

Hankkeessa luodaan (1) uusi verkkosivupohjainen julkaisualusta Topten-kortistolle sekä (2) siitä erillinen, Microsoft Teams -pohjainen tuotanto- ja organisaatioalusta korttien valmistelu- ja hyväksymistyölle. Hanke sisältää myös muita työpaketteja, kuten uusien Topten-korttien laadintatyötä. Hankkeen myötä Topten-kortiston omistajuus ja hallinnointi siirtyvät Helsingin, Espoon ja Vantaan kaupungeilta Rakennustarkastusyhdistys RTY ry:lle (myöhemmin RTY).

RTY on yhdistys, joka toimii kuntien rakennusvalvontahenkilöstön välisenä yhdyssiteenä, tekee työtä rakennusvalvontaan kuuluvien alojen ja toimintatapojen kehittämiseksi ja yhdenmukaistamiseksi sekä edistää jäsentensä ammatillista kehitystä [2]. RTY:n ja Topten-kortiston välisen yhteenliittymän toivotaan vahvistavan kortiston asemaa kaikkien Suomen kuntien yhteisenä tulkintakortistona sekä parantavan palvelukokonaisuuden näkyvyyttä ja vaikuttavuutta. Tavoitteena on, että yhä useampi kunta ottaisi visuaaliselta ilmeeltään, käytettävyydeltään ja saavutettavuudeltaan parannellun kortiston käyttöönsä uudessa, RTY:n yhteyteen sijoittuvassa verkkosivuympäristössä.

Topten-alustan kehittämishankkeessa tavoitteena on ollut:

- Luoda kortiston käyttäjille visuaaliselta ilmeeltään uudenaikainen ja selkeä, käytettävyydeltään hyvä, saavutettava, mobiiliskaalautuva ja tietoturvallinen verkkopalvelu. Lisäksi täsmentää, rakenteistaa ja rikastaa korttien tietosisältöä siten, että tieto on helpommin löydettävissä ja hyödynnettävissä.
- Tehostaa palveluun liittyvää asiakasviestintää ja parantaa sen näkyvyyttä/vaikuttavuutta.
- Minimoida toimittajariskejä. Siirtyä yksittäisen kehittäjäkumppanin järjestelmästä yleisesti käytössä olevaan järjestelmätuotteeseen, jolla on riittävän pitkä elinkaari ja laaja kehittäjäverkosto, ja joka on teknisiltä ominaisuuksiltaan oletusarvoisesti monipuolinen ja/tai helposti muokattavissa oleva.
- Helpottaa korttien julkaisutyötä. Toteuttaa alusta sellaisella järjestelmällä, jossa sisällöntuotanto on sujuvaa ja nopeaa, ja joka tarjoaa työkalut sisällön elinkaaren ja rakenteen hallintaan sekä tukee metatietoluokiteltujen sisältöjen ylläpitoa ja esittämistä.
- Helpottaa ja täsmentää korttien laadinta- ja hyväksymistyötä sekä parantaa valmistelutyön läpinäkyvyyttä.

3.1 Uusi verkkosivupohjainen julkaisualusta Topten-kortistolle

Hankkeessa vanha, teknisen käyttö- ja ylläpitoikänsä loppupäähän tullut toptenrava.fi-alusta korvataan lokakuussa 2023 uudella verkkosivupohjaisella julkaisualustapalvelulla. Helmikuussa 2022 tehdyn käyttäjäkyselyn perusteella vanhojen verkkosivujen haasteiksi tunnistettiin esim. vanhentunut ja epäviralliselta näyttänyt ilme, saavutettavuuteen ja löydettävyyteen liittyvät epäkohdat, tiedon rakenteellisuuden puute, nykyaikaisten viestintä/markkinointikanavien puute, asiakaspalautekanavan puute sekä puutteelliset tai vaikeakäyttöisiksi koetut haku- ja suodatustoiminnallisuudet.

Aikaisempi, alkuvuodesta 2010 syksyyn 2023 käytössä ollut verkkosivutoteutus nojasi korttien julkaisemiseen erillisinä (pääosin) pdf-muotoisina liitetiedostoina, jotka eivät useinkaan täyttäneet nykyaikaisia saavutettavuusvaatimuksia. Uudella alustalla erillisistä

korttiliitetiedoista on luovuttu ja voimassa olevat kortit on toteutettu muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta kokonaan verkkosivupohjaisesti niin, että sisältö on lähtökohtaisesti saavutettavaa. Uudistamistyön yhteydessä korttien rakennetta on täsmennetty ja sisältöjen esittämisen tapaa yhdenmukaistettu, sekä korttiin liittyviä metatietoja (kategoriat, luokat ja asiasanat) rikastettu parempien haku- ja suodatustoiminnallisuuksien mahdollistamiseksi. Kortit ovat myös saaneet tietosisällön ”silmäiltävyyttä” helpottavat sisällysluettelot, minkä lisäksi niihin on kytketty korttikohtainen palautteenantomahdollisuus. Kortisto on saanut uudella alustalla myös RTY:n organisaatioilmeeseen sovitettua, uuden visuaalisen ilmeen sekä oman tunnistettavan Topten-logon. Uudistamistyössä on myös kiinnitetty erityistä huomiota palvelun mobiilikäytettävyyteen, tietoturvallisuuteen ja tietosuojanäkökohtiin.

Kortisto jäsenyyden uudella alustalla samaan tapaan kuin vanhalla: tulkintakortit maankäyttö- ja rakennuslain lukujen ja pykälien mukaiseen järjestykseen sekä ohje- ja lomakekortit ns. ammattialan mukaiseen järjestykseen. Jokaisella kortilla on 2–3 osainen tunniste, joka koostuu MRL:n mukaisesta pykälänumerosta (tulkintakortit, esim. 115) tai ammattialatunnisteesta (ohje- ja lomakekortit, esim. ARK), juoksunumerosta (esim. 01) sekä lisäksi mahdollisesta versiotunnisteesta (esim. B). Kortiston jäsentymisen tapa tulee uudelleen arvioitavaksi siinä vaiheessa, kun rakentamislain mukaisia uusia kortteja aletaan valmistella.

Uudella alustalla on haluttu mahdollistaa aikaisemmasta poiketen vanhentuneiden korttien/korttiversioiden selaaminen. Tämä tapahtuu *voimassa olevasta kortistosta* erillisen *korttiarkiston* puolella. Palvelulla on arkistollista arvoa, mutta sen tyypillisin käyttötapaus liittyy tilanteisiin, joissa kortista julkaistaan uusi versio rakennushankkeen ollessa kesken. Rakennushankkeilla voi olla verrattain pitkä elinkaari (aina suunnittelun aloittamisesta luvan hakemiseen ja edelleen loppukatselmointiin saakka) ja viranomaistoiminnan näkökulmasta käytäntönä on, että hankkeen ohjauksessa sovelletaan alusta loppuun samoja tulkintoja ja ohjeita – käytännössä niitä, jotka ovat olleet voimassa rakennuslupa-asian vireille tullessa. Tällöin sekä rakennushankkeen ryhtyvän ja hänen edustajiensa, että rakennushankkeen viranomaisvalvonnasta vastaavien tahojen etuna on, että aikaisempiin ohjeisiin voidaan tarvittaessa palata helposti. Korttiarkiston lisäksi uudella alustalla on haluttu mahdollistaa *rakentamislain myötä voimaan astuvien uusien korttien* etukäteinen selaaminen. Palvelun käyttäjät voivat tutustua 2025 vuoden alussa käyttöön otettaviin kortteihin niille varatussa erillisessä listausnäkyvässä sitä mukaa, kun niitä valmistuu.

Varsinaisiin kortisto-osiin tehtyjen kehittämistoimenpiteiden lisäksi hankkeen yhteydessä on pyritty löytämään keinoja asiakasviestinnän parantamiseen. Osana näitä kehittämistoimenpiteitä uudella alustalla on mahdollistettu esim. RSS-syötteiden tilaaminen uutisartikkeleista, alustalla julkaistujen uutisartikkeleiden jakaminen yleisimmässä sosiaalisen median kanavissa sekä uusien korttien/korttiversioiden julkaisemiseen liittyvien sähköpostiheräteviestien tilaaminen. Myös kunnan ilmoittaminen Topten-kortiston käyttäjäksi sekä mahdollisuus toimittaa kuntalogo Topten-kortiston markkinointikäyttöön käy jatkossa kätevästi suoraan verkkosivujen kautta. Lisäksi palvelu on kuvattu Digi- ja väestötietoviraston ylläpitämään Palvelutietovarantoon.

3.2 Kortistotyöskentelyn organisoituminen ja kortistotyöskentelylle kehitetty työtila

Kortistotyöskentelyssä on mukana kaikkiaan noin 250 osallistumisaktiivisuudeltaan erilaista henkilöä, joista suurin osa työskentelee Suomen kymmenen suurimman kaupungin rakennusvalvonnoissa. Kymmenen suurimman rakennusvalvonnan ohella korttityöskentelyyn osallistuu myös muiden kuntien rakennusvalvontaviranomaisia, alue- ja valtiotason viranomaisia, ympäristöministeriön edustajia sekä laaja joukko merkittäviä rakennusalan toimijoita ja järjestöjä: kiinteistöalan yhteistyöjärjestö RAKLI ry, Rakennusteollisuus RT ry, Pientaloteollisuus PTT ry,

Rakennustietosäätiö RTS sr, Rakennustieto Oy, Rakentamisen Laatu RALA ry, Suunnittelu- ja konsultointialan yritysten toimialajärjestö SKOL ry, Arkkitehtitoimistojen liitto ATL, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Rakennusinsinöörit ja -arkkitehdit RIA ry sekä Rakennustarkastusyhdistys RTY ry.

Korttien valmisteluorganisaatio jäsenyytensä kahdeksaan ammattialaan, joista jokaisella on oma ohjausryhmänsä ja sen alaiset kortteja valmistelevat työryhmät. Ohjausryhmät ovat luonteeltaan staattisia, mutta työryhmät dynaamisia - uusia työryhmiä perustetaan uusien korttiaiheiden mukaisesti. Ammattialakohtaisia ohjausryhmiä ovat:

- ARK Pääsuunnittelu ja arkkitehtuuri
- RAK Rakennetekniikka
- TATE Talotekniikka (aikaisemmin LVI)
- PALO Paloturvallisuus
- KORRAK Korjausrakentaminen
- HIILI Hiilijalanjälki ja kiertotalous
- TIEMA Tietomallit
- LAKI Yleiset lainopilliset kysymykset

Ammattialakohtaisten ohjausryhmien lisäksi organisaatioon kuuluu niitä johtava, Suomen kymmenen suurimman kaupungin rakennusvalvontayksiköiden päälliköistä koostuva johtoryhmä. Johtoryhmän tehtävänä on hyväksyä kortin aihe, varmistaa riittävät henkilöresurssit sen laatimiseksi sekä antaa valmistelutehtävä ammattialakohtaiselle ohjausryhmälle. Johtoryhmä myös hyväksyy valmiin korttiluonnoksen (tai tarvittaessa palauttaa sen takaisin valmisteltavaksi) ja siirtää sen vahvistettavaksi ja verkkosivuilla julkaistavaksi. Kortin vahvistamisesta ja julkaisemisesta uudella alustalla päättää kortiston omistajuudesta ja hallinnoinnista vastaavan Rakennustarkastusyhdistyksen johtokunta. Topten-organisaatioon kuuluu myös sen jäsenhallinnasta sekä korttien julkaisutyöstä vastaava pieni ylläpitoryhmä.

Työryhmien jäsenet ovat tehneet korttien valmistelutyötä pääosin palavereissa, jonka jälkeen luonnoksia on yleensä jatkokehitetty sähköpostikeskusteluihin. Lisäksi koko Topten-organisaatiolla on ollut tapana kokoontua vuosittain yhteisille, yleensä kaksipäiväisille live-seminaaripäiville suorittamaan intensiivisempää valmistelutyötä työryhmissä sekä esittelemään lähiaikoina valmistuneita tai valmistumassa olevia kortteja organisaation muille jäsenille. Korttien valmistelu- ja hyväksymistyön helpottamiseksi sekä toiminnan läpinäkyvyyden parantamiseksi Topten-organisaatiolle päätettiin luoda yhteinen Microsoft Teams -pohjainen työtila Topten-alustan kehittämishankkeen yhteydessä. Lokakuun lopulla 2023 käyttöönotettavasta työtilasta löytyvät reaaliaikaiset ammattiala- ja työryhmäkohtaiset viestintä- ja tuotantokanavat, sekä omat kanavat johtoryhmälle ja työtilan ylläpitäjille. Lisäksi työtilassa on yhteinen yleiseen organisaatioviestintään keskittyvä kanava, josta jäsenet löytävät esim. hankkeen yhteydessä tuotetut korttien laatimis-, hyväksymis- ja kumoamisprosessien kuvaukset sekä korttien laatimistyötä tukevat ohjeet. Niitä ylläpidetään työtilassa samaan tapaan kuin esim. työryhmien jäsenlistausta sekä listausta korttityöskentelyyn mukaan ilmoittautuneista kunnista ja yhteistyökumppaniorganisaatioista.

4. Yhteenvedo

2010-luvun puolivälin paikkeilla virinneellä ja sittemmin runsaat 80 asiakirjaa kattavaksi kokonaisuudeksi kasvaneella, rakennusalan toimijoiden yhteistyössä laatimalla Topten-kortistolla on pyritty vuosien saatossa täydentämään ja täsmentämään rakentamiseen liittyvää lainsäädäntöä.

Alkujaan kymmenen suurimman kaupungin toiveista ja tarpeista käyntiin lähtenyttä kortistoa hyödyntää tällä hetkellä ohjaus- ja neuvontatyössään jo 35 erikokoisen ja toimintaympäristöltään erilaisen kunnan rakennusvalvontaviranomaiset. Sitä kautta kortisto on tullut tutuksi myös suurelle joukolle hankkeeseen ryhtyviä, suunnittelijoita ja työnjohtajia. Lainsäädännön jättämiä väljyyksiä ja katvealueita paikkaavalle, rakennusvalvontojen lupa- ja tarkastusmenettelyjä yhdenmukaistavalle sekä palvelun ennakoitavuutta parantavalle työlle uskotaan riittävän kysyntää myös jatkossa, ehkä jopa entistä enemmän, kun uusi rakentamislaki (toistaiseksi julkaisemattomine) useine asetuksineen astuu voimaan vuoden 2025 alussa.

Vuoden 2021 lopulla käynnistyneessä ja nyt päättymäisillään olevassa Topten-alustan kehittämishankkeessa Topten-kortistoa on jatkokehitetty, ja se on saanut uuden ilmeen ja sijainnin Rakennustarkastusyhdistys RTY:n palvelukokonaisuuden yhteydestä. RTY:n ja Topten-kortiston välisen uuden yhteenliittymän toivotaan vahvistavan käsitystä yhteisesti sovittujen käytäntöjen hyödyllisyydestä ja tarpeellisuudesta rakentamisen alalla sekä viestivän siitä, että yhteistyössä laadittu kortisto on kaikkien Suomen kuntien vapaasti hyödynnettävissä. Yhteenliittymän toivotaan myös parantavan palvelukokonaisuuden löydettävyyttä, näkyvyyttä ja vaikuttavuutta.

Topten-alustan kehittämishankkeessa kortistolle on pyritty luomaan käyttäjäystävällisyydeltään ja teknisiltä ominaisuuksiltaan paranneltu, nykyaikaiset saavutettavuusvaatimukset täyttävä julkaisualusta, joka mahdollistaa myös aiempaa tehokkaamman asiakasviestinnän. Uudella julkaisualustalla on haluttu mahdollistaa myös vanhentuneiden korttien/korttiversioiden selaaminen sekä rakentamislain myötä voimaan astuvien korttien etukäteinen selaaminen palvelun käyttäjien toimesta. Hankkeen yhteydessä on lisäksi luotu julkaisualustasta erillinen, keskitetty tuotanto- ja organisaatioalusta. Sen toivotaan helpottavan ja yhdenmukaistavan korttien valmistelu- ja hyväksymistyötä, ja lisäävän niiden läpinäkyvyyttä. Molemmat alustat on tarkoitus julkaista ja ottaa käyttöön lokakuussa 2023. Se, miten hyvin hanke lopulta onnistuu kaikissa tavoitteissaan, tulee arvioitavaksi vasta kun käyttäjäkokemusta uusilta alustoilta kertyy riittävästi.

Lähdeluettelo

- [1] Asukasluku 31.12.2022. Tilastokeskuksen verkkosivut. Saatavilla: https://statfin.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__vaerak/statfin_vaerak_pxt_11ra.px/
- [2] Rakennustarkastusyhdistyksen strategia. Ladattavissa: https://www.rakennustarkastusyhdistys.fi/wp-content/uploads/2022/01/RTY_Strategia_2019-2023.pdf

A8. Luonnonmukaiset rakennusmateriaalit ja -tuotteet

Rakeisen materiaalin homehtumisherkkyyssluokan määrittämisen haasteet: homehdutuskokeet savetetulla ja puhtaalla kutterinlastulla

Anna-Mari Pessi¹, Eero Tuominen², Sirkku Häkkilä¹ ja Juha Vinha²

¹ Turun yliopisto, Biodiversiteettiyksikkö

² Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka

Tiivistelmä

ECOSAFE 2 hankkeessa pyrittiin selvittämään kutterinlastun homehtumisherkkyyssluokkaa ja savetuksen vaikutusta kutterimateriaalin homehtumisherkkyyteen. Tutkimus tehtiin Suomalaisen homemallin koejärjestelyä mukaillen. Menetelmää sovellettiin ensimmäistä kertaa rakeiseen materiaaliin. Luokkaa ei saatu määritettyä koska kolmiulotteisen, rakeisen materiaalin homehtuneisuuden visuaalinen arviointi mikroskooppisesti todettiin epävarmaksi. Käsitystä vahvisti homeindeksin ja viljelytulosten välinen selkeä ristiriita.

1. Johdanto

Tutkimuksen tarkoituksena oli vertailla savetetun ja savettamattoman kutterinlastun homehtumisherkkyyttä suomalaiseen homemalliin perustuen. Menetelmä perustuu koekappaleiden nopeutettuun homehduttamiseen homekasvulle optimaalisissa oloissa [1]. Menetelmässä tutkittavat koekappaleet käsitellään homesuspensiolla ja asetetaan korkean suhteellisen kosteuden vakioolosuhteisiin. Homeen kasvua koekappaleiden pinnoilla seurataan mikroskoopin avulla. Menetelmä on kehitetty materiaaleille, joissa on selkeä pintaosa, jolloin pinnan homekasvun etenemistä voidaan seurata visuaalisesti.

2. Menetelmät

2.1 Tutkittavat materiaalit ja niiden esikäsittely

Testattavina materiaaleina olivat savikäsitelty ja puhdas kutterinlastu, mineraalivillatuulensuojalevy sekä bitumoitu huokoinen puukuitutuulensuojalevy (Taulukko 1). Levyt leikattiin 16 cm² kappaleiksi ja kutterinlastu painettiin tiiviiksi kakuksi muovisiin petrimaljoihin (tilavuus 27 ml, ala 16,6 cm²). Astian vaikutusta kosteuden tiivistymiseen ja kasvuston esiintymiseen ei voitu sulkea pois. Koekappaleet yksilöitiin tussimerkinnällä astian / kappaleen sivuun.

Koeyksiköt kontaminoitiin homesuspensiolla, jossa oli neljää puulle sekä tuulensuojamateriaaleille tyypillistä homesienilajia (*Aspergillus jensenii*, *Penicillium chrysosporium*, *Cladosporium sphaerospermum*, *Paecilomyces variotii* sekä viileää ympäristöä suosiva *Geomyces (Pseudogymnoascus) pannorum*). M2-alustalla (2% mallasuute-agar) kasvatetuista pesäkkeistä kerättiin itiöt nesteeseen, itiömäärä laskettiin laskukammiolla (Bürker) ja valmistetut homeitiösuspensiot yhdistettiin suhteessa 1:1:1:1:1. Suspensiota suihkutettiin satunnaistetusti asetettujen koekappaleiden päälle siten, että laskennallisesti n. 200 000 itiötä leviäisi kullekin koekappaleelle.

2.2 Olosuhdekammiot

Olosuhdekammioina käytettiin tiiviitä, vakioidussa lämpötilassa (olosuhdekaappi, jääkaappi) pidettäviä muovilaatikoita (SmartStore Dry), joissa ilmankosteus säädettiin laatikon pohjalla olevalla kylläisellä suolaliuoksella (25 ± 3 °C: KH_2PO_4 , RH 96,6 % sekä 10 ± 3 °C: KNO_3 , RH 96,5 %). Itiöillä ympätyt koekappaleet asetettiin laatikkoon ritilätelineisiin nestepinnan yläpuolelle, satunnaistetusti kolmeen eri tasoon. Kaappien ja kammioiden lämpötilaa seurattiin loggereilla. Jääkaappiin sijoitetussa kammiossa lämpötilan vaihtelu / lämpötilaero kammion ja jääkaappitilan välillä aiheutti veden kondensoitumisen kammion kannen sisäpintaan. Osa kutteriastioista kastui toistuvasti laatikon kannesta astiaan tippuneesta vedestä; näiden koeyksiköiden vesiaktiivisuus nousi selkeästi korkeammaksi kuin suolaliuoksella tuotettu ilmankosteus (kondensoitunutta vettä jouduttiin kaatamaan astioista). Kosteuden vaihtelu koeyksiköiden välillä lisäsi tn. kokeen sisäistä vaihtelua. Märkyys myös haittasi mikrobikasvun havaitsemista mikroskopimalla.

Taulukko 1. Koemateriaalit ja koekappaleiden lukumäärät.

Materiaali	25 °C	10 °C
Kutterinlastu (kuusi), savetettu	23	20
Kutterinlastu (kuusi), puhdas	23	20
Tuulensuojalevy, huokolevy, bitumoitua puukuitua	4	4
Tuulensuojalevy, kalvopäällystetty mineraalivilla	4	4

2.3 Homeindeksien määrittäminen

Koeyksiköiden homeindeksi määritettiin visuaalisesti (preparointimikroskoopi; Taulukko 1.) ja niille määritettiin homeindeksi [1] ennen ympäystä sekä n. 14, 28, 140 ja 280 vrk kuluttua kokeen aloituksesta. Kutterinlastu-maljoilta määrittäminen tehtiin vapaalta yläpinnalta, levykappaleet arvioitiin ylä- ja alapinnalta. Indeksimäärittäminen lisäksi kappaleessa / astiassa havaitut rihmasto-alueet kirjattiin läpinäkyvälle muovikalvolle ja itiöinnistä tehtiin muistiinpanot. Tarkastelun jälkeen koekappaleet satunnaistettiin uudelleen telineisiin ja palautettiin olosuhdekammioon.

Taulukko 2. Homeindeksien kuvaukset [2] ja laboratorion käytännöt (Lab.) homeindeksiä määritettäessä.

Homeindeksi M	Havaittu homekasvu	Huomautuksia	Lab.
0	Ei kasvua	Pinta puhdas	a
1	Mikroskoopilla havaittava kasvu	Paikoin alkavaa kasvua, muutama rihma	a
2	Selvä mikroskoopilla havaittava kasvu	Homerihmaston peitto 10 % tutkittavasta alasta (mikroskoopilla). Useita rihmastopesäkkeitä.	b
3	Silmin havaittava / selvä mikroskoopilla havaittava kasvu.	<10 % peitto (silmillä) / <50 % peitto alasta (mikroskoopilla). Uusia itiöitä alkaa muodostua	b
4	Selvä silmin havaittava / runsas mikroskoopilla havaittava kasvu	Yli 10–50 % peitto alasta (silmillä) tai yli 50 % peitto alasta (mikroskoopilla)	b
5	Runsas silmin havaittava kasvu	Yli 50 % peitto alasta (silmillä)	c
6	Erittäin runsas kasvu	Lähes 100 % peitto, tiivis kasvusto	c

^a arvio preparointimikroskoopilla; ^b määräärvio tehtiin preparointimikroskoopilla

^c määräärvio varmistettiin preparointimikroskoopilla

2.4 Vertaaminen viljelytulokseen sekä toteutuneiden lajistusuhteiden määrittäminen

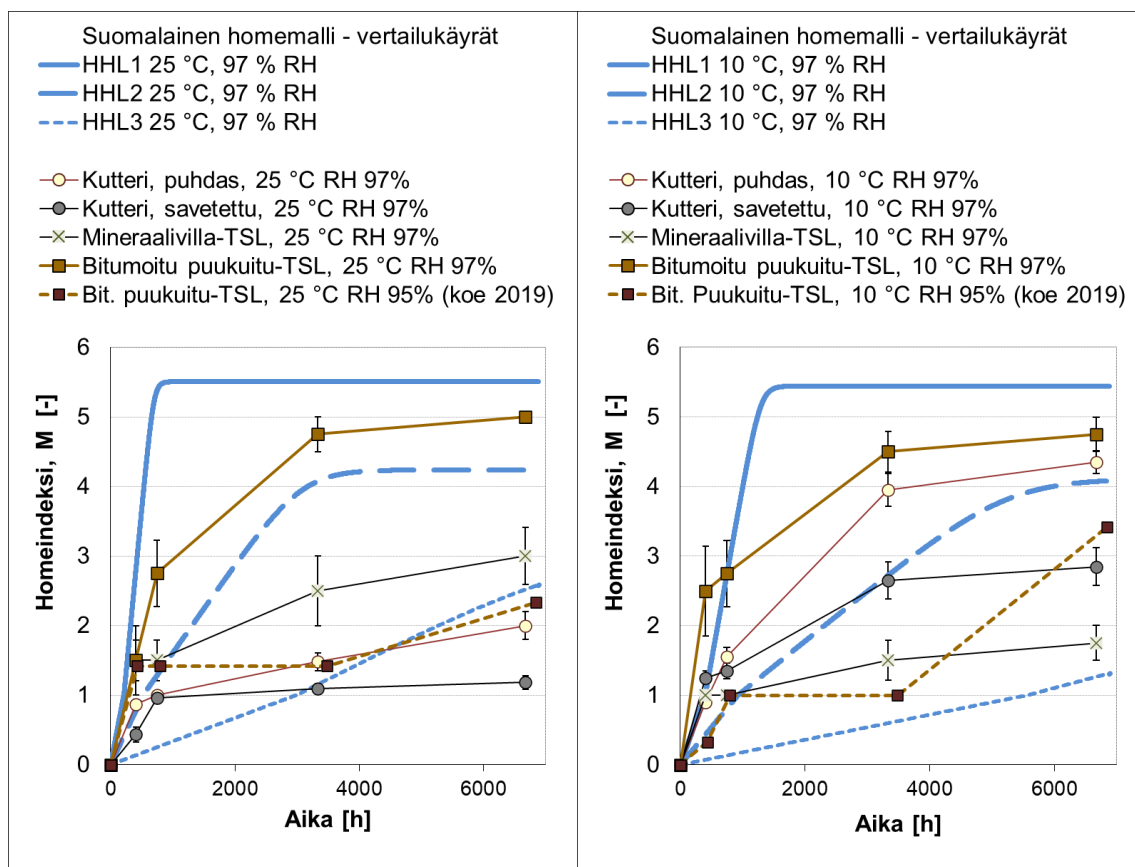
Koetta jatkettiin 9 kk, jonka jälkeen kustakin materiaalista viljeltiin kolme satunnaisesti valittua koekappaletta laimennussarjamenetelmällä [3, 4]. Kasvatusalustoina käytettiin homesienten kasvatukseen tarkoitettuja M2 ja DG18 (dikloraani-glyseroliagar)-alustoja sekä bakteereille ja aktinomykeeteille soveltuvaa THG-alustaa (tryptonihiiuvauute-glukoosi-agar). Tulokset saadaan

pesäkkeen muodostavina yksikköinä / g materiaalia (pmy/g).

3. Tulokset ja pohdinta

3.1 Homeindeksin määrittäminen

Homehtumisen etenemisen havainnointi kolmiulotteisesta, purumaisesta materiaalista preparointi-mikroskoopilla osoittautui sekä suuritöiseksi että epävarmaksi menetelmäksi. Huokoinen ja rakeinen materiaali luo moniulotteisen pinnan, joka vaikeuttaa havainnointia ja moninkertaistaa homeelle otollisen kasvupinnan verrattuna kiinteään pintaan. Tämä ei-toivottu tulos on yhtenevä Asumisterveysasetuksen soveltamisohjeen suoramikroskopointiin liittyvän [3, 4] ohjeistuksen kanssa, jossa huokoinen tai rakeisessa muodossa oleva matriisi on suljettu pois menetelmän epäluotettavuuden takia.



Kuva 1. Kokeessa määritetyt homeindeksit suhteessa Suomalaisen homemallin homehtumisherkkyysluokkaa arvioitaessa käytettäviin vertailukäyriin (HHL1 – HHL3). Kuvaajissa on esitetty lisäksi aiemman testauksen homeindeksit bitumoidun puukuidun osalta (katkoviiva).

Kuvassa 1. on esitetty kokeessa määritetyt homeindeksit suhteessa Suomalaisen homemallin homehtumisherkkyysluokkien vertailukäyriin. Visuaaliseen arvioon perustuen kutterinpurujen homeindeksi jäi 25 °C käsittelyssä matalaksi eikä alkuvaiheessa havaittu homekasvu juurikaan edennyt kokeen jatkuessa. Viileässä (10 °C) homeindeksi nousi kutterinpuruilla korkeammaksi ja ainoastaan mineraalivilla TSL:ssä indeksi jäi matalammaksi kuin lämpimässä. Bitumoidun huokolevy-TSL:n homeindeksi nousi molemmissa lämpötiloissa jo kokeen alkuvaiheessa lähelle M3-luokkaa ja keskiarvo oli loppuvaiheessa lähellä viittä. Huokolevy-TSL:n osalta on esitetty myös aiemmin tehdyn homehtumisherkkyyskokeen tulokset, koska sama levytyyppi oli tässä kokeessa mukana vertailukohteena aiempiin kokeisiin. Aiemman ja nyt testatun puukuitulevyn

indeksikäyrät poikkesivat oleellisesti toisistaan, nyt testatun ollen selkeästi alkuvaiheessa nopeammin nouseva ja myös maksimihomeindeksin osalta suurempi. Tämä voi johtua edellistä testiä lievästi korkeammasta ilmankosteudesta (RH 95% vs. RH 97%), kokeessa käytetystä sienilajistosta tai materiaalikoostumuksen eräkohtaisesta vaihtelusta.

Homehtumisherkkyyssuokkiin jako tehtiin alkuperäisessä Suomalaisen homemallin kehitystyössä [5] homeindeksin kasvunopeuden perusteella huomioiden kasvunopeus välillä $M=0...1$ ja $M=1...3$. Tätä suuremmat arvot huomioitiin homeindeksin maksimia määrittävänä arvona. Nyt tehdyissä kokeissa homeindeksin kasvunopeus $M=0...1$ on sekä savetetulla että puhtaalla kutterinlastulla Suomalaisen homemallin vertailukäyriin nähden erilaista kuin kasvunopeus $M=1...3$. Sama kasvunopeuden taantuminen on havaittavissa 2019 bitumoidun puukuitutuulensuojalevyn tuloksissa, mutta ei nyt tehdyissä kokeissa. O

3.2 Viljelytulokset ja niiden vertailu homeindeksiin

Kokeen tarkoituksena oli määrittää savetetun ja puhtaan kutterinlastueristeen homehtumisherkkyyssuokat. Mikroskopointivaiheessa heräsi epäily tulosten luotettavuudesta ja päätettiin toteuttaa suppea mikrobipitoisuutta ja samojen näytteiden homeindeksiä vertaileva viljelykoe. Vertailun tulokset on esitetty kuvassa 2A. Kokeen lopetusvaiheen homeindeksi ja viljelytulosten välinen yhteys oli ainoastaan tuulensuojalevyjen kohdalla looginen: mineraalivilla-TSL:n homeindeksi jäi molemmissa lämpötiloissa selvästi pienemmäksi kuin bitumoidussa huokolevy-TSL:ssä; samoin sienipitoisuus oli 1–2 kertaluokkaa pienempi. Kutterimateriaaleissa viljelytuloksen ja homeindeksin välinen yhteys oli sen sijaan ristiriitainen: viljelytulos oli vastaava kuin huokolevyssä ($>10^8$ pmy/g) kun taas indeksiluvut olivat matalahkot (1.3 – 3.7). Lisäksi eri lämpötiloissa käsiteltyjen kutterinlastujen homeindeksit erosivat toisistaan, vaikka sienipitoisuudet eivät käytännössä poikenneet toisistaan.

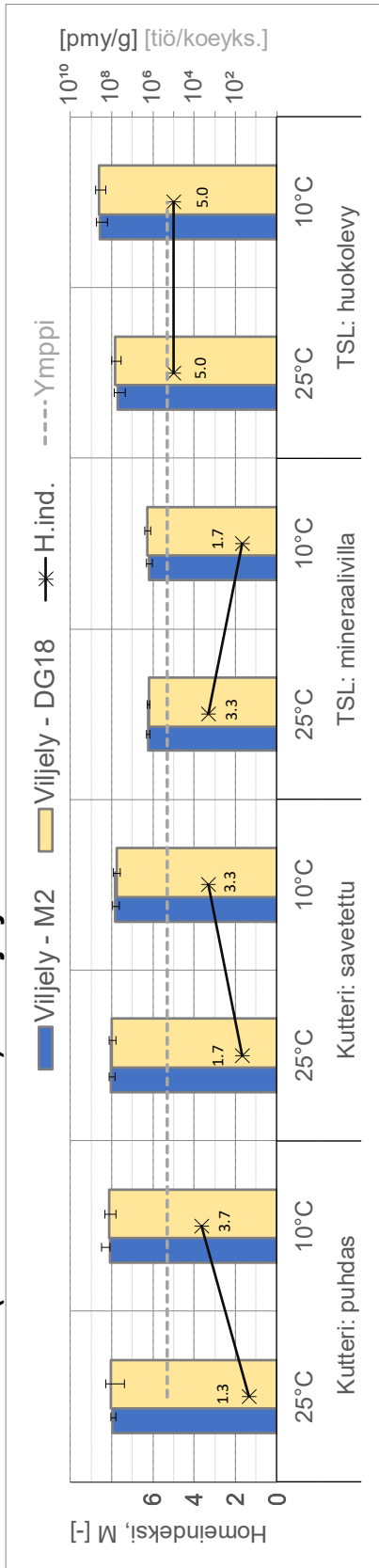
3.3 Lajisto

Viljelyllä havaittiin kaikkia koekappaleisiin ympättyjä sieniryhmiä, mutta viileää kasvuympäristöä suosivaa *Geomyces* -hometta vain 10 °C käsittelyssä. Sellulolyttistä *Paecilomyces variotii* -hometta havaittiin runsastuneena ainoastaan puhtaalla kutterinpurulla lämpimässä kasvatuskäsittelyssä. 10 °C kammiossa, jossa kosteus tiivistyi muovisille maljoille, havaittiin savetetulla kutterilla runsaita määriä tiivistyneelle kosteudelle tyypillisiä hiivasieniä ja hiivamaisiahiivamaisia homeita (*Aureobasidium*, *Phialophora* sukuryhmä). Näitä ei oltu tarkoituksellisesti lisätty materiaaliin. Lisäksi näytteissä havaittiin pieniä määriä *Aspergillus nigri* ja *usti* -lajiryhmien sekä *Mucor*, *Rhizopus* ja *Trichoderma* homeita.

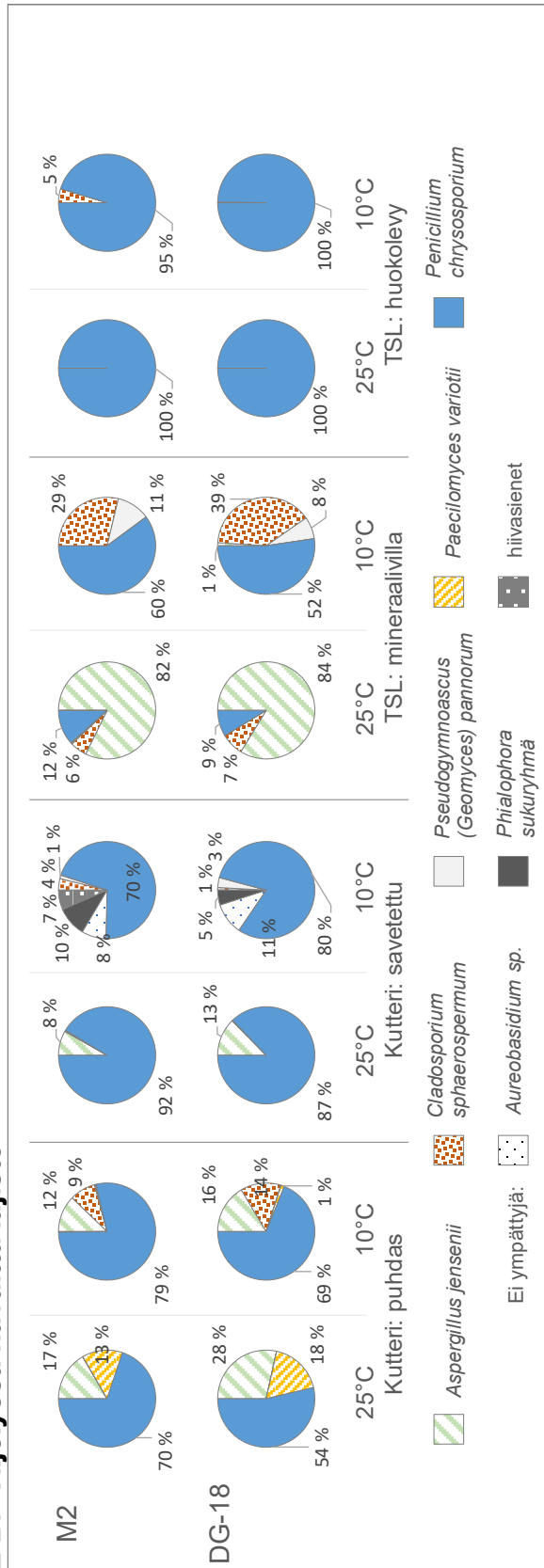
Sienilajiston valikoituminen materiaalin tai lämpötilan mukaan on voinut vaikuttaa homeindeksin määrittämiseen: tummarihmaisen (*Cladosporium*) sienien havainnointi on helpompaa vaalealta materiaalilta ja toisaalta korkeat itiökannattimet (mm. *Aspergillus*, *Paecilomyces* ja *Penicillium* lajeilla) voivat erottua helpommin kiinteältä pinnalta.

Aktinomykeettejä eli sädesienibakteereita ei 14 vrk viljelyn jälkeen havaittu yhdessäkään viljelyssä. Savetetun kutterin oletettiin tuovan lajistoon maaperästä peräisin olevia aktinomykeettejä koekäsittelyyn, mutta oletus osoittautui vääräksi.

2 A. Homeindeksi (visuaalinen arvio) vs. viljely



2 B. Viljelyssä havaittu lajisto



Kuva 2. A) Homeindeksin ja viljelytuloksen (sienipitoisuus M2 ja DG-18 -alustoilla määritettynä) vertailu kokeen päätyessä; keskiarvot molemmista lämpötiläkäsittelyistä kultakin materiaalilta (pmy/g) sekä homeindeksin keskiarvo (H-ind.) samoista koekappaleista (n=3). Käsittelyn alussa koekappaleisiin tuotu itiökontaminaatio (Ympäri, itiö/koeyksikkö) on esitetty katkoviivalla. B) Viljelyssä havaitun lajiston suhteelliset osuudet kultakin materiaalilta ja lämpötiläkäsittelyltä.

Muiden bakteerien pitoisuudet jäivät 25 °C käsittelyssä kaikissa materiaaleissa mataliksi, levymateriaaleissa alle havaintorajan tai ylittäen juuri havaintorajan 90 pmy/g, savetetun kutterin maksimi oli 4 200 pmy/g ja puhtaan 11 000 pmy/g. Viileäkäsittelyssä, jossa kondensaatio nosti materiaalien kosteutta vaihtelivat bakteerimäärät huomattavasti materiaalien ja koeyksiköiden välillä: puhtaan kutterilastun vaihteluväli oli 1,3–58 milj, pmy/g, savetetun 1–9,5 milj pmy/g ja mineraalivillan 490 000 – 82 000 000 pmy/g. Bitumoidussa huokolevy-TSL:ssä levyssä bakteerimäärät jäivät mataliksi (360 – 23 000 pmy/g).

3.4 Menetelmän sovellettavuus jatkossa

Rakeisen materiaalin homehtumisherkkyyssluokan määrittäminen ei ole luotettava nyt sovelletulla menetelmällä. Astian käyttö homehduksenkäsittelyssä ei vastaa materiaalien käyttöä rakennuksessa, kuten ei kutterieristeen kyseessä ollen myöskään ohut, alle senttimetrin kerros materiaalia. Homehduksenkäsittelystä kokonaan poistettava osanäyte, jonka mikroskopoinnissa ei tarvitsisi välttää käsittelyn häiriytymistä, mahdollistaisi tarkemman, lastumaisen materiaalin joka puolelle ulottuvan tarkastelun. Osanäytteillä voitaisiin mahdollistaa myös paksumman materiaalikerroksen käyttö homeindeksin määrittämisessä sekä tukea menetelmän validointia viljelymenetelmän avulla.

4. Yhteenveto

Kokeen tarkoituksena oli määrittää savetetun ja puhtaan kutterinlastueristeen homehtumisherkkyyssluokat. Homeindeksin kehittymisessä havaituista epäjohtonmukaisuuksista, rakeisen materiaalin homehtuneisuuden arviointiin liittyvistä epävarmuuksista sekä homeindeksin ja viljelytulosten välisestä ristiriidasta johtuen koejärjestelyiden eroja ja niiden vaikutusta koetuloksiin tulee arvioida lisätutkimuksilla, eikä nyt saatujen koetulosten perusteella tule tehdä materiaalien jakoa homehtumisherkkyyssluokkiin.

Lähdeluettelo

- [1] Vinha, J., Viitanen, H., Peuhkuri, R., Lähdesmäki, K., Ojanen, T., Salminen, K. 2013. VTT–TTY homemallin toimintaperiaatteet ja käyttö rakenteiden kosteusteknisen toiminnan tarkasteluissa. Rakennusfysiikka 2013, Uusimmat tutkimustulokset ja hyvät käytännön ratkaisut, Seminaarijulkaisu 3, Tampere, 22.–24.10., s. 67-76.
- [2] Viitanen, H., Ojanen, T., Peuhkuri, R., Vinha, J., Lähdesmäki, K., & Salminen, K. (2011). Mould Growth Modelling to Evaluate Durability of Materials. In XII DBMC: International Conference on Durability of Building Materials and Components: Conference proceedings (pp. 409-416). FEUP Edições.
- [3] Valvira. (2016). Asumisterveysasetuksen soveltamisohje Osa IV. Valviran Ohje 8/16. Saatavilla: <http://www.valvira.fi/>
- [4] Pessi, A.-M., & Jalkanen, K. (2018). Laboratorio-opas: mikrobiologisten asumisterveys tutkimuksien näytteenotto ja analyysimenetelmät. Suomen Ympäristö- ja Terveystieteiden Kustannus Oy.
- [5] Vinha, J., Viitanen, H., Lähdesmäki, K., Peuhkuri, R., Ojanen, T., Paajanen, L., Strander, T. ja Iitti, H. Julkaisematon. Rakennusmateriaalien ja rakenteiden homehtumisriskin laskennallinen arviointi

Savetuksen vaikutus mikrobitoimintaan rakennusmateriaaleissa

Ilkka Valovirta¹, Mirja Salkinoja-Salonen², Timo Hokkanen ja Juha Vinha¹

¹ Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka

² Aalto-yliopisto, Sähkötekniikan ja automaation laitos

Tiivistelmä

Tampereen yliopiston johdolla toteutetuissa ECOSAFE-hankkeissa on tutkittu kutterinlastulla eristettyjen rakenteiden toimintaa sekä mitattu perinteisen ja savetetun kutterinlastun ominaisuuksia. Tutkimukset ovat käsittäneet rakennusfysikaalisen mittauksen ja mallinnuksen lisäksi palo-ominaisuuksien, akustisten ominaisuuksien, rakenteiden hiilijalanjäljen ja mikrobiologisen toiminnan laskentaa ja mittausta. Savetuksen vaikutusta materiaaleissa esiintyvien mikrobien aineenvaihduntatuotteisiin on tutkittu kammiomittauksilla. Mittauksia on tehty erityisesti savetetulla ja puhtaalla kutterinlastulla. Mittausten perusteella savetus hillitsee homeenkasvua kaiken kaikkiaan sekä myös rakenteissa varsin yleisten, homeenestoaineille resistenttien Aox-homeiden kasvua. Näin ollen eristemateriaalin savetuksella on mahdollista toteuttaa mikrobiologisesti nykyistä turvallisempia rakenteita.

1. Johdanto

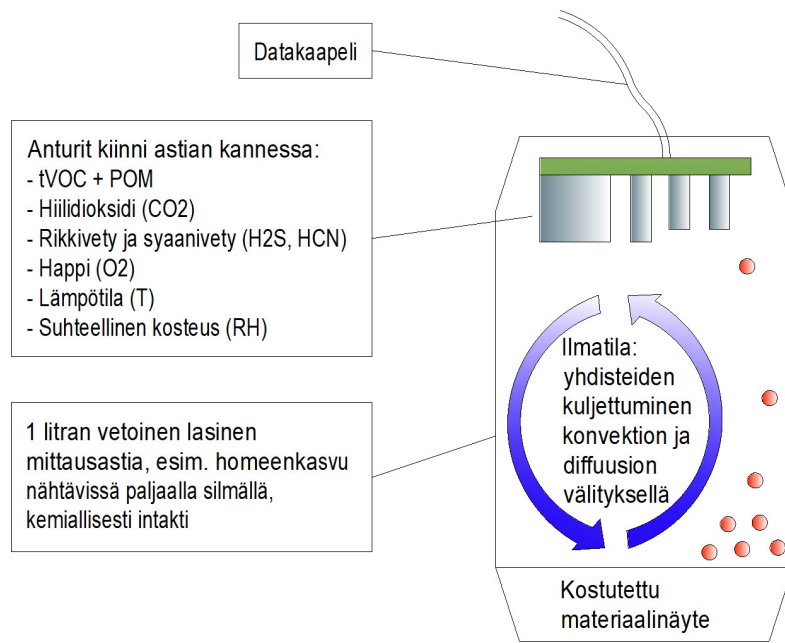
ECOSAFE-hankkeissa on tarkasteltu kutterinlastueristepohjaisten rakenneratkaisujen rakennusfysikaalista toimintaa laskennallisesti ja kokeellisesti, ja määritetty edellytykset toteuttaa kosteusturvallisia rakenteita nykyisissä ja tulevaisuuden ilmasto-olosuhteissa. ECOSAFE 2 -hankkeessa on tarkasteltu savetuksen edullista vaikutusta kutterinlastueristeen rakennusfysikaaliseen toimivuuteen sekä laajennettu ECOSAFE-tutkimuksia mm. mikrobiologian osa-alueelle. Yhtenä tutkimusalueena on ollut savetuksen vaikutus mikrobitoimintaan rakenteissa.

Kosteassa materiaalissa tapahtuva mikrobitoiminta saattaa aiheuttaa ihmisille haitallisia aineenvaihduntatuotteita. Näitä ovat mm. haihtuvat orgaaniset yhdisteet (volatile organic compounds, VOC) sekä rikkipitoiset kaasut rikkivety (H_2S) ja vetysyanidi (HCN). Tässä tutkimuksessa on tutkittu haihtuvien orgaanisten aineenvaihduntatuotteiden osalta niiden kokonaisuutensa (total volatile organic compound, tVOC). Antureilla havaitaan myös VOC-yhdisteitä suurikokoisemmat POM-yhdisteet (particulate organic matter). Nämä ovat hiukkasiin sidottuja orgaanisia yhdisteitä. Esimerkiksi mykotoksiinit kuuluvat POM-yhdisteisiin. Nämä voivat kulkeutua ilman vesihöyryn mukana, mikä on todennettu mittauksin [1]. Tässä artikkelissa tVOC-yhdisteillä tarkoitetaan kaikkia tVOC-anturien havaitsemia yhdisteitä, eli myös mahdollisia POM-yhdisteitä.

Ihmisiä sairastuttaville homeille tyypillinen piirre on Aox-ominaisuus (alternatiivinen oksidaasi). Tällaiset homeet ovat immuuneja homeenestokemikaaleille kuten biosideille ja kationisille tensideille, ja saavat kilpailuetua vaarattomampaan lajistoon nähden erityisen kuivista ja kylmistä olosuhteista, hapen vähyydestä sekä materiaalissa vallitsevasta korkeasta CO_2 -pitoisuudesta. Savetuksella on tavoiteltu sekä Aox-homeiden kasvun hillitsemistä että niiden tuottamien tVOC-yhdisteiden hajottamista hiilidioksidiksi. ECOSAFE-hankkeessa yhtenä tavoitteena on nimenomaan ollut tavoitteena minimoida materiaalien haitalliset päästöt materiaalien savetuksen sekä rakennusfysikaalisesti oikein toteutettujen rakenneratkaisujen avulla [2].

2. Materiaalikokeiden suoritus

Savetuksen vaikutusta puumateriaalissa tapahtuvaan mikrobitoimintaan tutkittiin mittaamalla tVOC-yhdisteiden, mikrobin tuottaman hiilidioksidin (CO₂) sekä rikkipitoisten kaasujen pitoisuutta suljetuissa mittauskammioissa (kuva 1). Mittauksia tehtiin sekä pelkille puunäytteille että puu- ja savinäytteiden yhdistelmille, käytännössä savetetulle kutterinlastulle. Mittaustekniikka on esitelty Sisäilmastoseminaarissa 2019 ja 2021 [3,4].



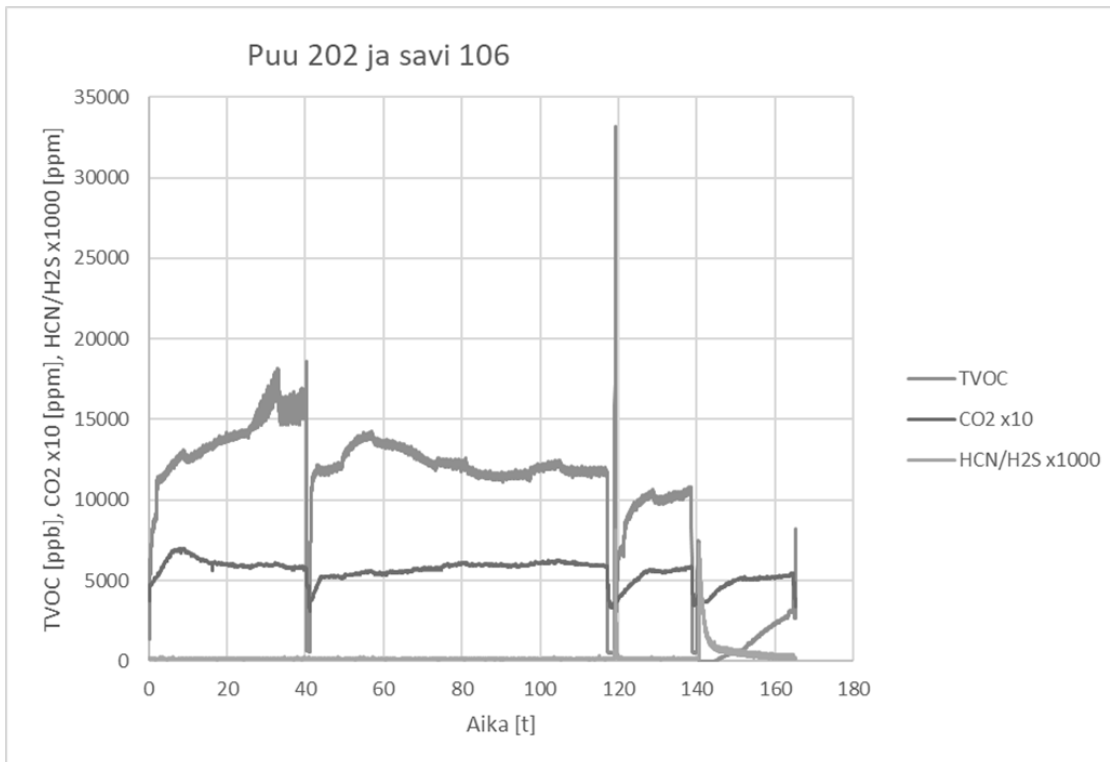
Kuva 1. Mittauskammion periaate.

3. Tulokset

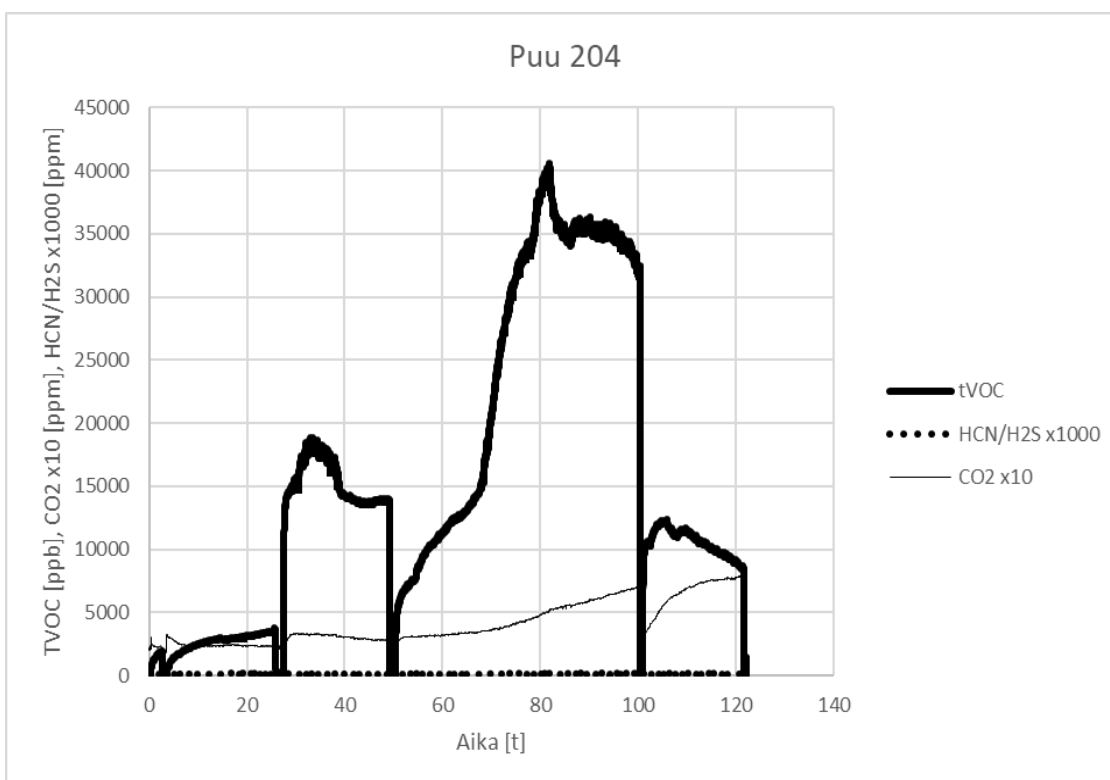
Savetettujen puunäytteiden tuloksia on esitetty kuvissa 2...6. Hiilidioksidi-, tVOC- ja H₂S / HCN-pitoisuudet on esitetty näytekohtaisesti samoissa kuvissa, koska kyseisten aineiden pitoisuuksista voidaan päätellä mikrobitoiminnan olemassaolo ja intensiteetti sekä todeta Aox-homeiden olemassaolo. Hiilidioksidin kohonnut pitoisuus indikoi kammiomittauksissa mikrobitoiminnan intensiteettiä, koska ainoa hiilidioksidin lähde kammioissa on mikrobin aineenvaihdunta. Samoin tVOC-pitoisuuksien kohoaminen ilmaisee mikrobitoimintaa.

Hiilidioksidipitoisuudet on esitetty tuloskuvin kymmenkertaisina ja H₂S / HCN-pitoisuudet tuhatkertaisina, jolloin aineiden pitoisuudet on mahdollista esittää samoissa kuvissa. Hiilidioksidin tyypillinen taustapitoisuus on luokkaa 380...450 ppm, eli kymmenkertaisina arvoina 3800...4500 ppm. Tätä suurempi hiilidioksidipitoisuus indikoi hiilidioksidin tuotantoa, mikä siis mittauskammioissa tarkoittaa mikrobitoimintaa. Ilman suhteellinen kosteus, lämpötila ja happipitoisuus on esitetty lähteessä [2]. Niiden dokumentointi on välttämätöntä. Sopiva lämpötila ja kosteus ovat homeenkasvun edellytyksiä, ja happipitoisuuden vakiointi takaa osaltaan tasapuoliset mikrobin kasvuolosuhteet eri näytteille. Tyypillisesti näyteastioiden ilman suhteellinen kosteus on ollut välillä 80...85 %, lämpötila +25...30 °C ja happipitoisuus n. 20 %.

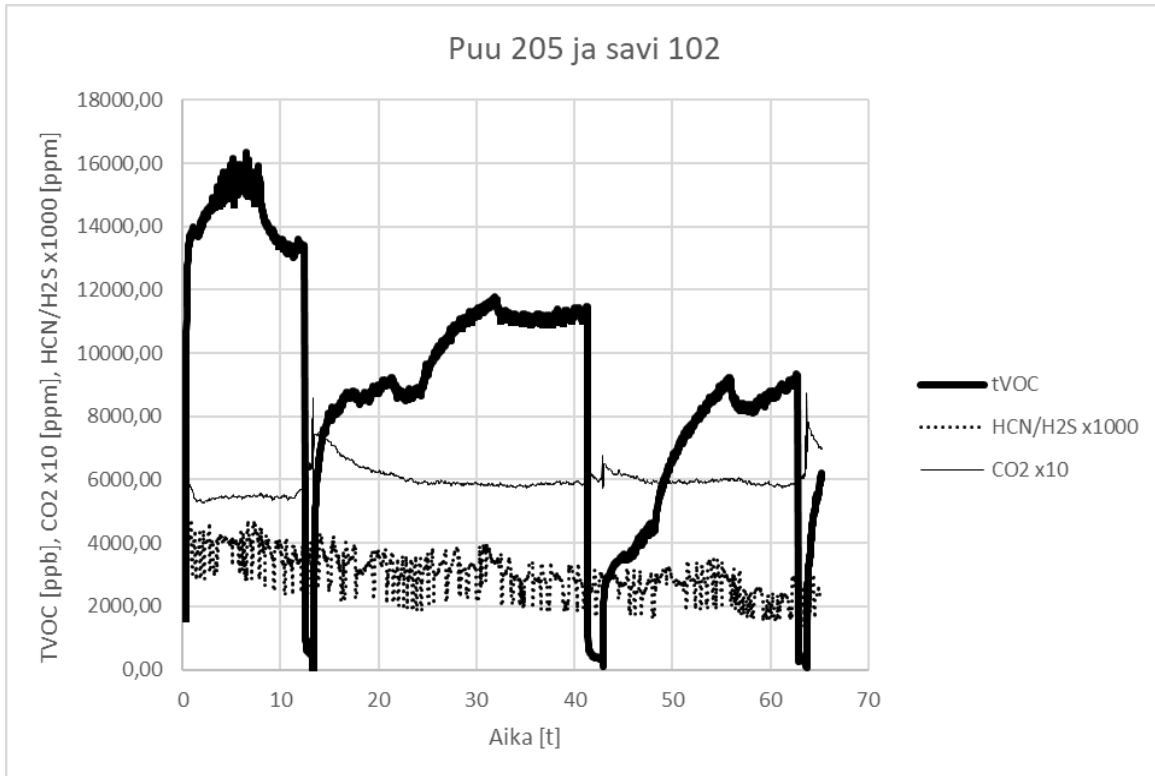
Kuvista 2 ja 5 nähdään syanidin lisäämisen vaikutus tVOC-pitoisuuksiin. Kummassakin näytteessä tVOC-pitoisuudet ovat laskeneet lähes nolnaan. Tämä indikoi resistenttien eli Aox-homeiden poissaoloa. Aox-homeet olisivat kestäneet syanidin lisäyksen, jolloin tVOC-tuotanto olisi jatkunut. Syanidi lisättiin näissä kokeissa näytteisiin syaanivetyä.



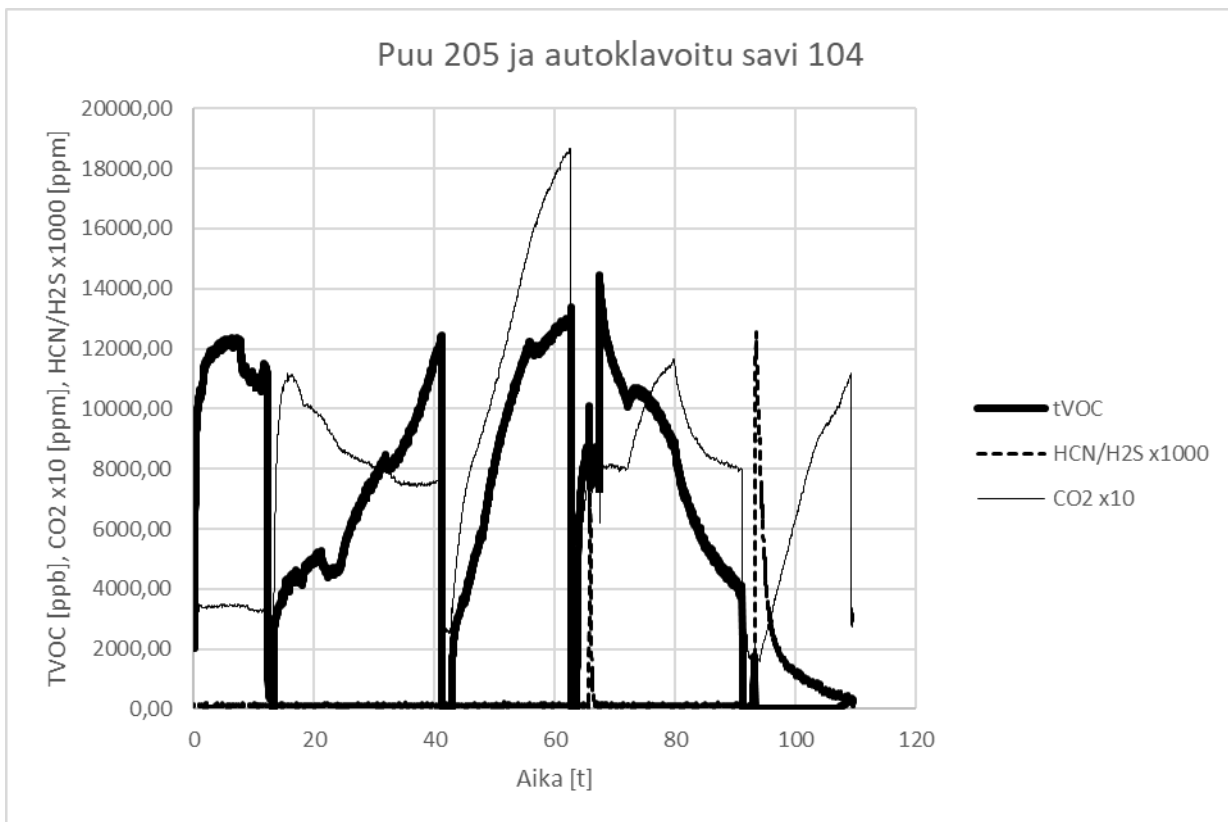
Kuva 2. Puu-savinäytteen tulokset. Syanidia lisätty 140 tunnin kohdalla, mikä on vaimentanut tVOC-päästöt tehokkaasti. Piikki 120 tunnin kohdalla aiheutuu rikkivedyn lisäyksestä.



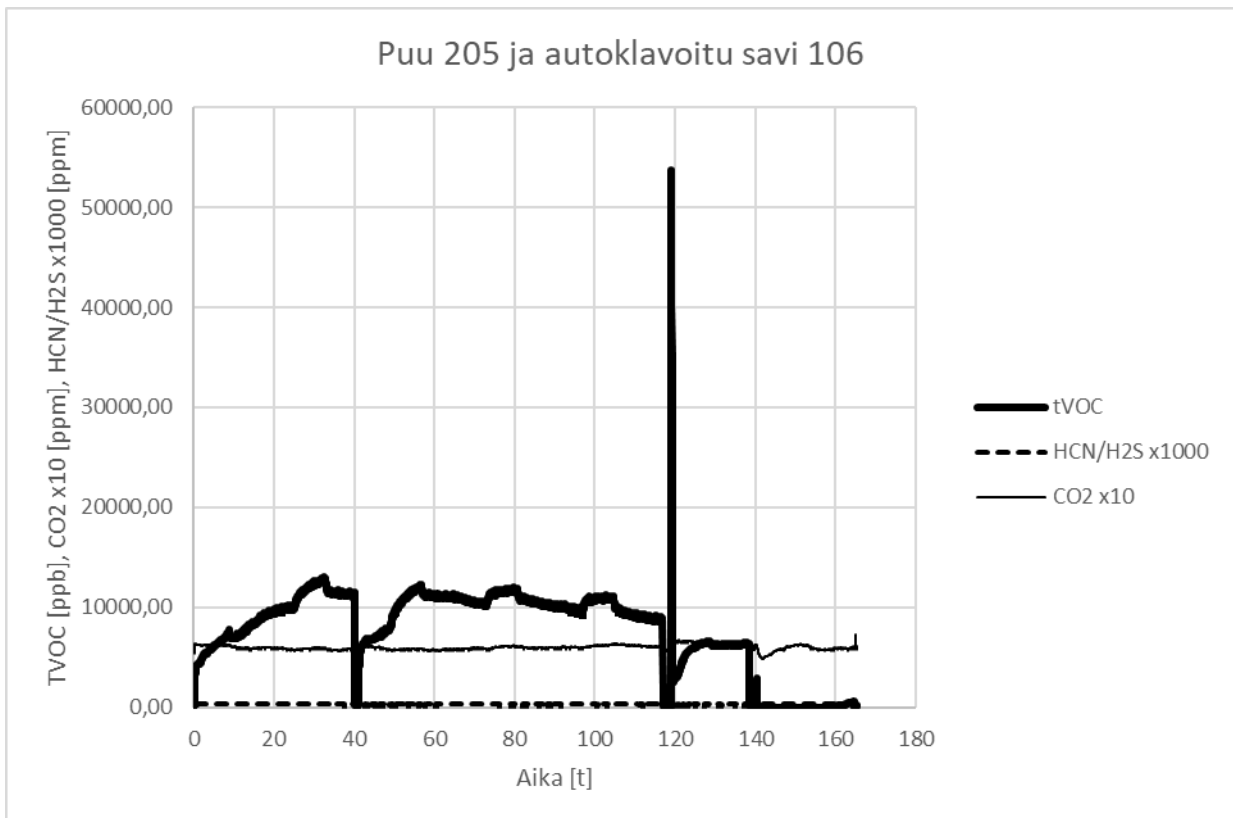
Kuva 3. Puhtaan puunäytteen (puu 204) tulokset. tVOC-päästöt ovat korkealla 100 tunnin kohdalla tehtyyn kammion tuuletukseen asti. Kokeen loppua kohti kohonneet hiilidioksidipitoisuudet indikoivat mikrobitoimintaa. tVOC-lukeman taittuminen laskuun 100 tunnin jälkeen viittaa siihen, ettei näytteessä kasva Aox-homeita.



Kuva 4. Savetetun puu-savinäytteen tulokset. Savi lisätty puun sekaan 15 tunnin kohdalla.



Kuva 5. Savetetun puu-savinäytteen tulokset. Savi lisätty puun sekaan 14 tunnin kohdalla. 93 tunnin kohdalla lisätty syanidia, jolloin tVOC-tuotanto on lakannut. Tämä viittaa siihen, ettei Aox-homeita ollut läsnä.



Kuva 6. Savetetun puu-savinäytteen tulokset. Savi lisätty puun sekaan heti kokeen alussa. 120 tunnin kohdalla lisätty rikkivetyä, mikä näkyy piikkinä käyrässä. 140 tunnin kohdalla on lisätty syanidia, jolloin tVOC-tuotanto on lakannut.

Kooste kaikista tuloksista on taulukoissa 1 ja 2. tVOC-lukemissa ei ole huomioitu yksittäisiä piikkejä, jotka johtuvat muusta kuin mikrobitoiminnasta eivätkä siten ole johtopäätösten kannalta oleellisia.

Taulukko 1. Kooste puunäytteiden tuloksista.

Näyte nro	Max. tVOC-pitoisuus (ppb)
202	18000
203	55000
205	16200
205, 2.näyte	>60000
206	30500
207	3000
207, 2.näyte	53500

Taulukko 2. Kooste savetettujen puunäytteiden tuloksista.

Puu nro	Savi nro	Max. tVOC-pitoisuus (ppb)
202	106	14500
204	102	40800
204	106	7100
205	102	11800
205	104	14600
205	106 autoklavoitu	12000
205	106	8000
206	107	29400
207	104	3300

4. Yhteenveto

Puhtaita puita sisältävissä näytteissä tVOC-lukemat nousivat suurimmillaan yli 60000 ppm, eli käytettyjen anturien mittausalueen yli (kts. puu 205 ja savi 106 ennen savilisyystä, sekä puut 203 ja 205). Savilisyksen jälkeen tVOC-pitoisuudet tyypillisesti pysyivät ennallaan samanaikaisesta veden lisäyksestä huolimatta, tai laskivat.

Aox-homeiden esiintymistä tutkittiin lisäämällä syanidia näyteastioihin, joissa havaittiin kohonneita tVOC-pitoisuuksia. Aox-homeet sietävät syanidia, kun taas muunlaisten homeiden tVOC-tuotanto loppuu syanidilisyksen vaikutuksesta. Kuvissa 2, 5 ja 6 syanidilisyys aiheutti tVOC- tuotannon loppumisen, mikä indikoi Aox-homeiden puuttumista näytteestä.

Lähdeluettelo

- [1] M. J. Salo ym., ”*Penicillium expansum* strain isolated from indoor building material was able to grow on gypsum board and emitted guttation droplets containing chaetoglobosins and communesins A, B and D”, *J. Appl. Microbiol.*, vsk. 127, nro 4, ss. 1135–1147, loka 2019, doi: 10.1111/jam.14369.
- [2] J. Vinha ym., ”Kosteusturvalliset ja ympäristöystävälliset kutterinlastueristeiset puurakenteet. ECOSAFE- JA ECOSAFE 2-hankkeiden loppuraportti”, Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka, 5. [Verkossa]. Saatavissa: <https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/tutkimusprojektit/ecosafe/>
- [3] J. Selkänaho ym., ”Sähkökemiallisten antureiden ja fysikokemiallisten mittaustekniikoiden avulla uutta tietoa sisäilman altisteista”, SIY Rap., vsk. 37, ss. 417–422, maaliskuu 2019, Viitattu: 14. maaliskuuta 2019. [Verkossa]. Saatavissa: https://issuu.com/sisailmayhdistys/docs/koko_julkaisu_2019_lopullinen1.3.20
- [4] M. Salkinoja-Salonen ym., ”Puu- ja savipohjaisten rakennusmateriaalien ominaisuuksia ja sisäilmaemissioiden on-line havaintoja”, Raken. 2021, ss. 295–300, loka 2021.

Suosittelavat kutterinlastueristeiset rakenneratkaisut

Jaakko Hietikko, Ilkka Valovirta, Eero Tuominen ja Juha Vinha
Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka

Tiivistelmä

Ympäristöministeriön ja yritysten rahoittamissa, Tampereen yliopiston johdolla toteutetuissa Ecosafe -hankkeissa on tutkittu kutterinlastulla eristettyjen rakenteiden toimintaa sekä mitattu perinteisen ja savetetun kutterinlastun ominaisuuksia. Tutkimukset ovat käsittäneet rakennusfysikaalisen mittauksen ja mallinnuksen lisäksi palo-ominaisuuksien, akustisten ominaisuuksien, rakenteiden hiilijalanjäljen ja mikrobiologisen toiminnan laskentaa ja mittausta. Tällä tavoin on saatu perusteellinen käsitys nykyrakentamiseen soveltuvien kutterinlastueristeisten rakenteiden toiminnasta. Hankkeen tulosten perusteella kutterinlastulla on nykyistä laajempi hyödyntämispotentiaali modernissa, kosteusturvallisessa rakentamisessa. Tämä koskee erityisesti savetettua kutterinlastua. Suositusrakenteina esitetään käytännön rakentamiseen suositeltavat ala-, väli- ja yläpohjien sekä kahden osastoivan, ei-kantavan väliseinän rakennetyypit. Eri rakenteista on useita versioita, jotta suositusrakenteiden käyttöalue saataisiin mahdollisimman laajaksi. Suositusratkaisut on laadittu uudisrakentamisen näkökulmasta.

1. Johdanto

Ympäristöministeriön ja rakennusalan yritysten rahoittamissa Ecosafe -hankkeissa on tarkasteltu kutterinlastueristepohjaisten rakenneratkaisujen rakennusfysikaalista toimintaa laskennallisesti ja kokeellisesti sekä mitattu perinteisten ja savetettujen kutterinlastueristeiden ominaisuuksia [1]. Näitä on tutkittu, koska saven ja savetettujen materiaalien ominaisuuksista on entuudestaan olemassa varsin vähän rakennusfysikaalisesta näkökulmasta kerättyä tutkimustietoa. Rakennusfysikaalisten tutkimusten lisäksi on mitattu materiaalien ja rakenteiden akustisia ja paloteknisiä ominaisuuksia sekä tehty rakennetyyppien hiilijalanjälkilaskelmia [1]. Tämän pohjalta on määritetty edellytykset toteuttaa nykyvaatimukset täyttäviä, kosteusturvallisia rakenteita nykyisissä ja tulevaisuuden ilmasto-olosuhteissa. Rakennetyypeissä on varauduttu haasteisiin, joita ilmastonmuutos tulee aiheuttamaan ulkovaipparakenteille lähivuosisikymmeninä [2].

2. Suositusrakenteet

Suositusrakenteiksi on valittu neljä ulkoseinärakennetta, yksi yläpohjarakenne, yksi alapohjarakenne sekä kaksi osastoivaa väliseinärakennetta. Rakenteiden hiilijalanjälki on pienempi kuin tyypillisten nykyisin käytettyjen puurankarakenteisten rakenteiden, mikä on saavutettu korvaamalla mineraalivillaeriste ja kipsilevyt puu- ja savipohjaisilla materiaaleilla.

Ulkovaipparakenteiden rakennetyypit on suunniteltu täyttämään voimassa olevan Ympäristöministeriön asetuksen 1010/2017 lämmönlämpäisyvertoimen (U-arvon) vertailuarvot, jolloin rakennetyyppien käyttö ei aiheuta ongelmia energiatehokkuusvaatimusten täyttymisen kannalta [3]. Rakennetyypeissä määriteltyjen tuulensuojalevyjen vesihöyrynvastus on niin alhainen, että rakenteissa voidaan käyttää höyrynsulkumuovin sijasta ilmansulkupaperia. Lisävarmuutta rakenteiden kosteustekniseen toimintaan antaa lämmöneristeinä käytettävän kutterinlastun kosteuskapasiteetti. Rakenteiden kosteustekninen toiminta on varmistettu

laskelmin. Seinärakenteiden osalta kosteusteknisen toiminnan osalta on nojaututtu myös koerakennusmittauksiin. Joissakin rakenteissa on käytetty mineraalivillatuulensuojaa rakennusfysikaalisista syistä. Mineraalivillatuulensuojalla voidaan varmistaa riittävän alhainen suhteellinen kosteus lämmöneristeessä tuulensuojalevyn takana. Osastoivat väliseinärakenteet on suunniteltu täyttämään 60 minuutin palonkestoajan ja toinen suositeltavista rakenteista täyttää lisäksi asuntojen välisen ääneneristysvaatimuksen, jolloin se soveltuu käytettäväksi asuntojen välillä.

Rakenteet ominaisuuksineen sekä niiden toteutusohjeet on esitetty yksityiskohtaisesti ECOSAFE-hankkeiden loppuraportissa [1]. Esitettyjen suositusrakenteiden soveltuvuuden käyttökohteisiin päättää viime kädessä kohteen rakennesuunnittelija. Mikäli rakenteisiin tehdään muutoksia, tulee rakennesuunnittelijan sekä tarvittaessa myös muiden erikoissuunnittelijoiden selvittää muutosten vaikutukset rakenteiden toimintaan sekä hyväksyä muutokset.

2.1 Ulkoseinärakenteet

Ulkoseinien rakennevariaatiot eroavat toisistaan tuulensuojalevyn, lämmöneristemateriaalin, kantavan rungon sekä sisäpinnan osalta. Tuulensuojalevyn osalta vaihtoehdot ovat puukuitulevy ja mineraalivillatuulensuoja. Puukuitulevy osallistuu rakenteiden jäykistämiseen ja sillä on pienempi hiilijalanjälki. Mineraalivillatuulensuojalla on paremman lämmönvastuksen lisäksi alhaisempi vesihöyrynvastus, mistä on etua rakennusfysikaalisessa toiminnassa. Lisäksi mineraalivillatuulensuojan käyttöalue on paloluokan osalta laajempi. Kaikissa rakenteissa tulee sisäpinnan rakenteiden vesihöyrynvastuksen olla vähintään viisinkertainen tuulensuojalevyn vesihöyrynvastukseen nähden. Yhteenvetona voidaan todeta, että tarvittaessa tuulensuojalevyä rakenteiden jäykistämiseen voidaan valita puukuitutuulensuojalla varustettu variaatio (KT-VA). Tällöin lämmöneristeeksi suositellaan savetettua kutterinlastua. Rakennusfysikaalisesti haastavissa tilanteissa, esimerkiksi varauduttaessa korkeaan kosteuslisään rakennuksen sisällä, voidaan valita mineraalivillatuulensuojalla eristetty rakenne sen hyvän kuivumiskyvyn vuoksi (rakenteet MV-VA, MV-KI, MV-CLT). Lämmöneristeeksi on määritelty joko tavallinen tai savetettu kutterinlastu sen mukaan, mikä antaa riittävän varmuuden rakennusfysikaalista toimintaa ajatellen.

Seinärunkona on käytetty levyuumapalkkeja, joilla voidaan helposti toteuttaa riittävän U-arvon tarjoava seinärakenne. Poikkeuksena on rakenteessa MV-CLT käytetty CLT-levy. Levyuumapalkin korvaaminen muulla pystyrakenteella on myös mahdollista.

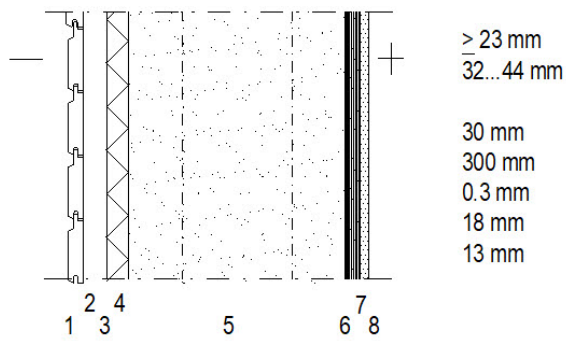
Rakenteiden sisäpinnaksi on lähtökohtaisesti määritetty rakennetta jäykistävä vanerilevy ja sen päälle huokoisesta kuitulevystä tehty sisustuslevy. Sisäpintana voi olla myös kipsilevy, mikäli tarvitaan elämätön levytys pintakäsittelyn tai vedeneristyksen alustaksi.

Ulkoseinärakenteiden U-arvot ovat kutterinlastueristeen lämmönjohtavuuden λ_d mukaan seuraavat:

- $\lambda_d = 0,042 \text{ W/mK}$: $U = 0,14 \text{ W/m}^2\text{K}$, paitsi rakenteella US MV-CLT $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$
- $\lambda_d = 0,050 \text{ W/mK}$: $U = 0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$
- $\lambda_d = 0,055 \text{ W/mK}$: $U = 0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$

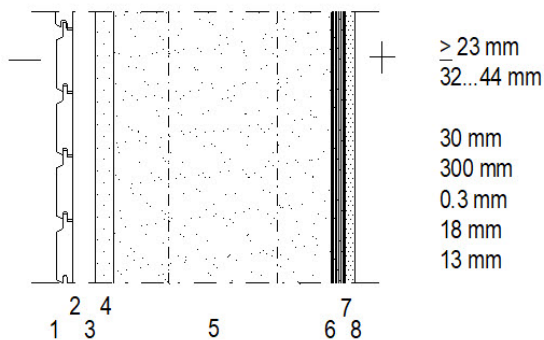
Arvo $0,042 \text{ W/mK}$ edustaa markkinoiden parasta tasoa kuivissa olosuhteissa, arvo $0,050 \text{ W/mK}$ hyvän lämmöneristävyyden omaavaa kutteria tyypillisissä käyttöoloissa ja $0,055 \text{ W/mK}$ runsaasti hienoaainesta sisältävää kutterinlastua. Ulkoseinien rakennetyypit on esitetty kuvissa 1 ja 2.

US MV-VA



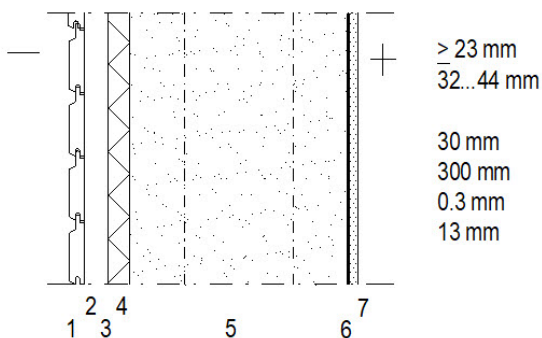
- 1 Pintakäsittely rakennusselityksen mukaan
- 2 Ulkoverhouslauta, vaaka- tai pysty laudoitus
- 3 Ilmarako + pysty laudoitus 32x100 k 600 (vaakalaud.) tai ristiinkoolaus 22 mm + 22 mm (pysty laud.)
- 4 Mineraalivillatuulensuojalevy $\lambda_d = 0,033$ W/mK
- 5 Kutterinlastueriste + pystyrunko, levyuunapalkki k600
- 6 Ilmansulkupaperi, saumat rungon kohdalla
- 7 Vaneri
- 8 Sisustuslevy, huokoinen kuitulevy

US KT-VA



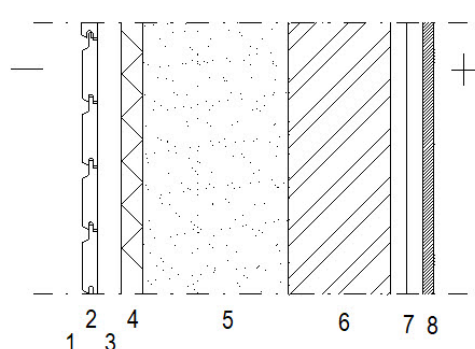
- 1 Pintakäsittely rakennusselityksen mukaan
- 2 Ulkoverhouslauta, vaaka- tai pysty laudoitus
- 3 Ilmarako + pysty laudoitus 32x100 k 600 (vaakalaud.) tai ristiinkoolaus 22 mm + 22 mm (pysty laud.)
- 4 Tuulensuojalevy, puukuitulevy $\lambda_d = 0,049$ W/mK
- 5 Kutterinlastueriste + pystyrunko, levyuunapalkki k600
- 6 Ilmansulkupaperi, saumat rungon kohdalla
- 7 Vaneri
- 8 Sisustuslevy, huokoinen kuitulevy

US MV-KI



- 1 Pintakäsittely rakennusselityksen mukaan
- 2 Ulkoverhouslauta, vaaka- tai pysty laudoitus
- 3 Ilmarako + pysty laudoitus 32x100 k 600 (vaakalaud.) tai ristiinkoolaus 22 mm + 22 mm (pysty laud.)
- 4 Mineraalivillatuulensuojalevy $\lambda_d = 0,033$ W/mK
- 5 Kutterinlastueriste + pystyrunko, levyuunapalkki k600
- 6 Ilmansulkupaperi, saumat rungon kohdalla
- 7 Kipsilevy

US MV-CLT



- 1 Pintakäsittely rakennusselityksen mukaan
- 2 ≥ 23 mm Ulkoverhouslauta, vaaka- tai pysty laudoitus
- 3 32...44 mm Ilmarako + pysty laud 32x100 k 600 (vaakal.) tai ristiinkoolaus 22 mm + 22 mm (pysty laud.)
- 4 30 mm Mineraalivillatuulensuojalevy $\lambda_d = 0,033$ W/mK
- 5 200 mm Savetettu kutterinlastueriste + pystyrunko k600
- 6 140 mm CLT-massiivipuulaatta
- 7 44 mm Ristiinkoolaus / asennustila 2x 22x100 k600
- 8 15 mm Palokipsilevy + pintakäsittely

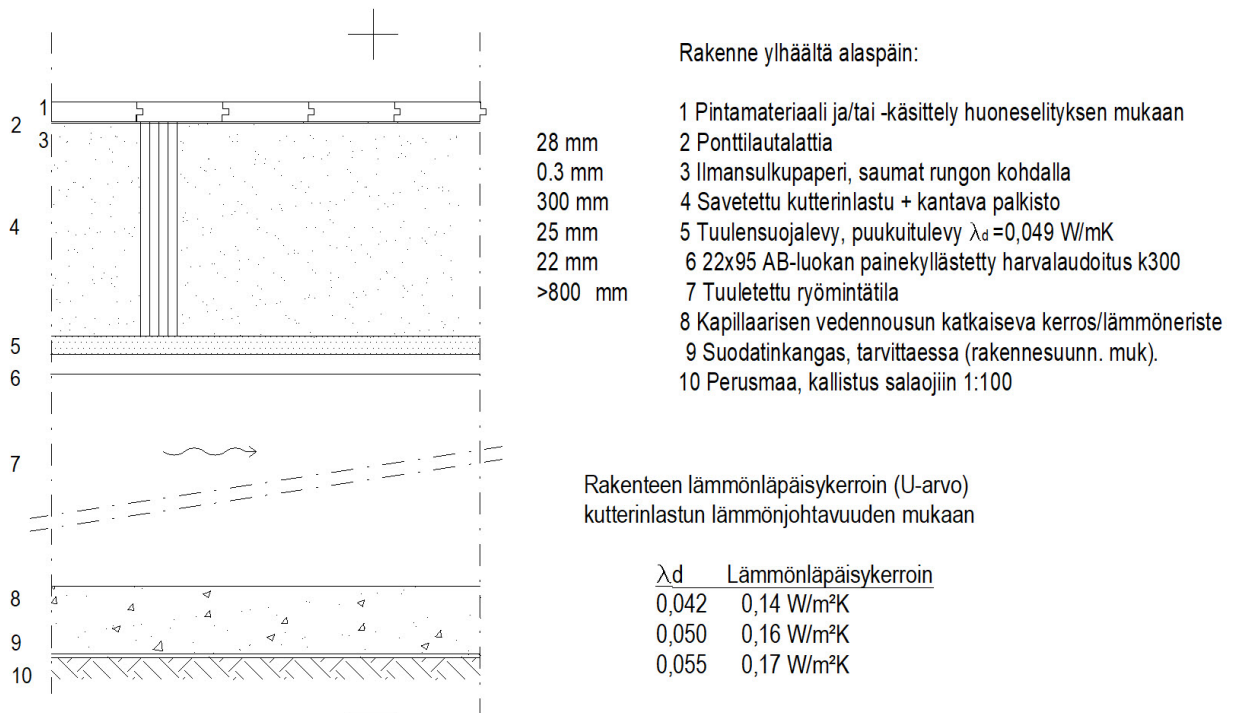
Kuva 1. Suositeltavat kutterinlastueristeiset ulkoseinärakenteet.

2.2 Alapohjarakenne

Suositusrakenteena esitetty alapohjarakenne on tyypiltään ryömintätilainen alapohja. Rakenteen lämmöneristeenä suositellaan käytettäväksi savetettua kutterinlastua, mikä parantaa haastavaksi

todetun tuulettuvan alapohjarakenteen rakennusfysikaalista toimintaa. Tuulensuojalevyksi on valittu 25 mm vahvuinen puukuitulevy, joka kestää eristeen painon ja lisää puupohjaisten materiaalien osuutta rakenteessa. Rakenne on esitetty kuvassa 2.

Tuulettuvan alapohjarakenteen toteutuksessa tulee noudattaa nykytietämyksen ja -käytännön mukaista rakennustapaa. Maapohja tulee peittää lämmöneristyksellä, mikä hillitsee kosteuden haihtumista sekä ryömintätilan jäähtymistä kesäaikaan. Ilmansulkukerroksen tulee olla ehdottoman tiivis ja lämmöneristeen tulee täyttää sille varattu tila kokonaan. Ryömintätilan tuuletuksen tulee olla riittävä.



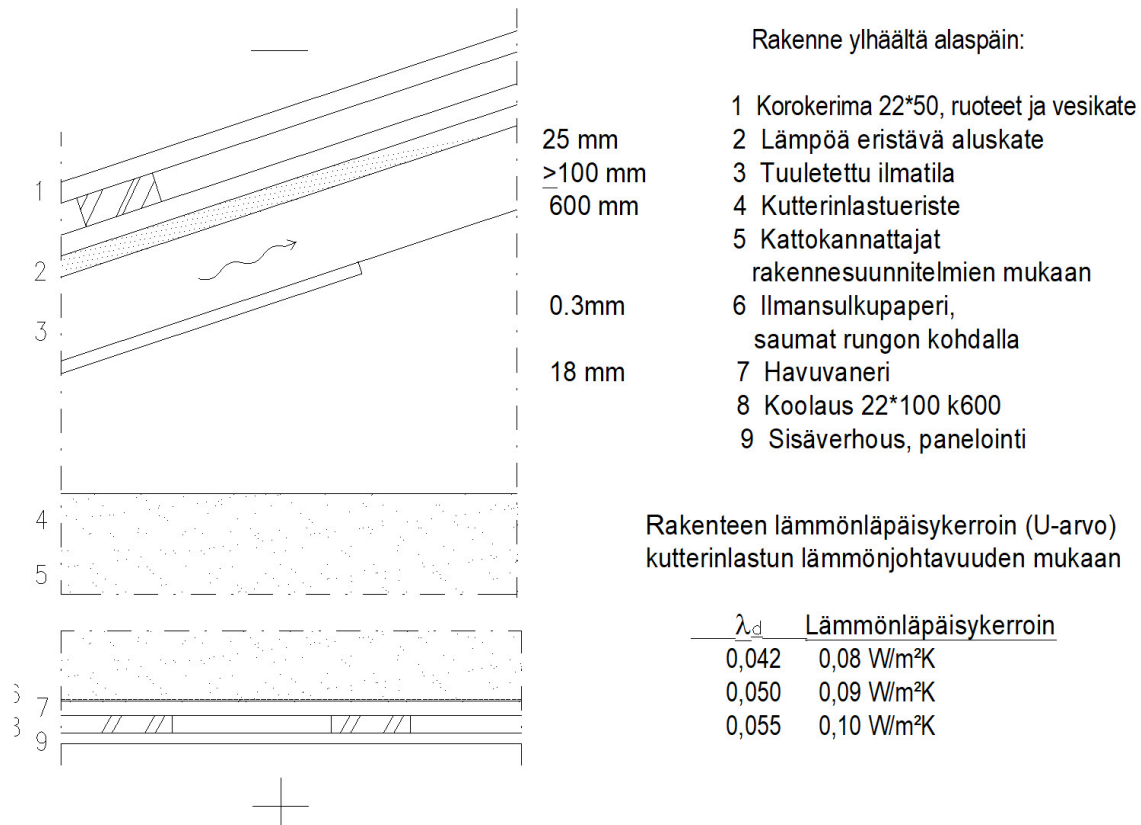
Kuva 2. Suositeltava kutterinlastueristeinen alapohjarakenne.

2.3 Yläpohjarakenne

Esitetty yläpohja on hyvin tuulettuva, ulospäin kaatavalla katolla varustettu yläpohjarakenne. Sen kantavaksi rakenteeksi soveltuvat esimerkiksi naulalevyristikot.

Rakenne on varustettu lämpöä eristävällä aluskatteella, jonka tehtävänä on vähentää tuuletustilan jäähtymistä kirkkaina öinä. Nykyohjeiden ja -käytännön mukainen hyvä tuuletus kuivattaa pienten vesivuotojen sekä sisätiloista yläpohjaan suuntautuvien ilmavuotojen mukanaan tuomaa kosteutta, mutta mahdollistaa kylmän ja kostean ilman pääsyn rakenteeseen kirkkaina öinä, jolloin yläpohjien ylimpien osien lämpötila voi säteilyjäähdytymisen vuoksi olla ulkoilman kastepistelämpötilaa alhaisempi. Lämpöä eristävä aluskate hillitsee säteilyjäähdytymisen vaikutusta yläpohjan tuuletustilassa, jolloin home- ja kondenssiriskit pienenevät.

Rakenne voidaan eristää tavallisella, savettamattomalla kutterinlastulla. Ilmansulkupaperin alle on määritelty vanerilevy, joka tukee ilmansulkua ja estää sen vaurioitumisen rakennustyön aikana. Vanerilevy lisää myös rakenteen sisäpinnan vesihöyrynvastusta ja osallistuu rakennuksen jäykistykseen. Rakennetyyppi on esitetty kuvassa 3.



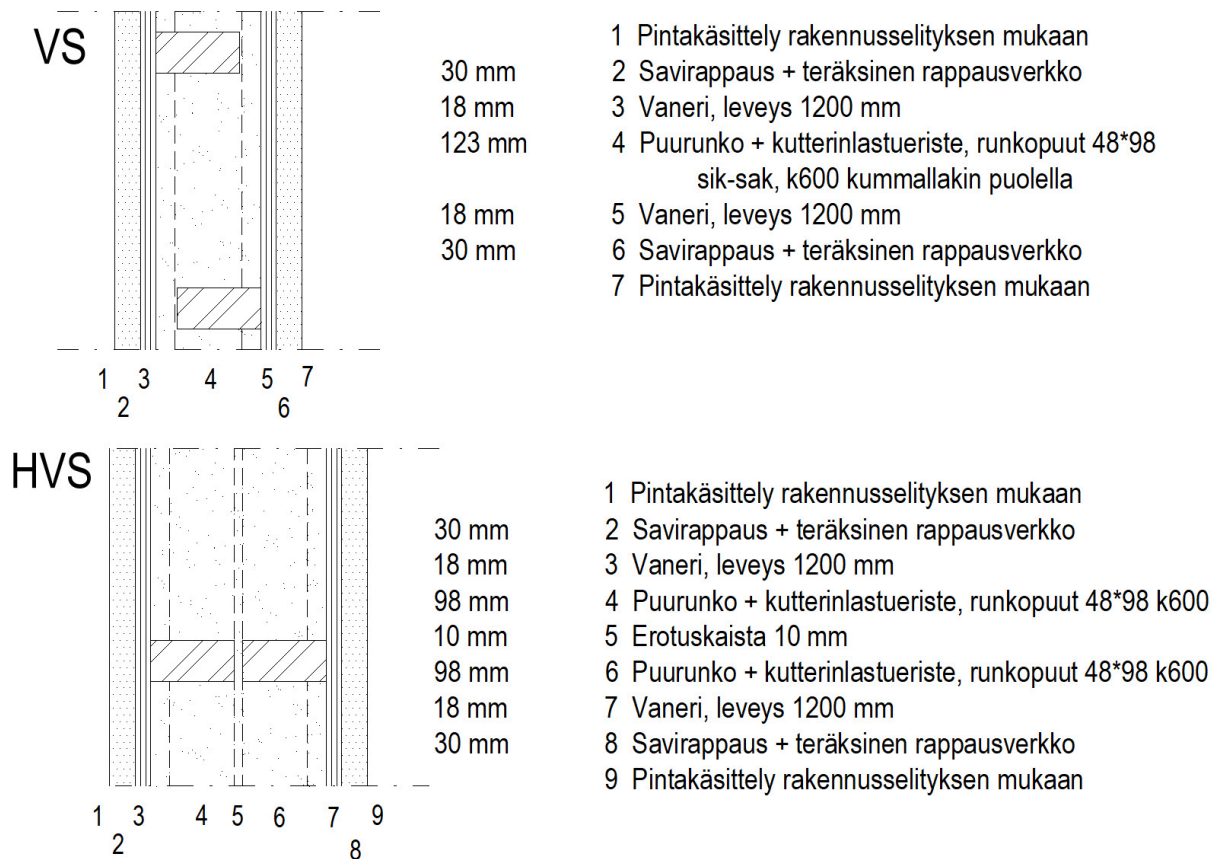
Kuva 3. Suositeltava kutterinlastueristeinen yläpohjarakenne.

2.4 Osastoivat väliseinät

Osastoivien, ei-kantavien väliseinien rakennetyypiksi on valittu kaksi polttokokeessa 60 minuutin palonkestovaatimuksen täyttäneitä rakennetta. Molemmat ovat kaksinkertaisella rungolla varustettuja. Rakennetyypeistä toisessa (VS) on sik-sak -runko ja toisessa (HVS) runkotolpat ovat kohdakkain vähintään 10 mm etäisyydellä toisistaan. Jälkimmäinen ratkaisu vaatii enemmän tilaa, mutta se mahdollistaa asuinhuoneistojen välisten ääneneristysvaatimusten (äänitasoeroluku $D_{nT,w} = 55$ dB) täyttymisen. Sik-sak -rungolla varustettua ratkaisua voidaan käyttää tilanteissa, joissa on 60 minuutin palonkestovaatimus mutta ääneneristyksen ei tarvitse olla asuntojen välillä vaadittavaa tasoa.

Molemmissa rakenteissa on rungon ulkopuolella 18 mm vaneri ja sen päälle tehty 30 mm savirappaus. Tällä tavoin kyetään täyttämään 60 minuutin palonkestovaatimukset. Ratkaisu on valittu Tampereen yliopistossa tehtyjen palokokeiden perusteella.

On huomattavaa, että rakenteille voidaan olettaa 60 minuutin palonkesto vain ei-kantavana. Esimerkiksi tyypillistä pari- tai rivitalon runkorakennetta ajatellen tämä ei ole ongelma. Edelleen palonkesto täyttyy vain enintään 3000 mm korkuisella seinällä, mikä riittää hyvin normaalissa asuntorakentamisessa. Osastoivien väliseinien rakennetyypit on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Suositeltavat osastoivat väliseinärakenteet.

3. Yhteenveto

Luonnonmukaisia materiaaleja, tässä tapauksessa savea ja kutterinlastua, voidaan käyttää yhtä lailla asuinrakennusten ulkovaipparakenteissa kuin osastoivissa väliseinissäkin. ECOSAFE-hankkeissa on tutkittu perusteellisesti sekä yksittäisten materiaalien että kokonaisten rakenteiden toimintaa, niin rakennusfysiikallisten kuin muidenkin vaatimusten näkökulmasta. Kokonaisvaltainen lähestymistapa on mahdollistanut nykyvaatimukset täyttävien, alhaisen hiilijalanjäljen omaavien rakenteiden suunnittelun.

Lähdeluettelo

- [1] J. Vinha ym., *Kosteusturvalliset ja ympäristöystävälliset kutterinlastueristeiset puurakenteet. ECOSAFE- JA ECOSAFE 2-hankkeiden loppuraportti*, Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka, 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/tutkimusprojektit/ecosafe/>
- [2] J. Vinha ym., *Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa*. 2013.
- [3] Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. 2018. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171010>

Energiatehokas ja hiiliviisas rakennettu ympäristö – luontopohjaiset rakentamisen ratkaisut

Tuula Jyske¹, Henri Vanhanen², Marta Cortina Escribano², Peter Petros¹, Xie Long¹, Jutta Kauppi², Mikael Westermarck³, Juha Vinha³ ja Kirsi Mikkonen¹

¹ Helsingin yliopisto

² Luonnonvarakeskus

³ Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka

Tiivistelmä

Rakentaminen ja asuminen ovat edelleen yksi energia- ja materiaali-intensiivisimmistä toimialoista yhteiskunnassamme, tuottaen yli kolmanneksen kasvihuonekaasupäästöistä. Luonnonmukaisissa rakennustuotteissa käytetään maa- ja metsätaloudesta sekä maankaivuusta saatavia raaka-aineita ja sivuvirtoja. Näillä tuotteilla voitaisiin laskea tavanomaisten puurakenteiden hiilijalanjälkeä arviolta 10–15 %. Tulevaisuudessa asumisen ja rakennetun ympäristön ratkaisut hyödyntävät entistä enemmän myös eläviä organismeja, jotka tuottavat tai 'kasvattavat' materiaaleja. Muun muassa sienirihmastosta ja kasvibiomassasta koostuva materiaali on yksi vaihtoehdoista vaahtomuovieristemateriaaleille. Hankkeissamme syntyy innovaatiokeskittymä ja alueellinen ajatushautomo, jossa yhdistyvät monialainen osaaminen ja eri tutkimus-, kehitys- ja innovaatio toimijoiden tutkimusmenetelmät ja -alustat. Tavoittemme on selvittää ja demonstroida, miten vähähiilisesti tuotettuja alueellisia biomassoja ja sivuvirtoja voitaisiin käyttää luonnonmukaisissa rakennustuotteissa, mitkä ovat niiden ominaisuudet ja käytettävyys, ja miten uudet tuotantoarvoketjut rakentuisivat alueellisesti. Työpajoissa ja yrityshaastattelussa kerätään tietoa aluetoimijoilta arvoketjujen ja liiketoiminnan kehittämisen tueksi, kohti materiaaliälykästä, energiatehokasta ja hiiliviisasta asumista.

1. Johdanto

Maailmanlaajuisesti rakennusalan osuus CO₂-päästöistä on 39 % (rakennusvaihe ja infrastruktuurien käyttö) [1,2]. EU:ssa 36 % CO₂-päästöistä ja 40 % energian kokonaiskulutuksesta johtuu rakentamisesta ja asumisesta. Fossiilisia korvaavien konseptien kehittäminen ja rakennusmateriaalien kestävä tuotanto on globaali haaste ja siihen liittyvillä innovaatioilla on merkittävää alueellista, kansallista ja kansainvälistä liiketoimintapotentiaalia. Eristemateriaalit ovat erittäin tärkeä segmentti rakennusalalla [3]. Uusiutuvien eristemateriaalien markkinaosuus EU:ssa on tällä hetkellä vain alle 2 % [4]. Uudenlaisia, materiaaliälykkäitä, hiilinegatiivisia materiaalivaihtoehtoja tarvitaan kipeästi. Samoin materiaalien tuotantomenetelmiä on kehitettävä radikaalisti kestävämmiksi ja vähemmän energiantensiivisiksi. Hankkeissamme luodaan alueellisen osaamisen keskittymä, jossa yhteiskehitettävät ratkaisut ja liiketoiminta-arvoketjut pyrkivät lisäämään tulevaisuuden rakennusten energiatehokkuutta, vähentävät riippuvuutta uusiutumattomista luonnonvaroista, vähentävät energiankulutusta rakennusmateriaalien tuotannossa ja rakennusten lämmityksessä ja luovat pohjaa hiiliviisaalle, uudennlaiselle materiaalituoannolle.

2. Luontopohjaisten rakentamismateriaali- ja mallikonseptien yhteiskehittämiseen

Kehitämme luontopohjaisen, energiatehokkaan ja hiiliviisaan rakentamisen materiaali- ja

mallikonsepteja. Tämä tapahtuu kokeilujen ja yhteiskehittämisen sekä verkostojen rakentamisen avulla, ratkomalle yhdessä perustavanlaatuisia kysymyksiä, kuten 'miten ja millä reunaehdoilla' uudet hiiliviisaan rakennusmateriaalituotannon alueelliset arvoketjut rakentuisivat kestävästi.

Kehittämisen- ja tutkimushankkeissamme tavoitteena on luoda alueellinen innovaatioekosysteemi luontopohjaisten, energiatehokkaiden ja hiiliviisaisten rakentamisen materiaali- ja mallikonseptien yhteiskehittämiseen. Hankkeissa yhdistyvät Helsingin yliopiston puumateriaalitieteen ja sientenkasvatuksen osaaminen, Hyytiälän metsäaseman uuden monitieteisen puurakentamisen ja rakennetun ympäristön Living Lab -tutkimusalue (Juupajoki), Tampereen yliopiston Rakennetun ympäristön tiedekunnan (Rakennusfysiikan ryhmä) ja Luonnonvarakeskuksen biomassaosamisen uudeksi kestäväksi rakentamisen innovaatioiden hermokeskukseksi Pirkanmaalla. Keskittymä kokoaa modernien kehittämisinfrojen avulla alueen liiketoiminnan edustajat ja aluekehityksen muut toimijat yhteen, ja haastaa myös alueen asukkaat mukaan rakentamaan tulevaisuuspolkuja ja edistämään asumisen kestävyysmurrosta yhdessä.

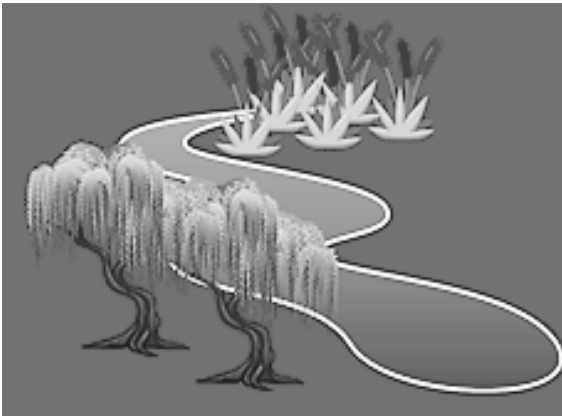
2.1 Hiiliviisaat rakennusmateriaalit ensimmäisinä yhteiskokeilujen kohteina

Ensimmäisiin yhteiskehittämiskokeilutavoitteisiimme kuuluvat hiiliviisaat rakennusmateriaalit, kuten luontopohjaiset eristeet (rakennusten sisärakenteet), joiden energiatehokkuus- ja hiilivaikutuksia arvioidaan. Ekosysteemitomijoiden kanssa toteutettava osatavoite on yhteiskehittää vaihtoehtoisten luontopohjaisten rakennuseristemateriaalien tuotantoarvoketjuja sekä pilotoida ja demonstroida viherrakennuskonsepteja, joilla molemmilla keinoilla voidaan vähentää ja tasapainottaa rakennusten elinkaaren aikaista lämpöenergian tarvetta ja käyttöä sekä pienentää kasvihuonekaasupäästöjä (rakennusmateriaalien tuotanto/rakentaminen ja asumisen aikainen lämpöenergiatalous). Samalla selvitetään mahdollisuutta ottaa talteen ja varastoida luontopohjaisten rakennusmateriaalien varastoima hiili elinkaaren lopussa, jotta materiaaleista tulisi hiilinegatiivisia. Purkumateriaaleista voidaan pyrolysoidaan biohiiltä, ja savukaasuista voidaan suodattaa hiilidioksidi, ja molemmat voivat johtaa uuteen liiketoimintaan. Pirkanmaan alueellisen erikoistumisen tavoitteita toteuttavien, uusien materiaalintuotantoarvoketjujen luomisen reunaehdot ja kehittämistarpeet selvitetään yhdessä alueen toimijoiden kanssa. Työ linkittää alueen toimijoita toisiinsa sekä kansallisiin ja kansainvälisiin toimijoihin, luoden mahdollisuuksia paitsi alueelliseen myös kv-liiketoimintaan ja tki-yhteistoimintaan hankkeen jälkeenkkin, seuraavissa jatkohankkeissa. Haastamme myös Pirkanmaan alueen asukkaat ja oppilaitokset pohtimaan asumisen kestävyyttä ja materiaalien tuotantoa: miten luontopohjaisilla, futuristisiltakin tässä hetkessä kuulostavilla ratkaisulla voidaan luoda kokonaiskestävämpiä, hyvinvointia tukevia rakennettuja ympäristöjä.

2.1.1 Uudenlaisia eristeratkaisuja alueellisista biomassavirroista

Yhteiskeitettävistä sienirihmastopohjaisia eristeitä ei ole vielä Suomessa kaupallisessa tuotannossa - niiden tutkimuksesta huolimatta. HY ja Luke ovat sienimyseelien alalla tki-toiminnan kärkiorganisaatioita Suomessa ja olemassa olevaa tutkimustietoa saatetaan nyt Pirkanmaan alueellisen liiketoiminnan kehittämisessä hyödynnettäväksi. Sienirihmastosta ja kasvibiomassasta koostuva materiaali, ns. sienirihmastokomposiitti, voi olla vaihtoehto vahtomuovieristeille. Komposiitissa rihmasto toimii tukimatriisina, joka sitoo kasvibiomassan partikkelit rihmamaiseen verkkorakenteeseen. Rihmastokomposiittien ominaisuudet riippuvat rihmaston kasvunopeudesta ja tiheydestä, jotka edelleen määrittyvät raaka-aineena käytettyjen sienilajien ja kasvimateriaalin mukaan. Rihmastokomposiitteja voidaan tuottaa monenlaisia alueellisia biomassasubstraatteja hyödyntäen. Esiselvitämme olemassa olevan tutkimustiedon pohjalta tällaisten uudenlaisten eristemateriaalien tuotantoarvoketjujen mahdollisuudet

Pirkanmaalla (Kuva 1).



Kuva 1. Esiselvitys erilaisten biomassasubstraattien saatavuudesta, toimitusketjuista ja alueen teknologisesta valmiudesta myseelikomposiittituotantoon selvittää. Mahdollisia biomassoja ovat mm. puutuoteteollisuuden, maataloustuotannon ja elintarviketeollisuuden sivuvirrat, sekä kosteikkokasvit.

2.1.2 Eristeprototyyppien yhteiskehittäminen

Lukella ja HY:lla on laajat sienikokoelmat, jotka on testattu biopohjaisten materiaaliratkaisujen osalta. Olemassa olevia tietoja sienilajeista ja -kannoista sekä biologisesta tuotantoprosessista ja substraattien valinnasta hyödyntäen valitaan esimerkkiprototyyppien kasvatukseen alueellisista biomassoista soveltuvimmat. Kasvatusprosessit optimoidaan ja tuotetaan komposiitteja jatkotesteihin ja demonstraatioihin.

2.1.3 Eristeprototyyppien ominaisuuksien testaaminen

Uudentyyppisten biopohjaisten eristetuotteiden rakennusfysikaaliset ominaisuudet testataan, jotta niiden käyttäytymistä todellisissa rakenteissa voidaan arvioida. Tärkeimpiä materiaaliominaisuuksia ovat lämmönjohtavuus, ominaislämpökapasiteetti, vesihöyrynläpäisevyys, tasapainokosteus ja ilmanläpäisevyys. Lisäksi materiaaleista määritetään kapillaarisia kosteudensiirto-ominaisuuksia ja homehtumisherkyys. Mittausten perusteella arvioidaan, millaisiin rakenneratkaisuihin biopohjaiset materiaalit sopivat ja missä ratkaisuissa niitä voidaan hyödyntää tehokkaimmin. Materiaalikokeiden lisäksi parhaita materiaalivaihtoehtoja voidaan tutkia ulkoseinärakenteissa Tampereen yliopiston koerakennuksissa sekä rakennusfysikaalisella tutkimuslaitteistolla (mm. materiaalien kosteustekninen toiminta). Samalla rakenteita verrataan käytössä olevista rakennusmateriaaleista toteutettuihin rakenteisiin. Eristeprototyyppien hiilijalanjälkeä haarukoidaan alustavilla laskelmilla ja määritellään sen sisältämä hiilimäärä, eli hiilikädenjälki.

2.1.4 Kestävän puurakentamisen Living Lab tarjoaa puitteet käytettävyytutkimukselle

Uusien luontopohjaisten rakennusmateriaalien prototyyppinä testataan HY:n puurakentamisen uudessa 'elävässä laboratorioissa', eli 'Living Labissa' Juupajoella, Hyytiälän metsätieteellisellä kenttäasemalla (Kuva 2). Tavoitteena on mm. kerätä rakennusten käyttäjien palautetta materiaalien esteettisistä ominaisuuksista jatkuvatoimisella kävijäkyselyillä.

Hyytiälän Living Lab on puurakenteinen uudisrakennus, jossa on opetus-, kokous- ja majoitustiloja metsäaseman käyttäjille, Helsingin yliopiston maatalous—metsätieteellisen

tiedekunnan ja matemaattis-luonnontieteellisen tiedekunnan tutkijoille ja opiskelijoille sekä vierailijoille ja yhteiskumppaneille niin kotimaasta kuin ulkomailta. Living Lab on innovatiivinen ja avoin tutkimusalusta, joka mahdollistaa rakennetun ympäristön kestävyys-, ilmasto- ja hyvinvointivaikutusten monitieteisen tutkimuksen ja opetuksen. Monipuolinen tutkimusympäristö tarjoaa puitteet mm. puu- ja materiaalitieteiden sekä ihmisten hyvinvoinnin ja kokemusten, fysiikan ja sisäilmatutkimuksen tekemiselle. Lisäksi metsäasemalla voidaan testata erilaisia tutkimukseen pohjautuvia ratkaisuja, tehdä yhteiskehittämistä ja panostaa pitkäaikaiseen tutkimukseen. Metsäasemalla sijaitsee myös maailman johtava ilmakehätutkimuksen mittausasema, Smear II, joka mittaa yli tuhatta asiaa ilmakehästä ja ekosysteemistä osana Ilmakehätieteiden keskus INARin toimintaa.



Kuva 2. Yksi Helsingin yliopiston metsätieteellisen kenttäaseman, Hyytiälän, uudisrakennuksen monista tutkimustehtävistä on puurakennuksen, ympäristön ja käyttäjien vuorovaikutuksen tutkimus [5].

3. Yhteenveto

Rakentaminen ja asuminen ovat edelleen yksi energia- ja materiaali-intensiivisin toimiala yhteiskunnassamme. Hanke lisää yhteiskehitettävillä ratkaisuilla ja arvoketjuilla pitkällä aikavälillä rakennusten energiatehokkuutta, vähentää riippuvuutta uusiutumattomista luonnonvaroista, vähentää rakennusmateriaalituotantoa ja lämmitysenergian käyttöä (ja siten vaikuttaa kasvihuonekaasupäästöjä alentavasti) ja luo hiiliviisasta, jopa hiilen talteenoton kautta hiilinegatiivista, uudenlaista materiaalituotantoa, hyödyntäen luontoinspiroituneita tuotantomenetelmiä ja organismeja ja lisäten alueiden elinvoimaisuutta tukemalla uusien alueellisten materiaalituotantokonseptien kehittymistä.

Lähdeluettelo

- [1] United Nations, Global Status Report, 2017.
- [2] Marinova S, et al. J Cleaner Prod 2020;247:119146.
- [3] European Renovation Wave Strategy, 2021.
- [4] Pavel C & Blagoeva D. 2018. Competitive landscape of the EU's insulation materials industry for energy-efficient buildings. doi:10.2760/750646.
- [5] Hyytiälän Living Lab. Helsingin yliopisto. 2023. Saatavilla (viitattu 9.10.2023): <https://www.helsinki.fi/fi/tutkimusasemat/hyytialan-metsaasema/tutkimus/living-lab/tutkimus-ja-oppimisymparisto>

Teollisesti valmistetut luonnonmukaiset rakennustuotteet

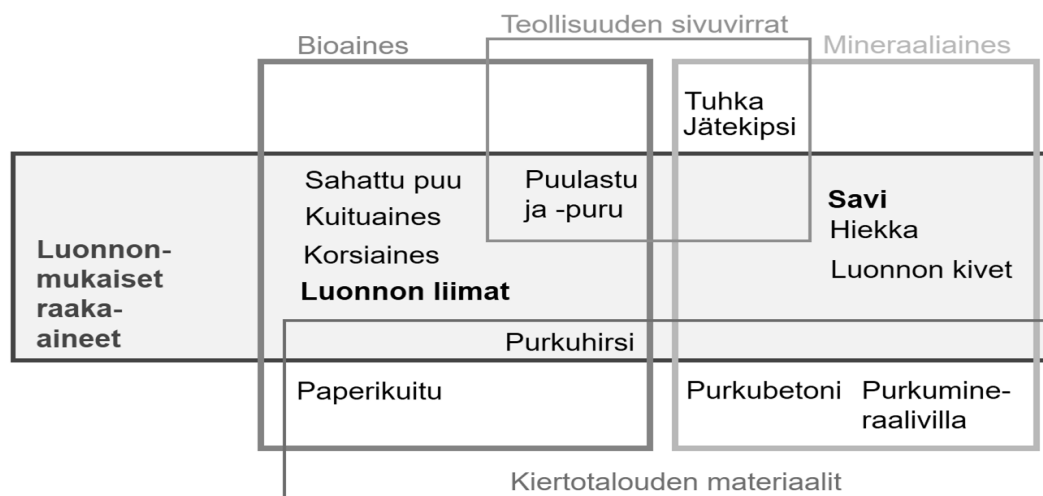
Mikael Westermarck ja Juha Vinha
Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka

Tiivistelmä

Tampereen yliopistossa toteutetussa Nature CO2 -hankkeessa tehtiin esiselvitys luonnonmukaisista rakennustuotteista, ja niiden käyttöpotentiaalista. Näiden vähähiilisten tuotteiden valmistus ja käyttö ovat yleistyneet nopeasti Keski-Euroopassa ja tietoa näistä tuotteista halutaan tuoda myös Suomen rakennusaineteollisuuteen. Hankkeen päätehtävinä oli rakennustuotteiden kartoitus, hiilisisältöjen laskenta ja vertailu sekä tuotteiden käyttöpotentiaalin selvitys. Samalla pyrittiin selvittämään tuotteiden ja rakenteiden tutkimus- ja kehitystarpeita sekä hahmottamaan rakentamisen vähähiilisyden alarajaa.

1. Johdanto

Luonnonmukaiset rakennustuotteet, eli NBB-tuotteet (nature-based building products), koostuvat maa- ja metsätaloudesta sekä maankaivuusta saatavista uusiutuvista ja yleisistä raaka-aineista (Kuva 1) ja niitä voidaan tuottaa ilman korkeita lämpötiloja.



Kuva 1. Luonnonmukaisten raaka-aineiden suhde muihin vähähiilisiin raaka-aineisiin.

Kolmessa vuosikymmenessä NBB-tuotteiden valmistus ja käyttö on laajentunut nopeasti Keski-Euroopassa ja nykyään on tarjolla kymmeniä tuotteita ja laajoja tuoteperheitä. Tämä ympäristöministeriön ja yritysten rahoittama esiselvitys kestävän kehityksen mukaisista rakennustuotteista toteutettiin ajalla 1.5.-31.12.2022, ja se jakautui seuraaviin 3 työpakettiin.

2. Luonnonmukaisten rakennustuotteiden kartoitus

Hankkeen päätehtävänä oli kartoittaa eurooppalaiset teollisesti valmistetut NBB-tuotteet, joista laadittiin loppuraportissa tuotekortit. Tuotteiden valmistus- ja käyttötapojen sekä teknisten ominaisuuksien mukaan tuotteet jaettiin 11 tuoteryhmään (Taulukko 1). Jokaisella valmistajalla on tuotteesta hieman oma versionsa, ja näin myös tuotteiden koostumukset ja ominaisuudet vaihtelevat.

Taulukko 1. Luonnonmukaisten rakennustuotteiden ryhmät.

1. Olkielementit

Raaka-aineita: Vehnän tai kauran olki, Puurunko.

Olki asennetaan puurunkoon haluttuun tiheyteen, olkipinnat leikataan tasaisiksi ja kyljet tai päädyt suljetaan vanerilla tai liimapuulla tuotteen mukaan. Tuulisuojana toimii vesihöyryn läpäisevä kalvo, jolla voidaan sadesuojata myös elementin sisäpinta asennuksen aikana.

Elementeistä voidaan rakentaa lämmöneristäviä ja kantavia ulkoseiniä kuuteen kerrokseen asti ja niitä käytetään myös vanhojen rakennusten lisäeristämiseen tai esim. massiivipuulementtien eristekerroksena.



2. Kasvipohjaiset eristelevyllät

Raaka-aineita: Hamppu, pellava, juutti, puuvilla, turve, polyesteri, palon- ja homeenestoaineet.

Kasvipohjaisten eristelevyjen ja -villojen valmistukseen käytetään kasvien lyhyitä kuituja, joita tekstiiliteollisuus ei hyödynnä. Kuidut karstataan päällekkäisiksi kerroksiksi, jotka sidotaan yhteen esim. kierrätyspulloista sulattamalla saadulla polyesterikuidulla. Näin saatu eriste käsitellään sitten palon- ja homeenestoaineella sekä pakataan rulliksi tai puolijäykiksi levyiksi.

Sideaineen kanssa voidaan valmistaa jopa 250 mm paksuja eristeitä, mutta ilman sideaineita voidaan myös valmistaa ohuempia mattoja tai nauhoja.



3. Lampaanvillaeristeet

Raaka-aineita: Lampaanvilla, polyesteri.

Vapaasti laiduntavien lampaiden villa on enimmäkseen paksua ja kestävää kuitua, joka ei sovellu tekstiiliteollisuuteen, mutta käy kuitenkin erinomaisesti villaeristeen valmistamiseen. Keritty villa lajitellaan, pestään, kuivataan ja karstataan ohuiksi harsoiksi, jotka voidaan liittää toisiinsa mekaanisesti neulaamalla tai liimata toisiinsa sulatetulla polyesterillä.

Kevyttä lampaanvillaeristettä käytetään normaalisti eristyksessä ja tiheämpää mattoa käytetään parketin alushuopana.

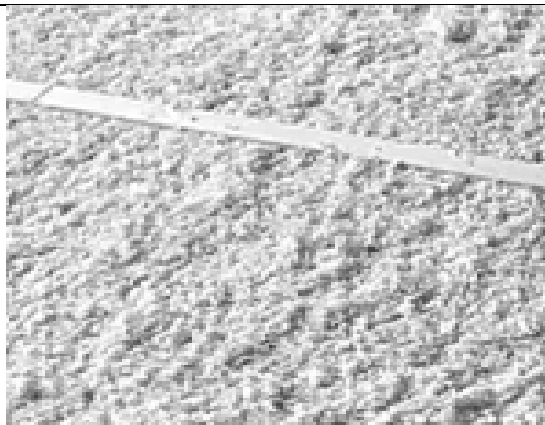


4. Puhalluseristeet

Raaka-aineita: Kutterilastu, olki, hamppu, palonestoaine.

Kutterilastusta siivilöidään hienoin ainesosa pois, ja korsiainekset silputaan ennen pakkausta. Palonestoaineena on käytetty ympäristöystävällisenä ja terveyshaitattomana pidettävää ammonium fosfaattia.

Eristeet puhalletaan tätä varten rakennetulla koneella vaakapalkiston väliin tai ilmansulkupaperista, levyistä ja puurungosta muodostuvaan koteloon. Höylälastua lämmöneristeenä tutkitaan parhaillaan Tampereen yliopiston Ecosafe-hankkeessa [1].



5. Korsipuristelevyt

Raaka-aineita: Olki, hamppu, polyesteri, hartsi, kalkki.

Korsipuristelevyjien puristamisessa käytetään mukana lämpöä, minkä jälkeen levyt leikataan mittaansa ja kuivataan.

Levyjen pääasiallinen käyttökohde Keski-Euroopassa on muurattujen ulkoseinien ulkopuolinen lisälämmöneristys ja rappausalusta. Vesihöyryä hyvin läpäisevänä ne soveltuvat hyvin kalkkirappauksen alustaksi ja tarjoavat mineraalivillaa paremman iskunkestävyyden. Levyjä käytetään myös sisäpinnan savirappauksen alustana ja lisälämmöneristeenä varsinkin historiallisten talojen korjauksessa.



6. Ruokolevyt ja -matot

Raaka-aineita: Ruoko, galvanoitu teräslanka.

Järviruokoa ei tarvitse kylvää tai lannoittaa, joten tuotteen kustannukset tulevat lähinnä talvileikkuusta, kuljetuksesta ja valmistuksesta. Tasapaksuista ruo'oista valmistetaan galvanoidulla rautalangalla sidottuja ruokomattoja sekä useista ruokokerroksista koostuvia ruokolevyjä. Kiinnitys puurakenteeseen tehdään galvanoiduilla nauloilla tai hakasilla.

Ruokolevy on käytetty julkisivujen lämmöneristeenä sekä rappausalustana, samoin kuin ruokomattoa. Sillä voidaan myös vaimentaa välipohjien runkoääniä.



7. Savilaastit

Raaka-aineita: Savi, hiekka, olki, hampun päistäre, puukuitu, pigmentit.

Savilaastin aineet sekoitetaan kuivina myllyssä moniakselisekoittimilla, jonka jälkeen laasti säkitetään.

Savirappauslaastit soveltuvat sisätilojen uudis- sekä korjausrakentamiseen ja niitä voidaan käyttää myös hirsirakenteiden ja muiden puurakenteiden palonsuojauksena sekä äänieristeenä. Rappauslaastia voidaan sekoittaa ja ruiskuttaa tavanomaisilla työmaakoneilla tai levittää perinteisesti käsityökaluilla. Savilaasti ei kovetu märkänä, minkä takia rappausjänteet voidaan käyttää uudestaan. Savilaasteja käytetään myös uunien muuraamiseen.



8. Savilevyt

Raaka-aineita: Savi, hiekka, perliitti, puukuitu, hampun kuitu ja päistäre, olki, heinä, juuttikangas, lasikuituverkko, ruokomatto.

Savilevyjä puristetaan muottiin kosteasta savimassasta. Pinnanvahvistusverkko ja lämmitys tai viilennysputkisto voidaan integroida levyyn valsaamalla massaa, tai tuotteita voidaan valmistaa myös iskemällä hyvin kuivasta massasta, jolloin vältetään kuivauskustannuksilta ja halkeiluilta sekä säästetään kuivauskustannuksissa. Paloturvalliset savilevyt ruuvataan rankarakenteisiin seiniin sekä alakattoihin, jossa ne tasapainottavat lämpöä ja kosteutta sekä eristävät ääntä. Levyt yllirapataan hienorappauksella, ja maalataan savimaalilla.



9. Savimassat ja -elementit

Raaka-aineita: Savi, hiekka, sora, olki hampun päistäre, kutterinlastu.

Savimassat sekoitetaan maakuivana, säkitetään, ja toimitetaan rakentajille. Massiivisaven sullomisessa seinämuottiin tai lattiapinnoitteeksi rakentajat käyttävät pneumaattista iskulaitetta. Massoista voidaan valmistaa myös teollisin menetelmin seinäelementtejä, ja rakentamisessa voidaan käyttää tavanomaisia valu ja ruiskutusmenetelmiä. Hienojakoisesta savimassasta voidaan lisäksi 3D-tulostaa rakenteita. Biomateriaalit antavat kevytsavimassalle lämmöneristävyyttä ja esim. kutterinlastua voidaan savettaa kosteuskapasiteetin parantamiseksi.



10. Savitiilet ja -laatat

Raaka-aineita: Savi, hiekka, perliitti, tiilimurska, olki, puukuitu, sahanpuru, hampun kuitu ja päistäre.

Savitiiliä ja -laattoja muottipuristetaan ja sulakepuristetaan kosteasta savimassasta tai iskemällä hyvin kuivasta massasta, kuten savilevyjä. Niitä ei polteta, mutta tuotteiden kuivaamiseen voidaan käyttää tiilitehtaiden polton hukkalämpöä.

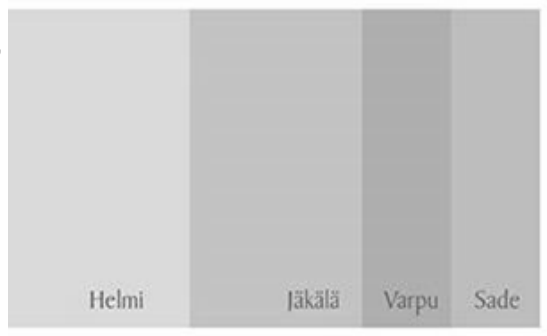
Savitiiliä käytetään Keski-Euroopassa ennen kaikkea historiallisten ristikkotalojen seinien entisöinnissä kantavan puurungon täyteenä. Tiheillä tiilillä voidaan rakentaa kantavia seiniä myös uudisrakentamisessa. Lattialaatat ladotaan painoksi puisien välipohjien päälle äänieristäväksi massaksi, jonka päälle voidaan asentaa esim. parketti.



11. Maalit ja pinnoitteet

Raaka-aineita: Tärkkelys, pellavaöljy, terva, savi, maito, kananmuna, pigmentit

Luonnonmukaiset maalit ja pinnoitteet valmistetaan maalinsekoitusmyllyllä, sekoittamalla bio- ja mineraalipohjaiset sideaineet pigmentteihin, jonka jälkeen maalit purkitetaan. Pigmenteistä pisimpään on käytetty maasta uutettuja maavärejä, kuten okraa, siennaa, umbraa sekä hiiltä, ja nykyään rautaoksidia. Luonnonmukaisista maaleista ja pinnoitteista löytyy tuote kaikille pinnoille rakennuksissa.



Lämmöneristeiksi kehitettyjen tuotteiden lämmönjohtavuus on parhaimmillaan mineraalivillan luokkaa, mutta useimpien tuotteiden myyntiargumentti on hyvä ääneneristys, mikä kasvaa tiheyden myötä. Usein mainitut NBB-tuotteiden edulliset vaikutukset sisäilman olosuhteisiin perustuvat pitkälti niiden rakennusfysikaalisiin ja kemiallisiin ominaisuuksiin, ja kyseiset vaikutukset voidaan luokitella seuraavaan 5 ryhmään:

- Huoneilman kosteuden tasapainotuskyky
- Huoneen lämpötilan tasapainotuskyky
- Rakenteiden vikasietoisuus ja kosteusturvallisuus
- Kemialliset päästöt ja myrkyttömyys
- Hajujen eliminointi

Nämä positiiviset vaikutukset sisäilman olosuhteisiin ja rakennusten käyttäjien terveyteen

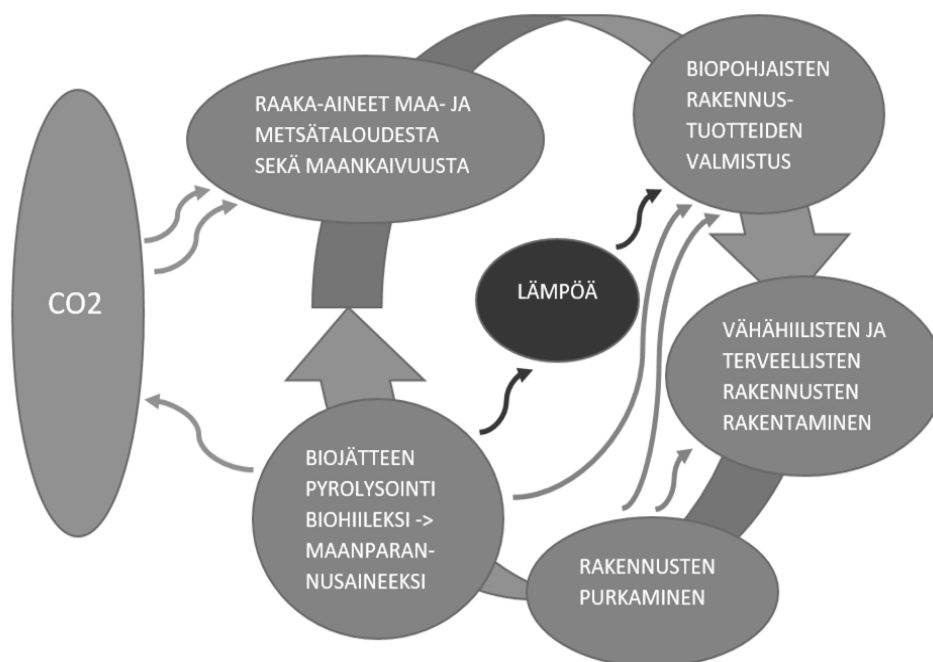
puoltavatkin vahvasti NBB-tuotteiden käyttöä.

Tavanomaiset puutuotteet ovat Suomessa hyvin tunnettuja ja niitä jo valmistetaan Suomessa, joten niistä ei ollut tarpeen tehdä omia tuotekortteja. Pystysuuntaisen kuormien lisäksi puu pystyy ottamaan vastaan hyvin vaakasuuntaisia kuormia suuren taivutuslujuutensa takia ja toimimaan palkkina. Luonnonmukaisia rakennustuotteita onkin käytetty menestyksekkäästi erilaisissa puurakenteissa kuten hirsiseinissä, massiivipuulevyrakenteissa, rankarakenteisissa pysty- ja vaakarungoissa sekä pilari-palkkirakenteissa.

3. Hiilisisältöjen laskenta

Saatavilla olevien ympäristöselosteiden perusteella NBB-tuotteilla voitaisiin tällä hetkellä laskea tavanomaisten puurakenteiden hiilijalanjälkeä arviolta 10–15 %. Tulevaisuudessa investointi- ja tuotantomäärillä sekä uusiutuvilla energialähteillä on suuri vaikutus NBB-tuotteiden tuotantokustannuksiin ja hiilijalanjälkeen. Suomessa on kuitenkin jatkuvasti kasvavan tuulivoimakapasiteetin sekä hyvän raaka-ainesaatavuuden puolesta erinomaiset lähtökohdat luonnonmukaisten ja vähäpäästöisten rakennustuotteiden valmistukseen.

Hankkeessa ehdotetaan myös menetelmää ottaa huomioon tuotteiden hiilikädenjälki käyttämällä biopohjaisen rakennuspurkujätteen hiilen talteenottoa (Kuva 2). Esimerkiksi pyrolysoinnilla rakenteisiin varastoituneesta hiilestä jäisi noin puolet palaamatta ilmakehään. Käyttämällä yksivuotisia kasveja rakennustuotteiden raaka-aineena ei liioin aiheuteta hiilinielun katoa.



Kuva 2. Ehdotus rakennustuotteiden eloperäisen hiilen talteenotosta ja käytöstä biohiilenä.

Hiilidioksidia voidaan myös suodattaa biopohjaisten rakennustuotteiden valmistuksessa sekä purkujätteen poltossa tulevasta palokaasuista. Tämä nesteytetty hiilidioksidi on kuitenkin pystyttävä varastoimaan pitkäaikaisesti, jotta se voitaisiin ottaa huomioon rakennushankkeen ilmastonselvityksessä [2–4].

4. Käyttöpotentiaali

NBB-tuotteiden käyttöpotentiaalia Suomessa selvitettiin työpajassa ja tuotenäyttelyssä (Kuva 3)

sekä näitä seuraavan internet-kyselyn avulla. Tuotekyselyssä pärjäisivät parhaiten tuotteet, joita jo käytetään Suomessa ja vastaajat hyväksyisivät keskimäärin 15–20 % tavanomaisia rakennustuotteita korkeammat hinnat.



Kuva 3. Työpajan yhteydessä järjestettiin luonnonmukaisten rakennustuotteiden tuotenäyttely.

5. Yhteenveto

Euroopassa teollisesti valmistettavien NBB-tuotteiden kartoituksessa löytyi suuri määrä tuotteita, joista tehtiin niiden valmistus- ja käyttötapojen sekä teknisten ominaisuuksien perusteella 11 tuotekorttia. Kartoitetut tuotteet sopisivat hyvin täydentämään Suomessa käytössä olevia puurakenteita, ja näiden yhdistelmistä voitaisiin innovoida useita talonrakennuskonsepteja. NBB-tuotteiden terveysvaikutukset perustuvat pitkälti niiden rakennusfysikaalisiin ja kemiallisiin ominaisuuksiin kuten huoneilman kosteuden ja lämpötilan tasapainotuskykyyn, kosteusvarmuuteen sekä rakenteiden mikrobiongelmien, kemiallisten päästöjen ja hajujen välttämiseen. Terveysvaikutukset puoltavatkin vahvasti NBB-tuotteiden käyttöä. Saatavilla olevien ympäristöselosteiden perusteella NBB-tuotteilla voitaisiin tällä hetkellä laskea tavanomaisten puurakenteiden hiilijalanjälkeä arviolta 10–15 %. Tulevaisuudessa investointi- ja tuotantomäärillä sekä uusiutuvilla energialähteillä on suuri vaikutus NBB-tuotteiden tuotantokustannuksiin ja hiilijalanjälkeen. Suoritetussa tuotekyselyssä pärjäisivät parhaiten tuotteet, joita jo käytetään Suomessa ja vastaajat hyväksyisivät keskimäärin 15–20 % tavanomaisia rakennustuotteita korkeammat hinnat.

Hankkeen loppuraportti on ladattavissa osoitteesta: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-03-2835-1>

Lähdeluettelo

- [1] Tampereen yliopisto. Ecosafe-hanke. (2023). Kosteusturvalliset ja ympäristöystävälliset purueristeiset puurakenteet. Saatavilla: <https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/tutkimusprojektit/ecosafe/>
- [2] EN15804. (2012 & 2019). Sustainability of construction works. Environmental product declarations. Core rules for the product category of construction products.
- [3] ISO14067. (2018). Greenhouse gases. Carbon footprint of products. Requirements and guidelines for quantification.
- [4] Ympäristöministeriö. (2021). Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä 2021. Saatavilla: <https://www.lausuntopalvelu.fi/FI/Proposal/DownloadProposalAttachment?proposalId=0b297461-cdee-4657-9a4e-d2791315257d&attachmentId=15860>

Korreista kerrostaloksi STALK-hanke

Mikael Westermarck¹, Matti Kilpiäinen², Pauli Karjala¹, Ilkka Tuurala¹, Matti Hautala¹, Sami Kiviaho¹, Mika Alanen¹, Johanna Liblik³, Timo Jokinen⁴ ja Juha Vinha¹

¹ Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka

² Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu XAMK

³ Tallinn University of Technology, Department of Civil Engineering and Architecture, Structural Engineering Research Group

⁴ Palotekninen Insinööritoimisto Markku Kauriala Oy

Tiivistelmä

Tampereen yliopiston johdolla toteutettavassa Stalk-hankkeessa tutkitaan korren käyttömahdollisuuksia rakentamisessa, sillä vuosittain uusiutuvana materiaalina korren hyötykäyttö ei pienentäisi maamme hiilinielua. Hankkeen yritykset kehittävät suomalaista luonnonmukaisiin rakennustuotteisiin perustuvaa ja energian käytöltään hiilineutraalia kerrostalokonseptia, jonka ulkoseinissä käytetään olkielementtejä. Tässä hankkeessa tutkitaan rakenteen rakennusfysikaalista toimintaa kenttäkokein ja paloturvallisuutta palosimulaatiolla. Hankkeessa pyritään kehittämään myös korsiaineksestä ja savesta koostuva uuden tyyppinen palonsuojatuote sekä korsiaineksestä ja biopohjaisista liimoista koostuva rakennuslevy. Lopuksi hankkeessa kootaan näistä asioista koulutuspaketti, jolla pyritään saamaan tämä uusi rakennuskonsepti yleistymään.

1. Johdanto

Olkielementtejä valmistavat yritykset ovat osoittaneet, että oljenkorsi on teknisiltä ominaisuuksiltaan ja hintansa puolesta varteenotettava vaihtoehto nykymateriaaleille, ja sillä voidaan saavuttaa huomattavia positiivisia ilmasto- ja sisäilmavaikutuksia. Myös muut korsimateriaalit herättävät suurta mielenkiintoa, sillä näillä yksivuotisilla kasveilla voitaisiin sitoa huomattava määrä hiilidioksidia sekä vesistöjen liikaravinteita ja varastoida ne rakennukseen pitkäikäisesti hiilinielua pienentämättä. Savea puolestaan saataisiin edullisesti ja vähähiilisesti esimerkiksi kaivuutyömailta, ja sillä voidaan lisätä rakenteiden paloturvallisuutta. Nature CO2 -hankkeessa [1] selvitettiin, että luonnonmukaisilla rakennustuotteilla voitaisiin tällä hetkellä laskea tavanomaisten puurakenteiden hiilijalanjälkeä arviolta 10–15 %. Tässä ympäristöministeriön, yritysten sekä Rakennustuotteiden Laatu säätiön rahoittamassa hankkeessa tutkitaan, voitaisiinko myös Suomessa rakentaa yli kaksikerroksisia rakennuksia luonnonmukaisesti ja saada näin suurempia positiivisia ilmastovaikutuksia aikaiseksi rakennusteollisuudessa [2]. Tutkimus toteutetaan ajalla 1.3.2023–31.12.2024 ja se jakautuu neljään työpakettiin.

2. Olkielementin tutkimus

Olkielementin materiaaliominaisuuksien perusteella sen valmistaja Ecocon on laskenut elementin toimivan hyvin pohjoisessa ilmastossa, eikä Suomeen toteutetuissa pientaloissa ole ilmennyt ongelmia, mutta mittauksin todennettua tietoa elementin lämpö- ja kosteusteknisestä toiminnasta ei kuitenkaan ole saatavilla. Tietoa kaivataan erityisesti kerrostalorakentamista varten, koska siellä tarvitaan paloturvallisuuden ja viistosateen takia erilaisia pintakerroksia kuin on käytetty pientalorakenteissa.

Tarkemman tiedon saamiseksi olkielementteihin asennettiin anturit ja elementit asennettiin

koerakennukseen elokuussa 2023. Elementit jaettiin kahteen osaan korkeussuunnassa, niin että sisäpinnassa yhdellä osalla on savirappaus (Kuva 1) ja toisella osalla palonsuojakipsilevy (Fermacell). Elementin ulkopinnassa on vesihöyryä läpäisevä ilmansulkukalvo sekä paksu puukuitulevy. Julkisivu verhottiin rappauksen sijaan tuulettuvalla puuverhouksella, joka on kosteusvarmempi ratkaisu kerrostalorakentamisessa viistosateen aiheuttaman kastumisriskin takia.



Kuva 1. Olkielementin sisäpinnan savirappausta ja ulkopinnan anturointia.

3. Biorakennuslevyn kehitys järviruo'osta

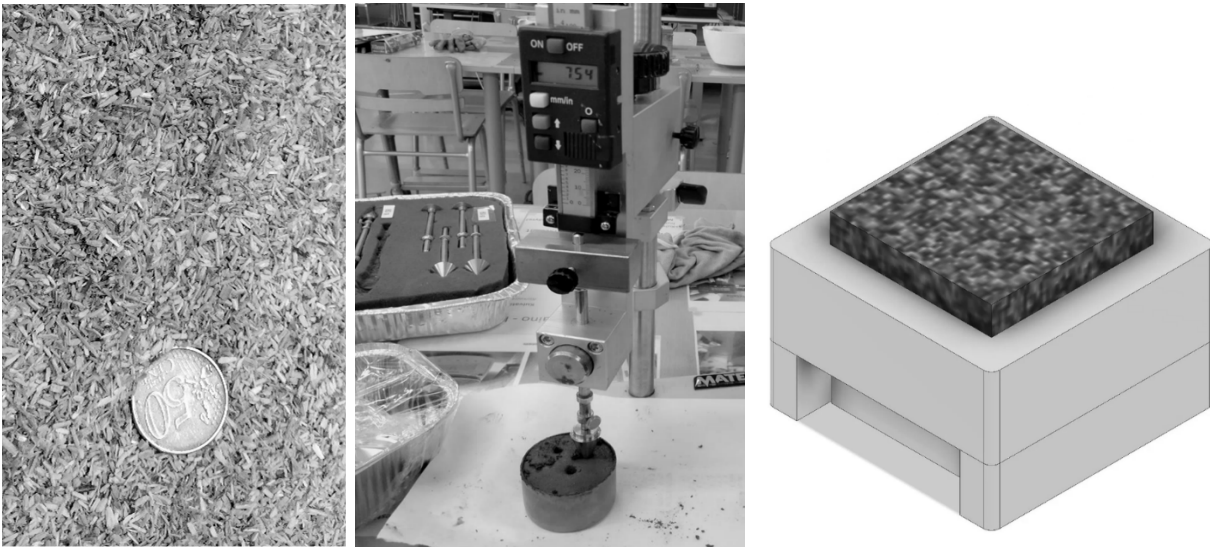
Rehevöityneistä vesistöistä poistetulle järviruo'olle etsitään nyt arvokasta käyttöä, ja Keski-Euroopassa valmistettavien olkipuristelevyjen tuotantotekniikka ja biosideaineet voisivat hyvinkin soveltua myös rakennuslevyn valmistamiseen silputusta järviruo'osta (Kuva 2). Tätä tuotekehitystä tekee Stalk-hankkeessa Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, jonka Biosivuhankkeessa puristetaan rakennuslevyjä myös öljyhampun korresta. Hankeen alussa selvitettiin korsiaineksen murskausmenetelmiä, joista maissin murskauslaite ruo'on keruuvaiheessa sekä vasaramylly prosessointivaiheessa osoittautuivat tehokkaiksi. Levyjä on valmistettu perunasta ja ohrasta saatavalla tärkkelyksellä puristamalla niitä noin 10 minuuttia 160–180 °C asteen lämpötilassa sekä 20–100 baarin puristuksessa. Seuraavaksi tutkitaan levyjen mekaanista lujuutta sekä rakennusfysikaalisia ja paloteknisiä ominaisuuksia.



Kuva 2. Järviruo'on matka rannalta rakennuslevyksi.

4. Savilaastin kehitys palonsuojatuotteeksi

Biopohjaisten eristeiden käyttö suomalaisissa kerrostalorakenteissa on ollut haastavaa palonormistomme takia. Tässä hankkeessa haluttiin lähteä ratkomaan tätä luonnonmukaista rakentamista koskevaa suurinta haastetta palosimuloinnilla ja palolta suojaavalla savilaastilla. Palotutkimukseen osallistui myös kansainvälinen paloasiantuntija, joka on tutkinut puurakenteiden palosuojasta savirappauksella. Rappauslaastin tuotekehityksen tavoitteeksi asetettiin vähintään paloluokan A2 pintamateriaali, jolla saavutetaan 30 minuutin palonsuoja-aika mahdollisemman ohuella kerroksella. Palonsuojaverhoukselta tyypillisesti vaadittavat palonsuoja-ajat ovat 10 minuuttia (K₂10) tai 30 minuuttia (K₂30) [3]. Savimassan palonsuoja-ajan pidentämiseksi saveen sekoitettiin hienoksi silputtuja biomateriaaleja, kuten puuta, järviruokoa, hampun kortta, lampaanvillaa, sekä näistä tehtyjä biohiiliä (Kuva 3). Biomateriaaleja voi lisätä lämpöarvojen mukaan kuitenkin vain sen verran, että ne pysyvät paloluokassa A2, eli tuotteen lämpöarvo ei ylitä 3 MJ/kg [4].



Kuva 3. Bioaines silputtiin hienoksi, saveen viskositeetti määritettiin kartion pudotuslaitteella ja koekappaleet tehtiin 3D-printatulla muotilla.

Savimassoja optimoitiin kartiokalorimetrialaitteella tehtyjen polttokokeiden perusteella (Kuva 4). Standardin [5] mukaisen materiaalin paloluokituskokeessa koekappaleet eivät leimahtaneet ja ne voitiin luokitella paloluokkaan A1 - B. Lisäksi mitattiin, missä ajassa lämpötila nousi koekappaleen suojatulla puolella 270 °C asteeseen, jossa puurakenne alkaa hiiltymään.



Kuva 4. Koekappale polttokokeessa kartiokalorimetrialaitteessa.

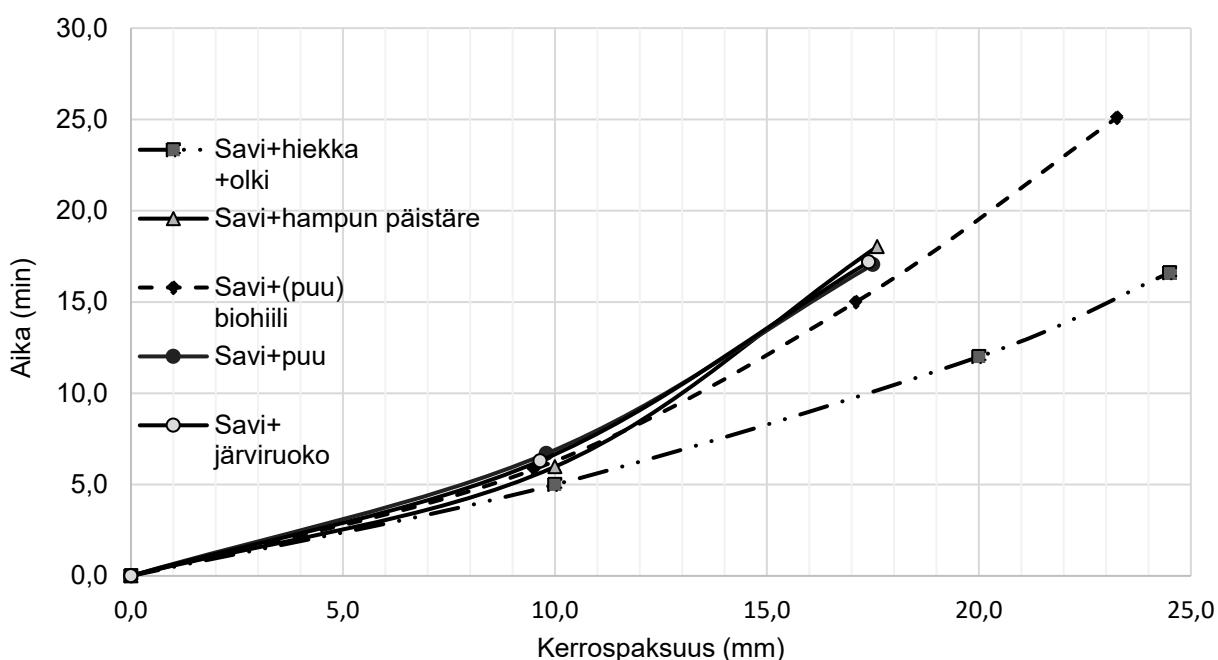
Taulukossa 1 esitetään kartiokalorimetrialaitteella saatuja palonsuoja-aikoja eri savimassoille, jotka

ovat paloluokassa A2. Tähdellä (*) merkityt tulokset ovat Johanna Liblikin aiemmasta tutkimuksesta [6]. Savimassojen palonsuoja-aika vaikuttaa riippuvan niiden biomateriaalipitoisuudesta, eikä pelkästään niiden tiheydestä, kuten aikaisemmin oletettiin.

Taulukko 1. Yhteenveto koekappaleiden ominaisuuksista ja palonsuoja-ajoista (Tähdellä (*) merkityt tulokset Johanna Liblik Taltech [6]).

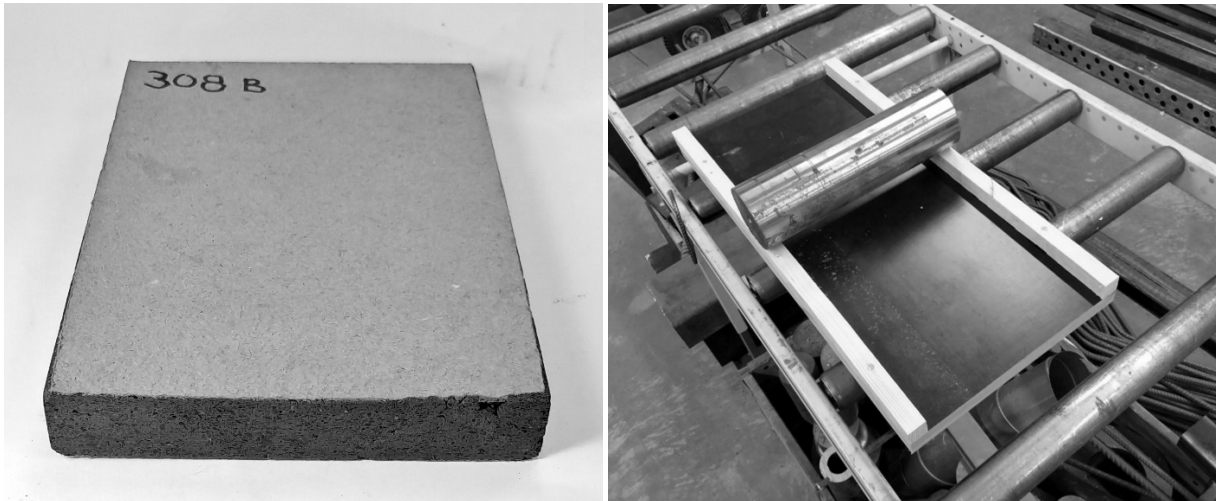
Ominaisuudet / Koostumukset	Savi+hiekka +olki		Savi+hampun päistäre		Savi+puu		Savi+järviruoko		Savi+(puu) biohiili	
	mm	min	mm	min	mm	min	mm	min	mm	min
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	10*	5*	10,0	6,0	9,8	6,7	9,7	6,3	9,5	5,8
	20*	12*	17,6	18,0	17,5	17,1	17,4	17,2	17,1	15,0
	24,5	16,6							23,3	25,1
Kartiokalorimetri-laitteella tehdyn pikapalotestin tulokset	30*	19*								
	40*	30*								
Biomateriaalipitoisuus (paino %)	n. 3 %		16 %		15 %		16 %		9 %	
Biomateriaalin tiheys (kg/m ³)			420		750		600		860	
Massan tiheys (kg/m ³)	1860		930		1260		1160		1370	
Paksuus, jolla saavutetaan 15 min palonsuoja-aika (mm)	23		16		16		16		17	
Levyn (1,2x2,7 m) paino mainitulla paksuudella (kg)	139		48		65		60		75	

Kuvan 5 perusteella voidaan arvioida, mihin palonsuoja-aikaan päästään erityyppisten savimassojen eri kerrospaksuuksilla. Koska palonsuoja-aika lisääntyy nopeammin kuin kerrospaksuus (suuntaviivat käyristyvät ylöspäin) on mahdollista, että 30 palonsuoja-aikaan päästään tuplaamalla 15 minuutin palonsuojakerros ja ehkä ohuemmallakin kerroksella. On kuitenkin huomioitava, että vaikka kartiokalorimetri-laitteella voidaan arvioida edullisesti materiaalien palonsuojauskykyä, kokeen tuloksia voidaan tulkita vain rajoitetusti. Virallinen palotesti (EN 14135) suoritetaan täysimittaisessa uunissa ja noudattaa standardin ISO 834 nousevaa lämpötila/aikakäyrää määrittääkseen palonsuojaverhouksen kyvyn suojata alla olevia tuotteita.



Kuva 5. Kerrospaksuuden vaikutus palonsuoja-aikaan, kun massat ovat paloluokassa A2.

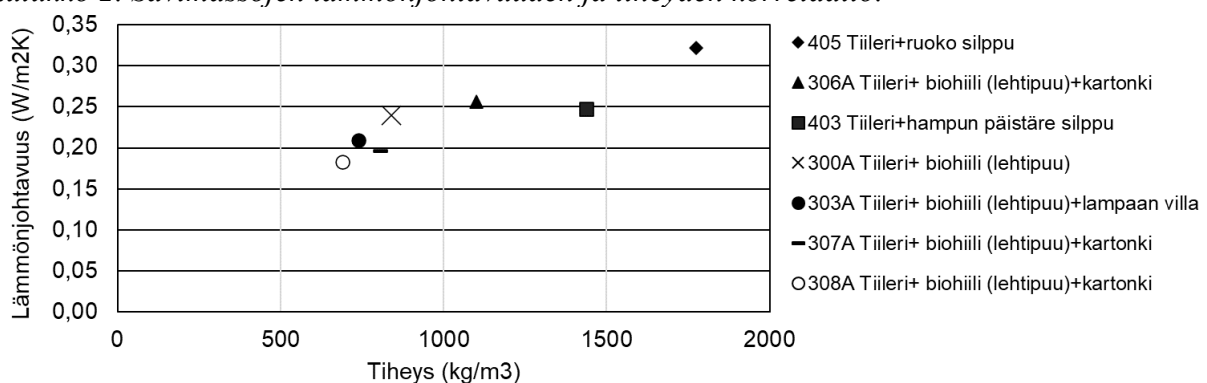
Biosivu-hankkeessa kehitetään lisäksi samasta savimassasta koostuvaa palonsuojalevyä (Kuva 6), ja tutkitaan kartongin ja verkkojen sekä savimaalin vaikutusta savilevyjen ominaisuuksiin. Savilevyn osalta vain hampun päistärettä sisältävällä kevyellä massalla päästiin paloluokka A2 levyyn, joka antaa 15 minuutin palosuojauksen, eikä paina täysimittaisena (1,2 x 2,7 m) yli 50 kiloa. Tulokset osoittavat, että mitä tulee taustatuotteen lämpötilan nousuun, 30 minuutin kapselointiaikaan (palonsuojauskykyyn) voitaisiin siis päästä kahdella 16 mm paksulla levyllä tai rappausten ja levyn yhdistelmällä, mutta tämän varmentaminen vaatii virallisen palokokeen.



Kuva 6. Savimassasta voidaan valmistaa myös levyjä, jotka voidaan pinnoittaa esimerkiksi kartongilla.

Koekappaleiden lämmönjohtavuuksia on mitattu normaaleissa käyttölämpötiloissa, ja ne korreloivat odotetusti materiaalin tiheyden kanssa (Taulukko 2). Jatkossa aloitetaan kehitettyjen tuoteprototyyppien mekaanisten sekä muiden rakennusfysikaalisten ominaisuuksien tutkiminen. Myöhemmin levyille suoritetaan virallinen palokoe ja parhaan laastin arvoilla teetetään ostopalveluna palosimulaatio, jotta nähdään, kuinka hankkeen tuotteita voitaisiin käyttää P0(P2) paloluokan rakennuksissa.

Taulukko 2. Savimassojen lämmönjohtavuuden ja tiheyden korrelaatio.



5. Koulutuspaketti kestävästä kerrostalosta

Yhtenä lopputulemana on hankkeen koulutuspaketti kestävä kehityksen periaatteiden mukaisesta rakentamisesta. Hankkeen yritykset ovat alkaneet suunnittelemaan *Kestävää Kerrostaloa*, jonka paloturvallisuus varmennetaan edellä mainitulla palosimulaatiolla. Rakennuksen suunnittelussa hyödynnetään kantavaa puurakennetta, tässä hankkeessa tutkittuja kolmea rakennustuotetta sekä

muita luonnonmukaisia rakennustuotteita, joita kartoitettiin aiemmin Tampereen yliopistossa tehdyssä Nature CO₂ -hankkeessa [1]. Myös rakennuksen talotekniikasta suunnitellaan hiilineutraalia uuden laskentaohjelman avulla, joka optimoi rakennuksen energiakäyttöä. Näistä osista koostuva rakennusalan oppilaitoksille suunnattu koulutusaineisto tulee vapaasti saataville verkkoon, ja aineistoa hyödynnetään eri rakennusalan koulutustilaisuuksissa sekä artikkeleissa.

6. Yhteenveto

Hanke on ollut käynnissä vajaan kolmanneksen ajastaan ja sen aikana on saatu:

- Asennettua olkielementti koerakennukseen onnistuneesti ja aloitettu lämpö- ja kosteustekniset mittaukset
- Kehitettyä menetelmä puristaa rakennuslevyjä korsimateriaalista
- Optimoitua savirappauslaastin koostumus sen paloteknisten ominaisuuksien suhteen niin, että massasta voitaisiin myös puristaa täysimittaisia palonsuojalevyjä
- Aloitettu koulutusaineiston kerääminen Kestävän kerrostalon konseptista ja luonnonmukaisista rakennustuotteista.

Korsipuristelevyjen ja savituotteiden mekaanisten ja rakennusfysikaalisten tutkimusten suunnitelmat on tehty ja kokeet ovat alkamassa. Tutkimusten ja palosimulaation tuloksia laitetaan esille tulevana talvena hankkeen kotisivulle:

<https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/tutkimusprojektit/stalk-ja-biosivu/>.

Lähdeluettelo

- [1] Westermarck, M. ja Vinha, J. 2023. Esiselvitys luonnonmukaisista rakennustuotteista ja niiden käyttöpotentiaalista. Tampere, Tampereen yliopisto. 70 s. Julkaisun pysyvä osoite on <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-03-2835-1>.
- [2] Ympäristöministeriö. (2021). Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä 2021. Saatavilla: <https://www.lausuntopalvelu.fi/FI/Proposal/DownloadProposalAttachment?proposalId=0b297461-cdee-4657-9a4e-d2791315257d&attachmentId=15860>
- [3] E1 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Rakennusten paloturvallisuus, Määräykset ja ohjeet 2011.
- [4] ISO 1716:2018. 2018. Reaction to fire tests for products — Determination of the gross heat of combustion (calorific value).
- [5] ISO 5660-1:2015. Tarkistettu 2020. Reaction-to-fire tests — Heat release, smoke production and mass loss rate — Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method) and smoke production rate (dynamic measurement).
- [6] Liblik, J. 2015. Protective effect of clay plaster for the fire design of timber constructions. Tallinna, Tallinn University of Technology – TalTech. 99 s.

A9. Ilmastonmuutokseen sopeutuminen

Uudet rakennusfysiikan mitoitusvuodet ajasta riippuviin simulointeihin – Rakentamisen mitoitussäät (RAMI) -hankkeen tuloksia

Anssi Laukkarinen, Teemu Jokela ja Juha Vinha
Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka

Tiivistelmä

Rakenteiden tulee olla lämpö- ja kosteusteknisesti toimivia koko suunnitellun käyttöiän ajan. Asetettujen tavoitteiden saavuttamista voidaan arvioida laskennallisesti, mutta luotettavien tulosten saaminen asettaa myös tiettyjä vaatimuksia käytettäville menetelmille ja laskelmien lähtötiedoille. Tässä artikkelissa käsitellään uusien ajasta riippuviin simulointeihin tarkoitettujen rakennusfysikaalisten mitoitusvuosien valintaa ja käyttöä Rakentamisen mitoitussäät (RAMI) -hankkeen pohjalta. Uudet mitoitusvuodet korvaavat aiemmin FRAME-hankkeessa määritetyt vuodet.

1. Johdanto

Rakennusfysiikan laskentatarkastelut mahdollistavat rakennusten vaipparakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan arvioinnin uusissa ilmasto-olosuhteissa ja toisaalta sellaisten rakenteiden toimivuuden arvioinnin, joita ei ole vielä rakennettu. Laskennallisia tarkasteluja on mahdollista tehdä useilla eri tavoilla, mutta yksi keskeinen on käyttää valmiita ajasta riippuviin laskentatarkasteluihin tarkoitettuja laskentaohjelmia, kuten WUFI [1], Delphin [2] tai Comsol Multiphysics [3]. Tällaiset laskentamallit edellyttävät kuitenkin runsaasti lähtötietoja ja jos niitä ei ole valmiiksi käytettävissä tai niitä ei tunneta tarkasti, voi tulosten vaihteluväli olla suuri, mikä aiheuttaa epävarmuuksia tulosten tulkintaan.

Rakennusten ulko-olosuhteet eivät ole samanlaisia eri vuosina. Asian hallitsemiseksi on kehitetty erilaisia lähestymistapoja, kuten suoraan havaintodatasta laskettavat tunnusluvut [4], keskimääräistä vuotuista energiankulutusta kuvaavat tuntiaineistot [5] ja kosteusteknisesti haastavia olosuhteita kuvaavat mitoitusvuodet [6]. Käyttämällä rakenteiden suunnittelulaskelmissa ulko-olosuhteina mitoitettavia olosuhteita, saadaan vähennettyä laskentatyön määrää rakennusten suunnitteluvaiheessa ja edesautettua suunnitteluratkaisulta vaaditun riittävän varmuustason saavuttamista.

Suomessa valittiin ensimmäistä kertaa rakennusfysikaaliset testivuodet vuosina 2009–2012 toteutetussa FRAME-hankkeessa [7]. Kesällä 2022 päättyneessä Rakentamisen mitoitussäät (RAMI) -hankkeessa [8] määritettiin uudet rakennusfysikaaliset mitoitusvuodet, jotka korvaavat aiemmat FRAME-hankkeen aikaiset testivuodet. Näissä hankkeissa käsitellyt ilmastolliset aineistot tuotettiin ensiksi mainitun osalta Ilmatieteen laitoksen toimesta REFI-A- ja REFI-B -hankkeissa [9,10] ja jälkimmäisen osalta RASMI-hankkeessa [11]. Olosuhteiden mitoituksellisen luonteen korostamiseksi rakennusfysikaalisesti mitoitettavia vuosia on kutsuttu RAMI-hankkeessa mitoitusvuosiksi, FRAME-hankkeessa käytetyn testivuosi-nimityksen sijaan.

Tässä kirjoituksessa käsitellään ajasta riippuviin simulointeihin tarkoitettujen uusien rakennusfysikaalisten mitoitusvuosien valintamenettelyä ja käyttöä. Artikkelin perustuu Rakentamisen mitoitussäät (RAMI) -hankkeeseen, jonka yhteydessä toteutettiin myös

ensimmäistä kertaa Suomessa kesäajan huonelämpötilan ja jäähdytystehontarpeen mitoituspäivien valinta Aalto-yliopiston toimesta. Lisäksi hankkeessa tuotettiin ilmakehästä alaspäin suuntautuvan pitkäaaltoisen säteilyn tuntiarvot nykyiseen ja tulevaisuuden ilmastoon yhteistyössä Ilmatieteen laitoksen kanssa. Tampereen yliopiston (TAU) Korjausrakentamisen ja rakenteiden elinkaaritekniikan tutkimusryhmä valitsi mitoitusolosuhteet huokoisten kiviainespinnaisten julkisivujen tarkasteluihin. Hankkeen rakennusfysiikan osion toteutuksesta ja hankkeen koordinoinnista vastasi TAU Rakennusfysiikan tutkimusryhmä. Lisätietoja hankkeesta on saatavilla hankkeen loppuraportissa [8]. Kuukausitason laskelmiin tarkoitetuista mitoitusolosuhteista on laadittu erillinen artikkeli [12]. Rakentamisen mitoitusääät (RAMI) - hankkeen tulosaineistot ovat vapaasti saatavilla TAU Rakennusfysiikan internet-sivuilta [13].

2. Laskentatapausten muodostaminen

Mitoitusvuosien valinnan perusideana oli laskea läpi suuri määrä erilaisia rakenteita eri tilanteissa ja tämän jälkeen etsiä aineistosta mahdollisimman pieni määrä kokonaisia vuosia, jotka yksin tai yhdessä toimisivat mitoitusvuosina vastaaville uusille laskentatapauksille.

Mitoitusvuosien valinnassa ja käytössä laskentamallien ja -prosessien tulisi olla samankaltaiset, jotta mitoitusvuosien tavoiteltu mitoituksellinen taso pysyisi samana. Tätä varten mitoitusvuosien valinnan yhteydessä tehtyjen laskelmien toteutus pyrittiin vakioimaan nykyisin saatavilla olevan ohjeistuksen mukaiseksi, mutta kuitenkin täydentäen ohjeistusta tarvittaessa erikseen.

Rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan laskentamallien muodostamisen pohjaksi valittiin standardi SFS-EN 15026 [14] sekä tämän täydentämiseksi ja laskentaprosessin ohjeistukseksi RIL 107 ja RIL 250 -julkaisuissa esitetyt ohjeet [15,16]. Hankkeessa määritettyjä täydentäviä ohjeita on esitetty RAMI-hankkeen loppuraportin liitteessä B.6. Seuraavaan on poimittu keskeisimpiä ohjeita laskentamallien muodostamiseen liittyen:

- Laskentamallin geometria muodostetaan todellisen rakenteen mukaisilla nimellismitoilla ja laskentamallissa on mukana kaikki todellisessakin rakenteessa esiintyvät materiaalit ja kerrokset. Kolmiulotteinen geometria voidaan yksinkertaistaa kaksikulotteiseksi, mutta kaksikulotteista tapausta ei suositella yksinkertaistettavan yksiulotteiseksi.
- Laskennassa käytettävien materiaaliominaisuuksien tulisi vastata mahdollisimman hyvin tarkasteltavaa tapausta. Ensisijaisia arvoja ovat tuotekohtaiset tiedot, sitten suomalaisista rakennusmateriaaleista määritetyt materiaaliominaisuudet ja viimeisenä laskentaohjelmien materiaalikirjastoista ja yleisestä kirjallisuudesta valitut materiaaliominaisuudet. Jos laskentaohjelman materiaalikirjastossa on käytettävää tuotetta hyvin vastaava materiaali, voidaan tätä käyttää suoraan. Jos käytettävälle materiaalille ei löydy luotettavia materiaaliominaisuuksia tai nämä joudutaan kokoamaan useasta eri lähteestä, tulee tämä raportoida. Lisäksi on suositeltavaa toteuttaa laskelmien herkkyytstarkasteluja.
- Laskentamallin reunaehtojen tulee sisältää kaikki keskeiset ilmiöt ja tekijät, jotka vaikuttavat tarkasteltavaan rakenteeseen. Yleisellä tasolla rakennuksen ulko-olosuhteita kuvaavat suureet ovat: ilman lämpötila ja suhteellinen kosteus; sade vaakapinnalle sekä tuulen nopeus ja suunta; auringon suora ja diffuusi säteily sekä pitkäaaltoinen säteily pintaa kohti. Lämmönsiirto rakenteen sisäpinnan ja huonetilojen välillä voidaan käsitellä asettamalla ekvivalentti reunaehtolämpötila suoraan RIL 107 mukaisesti [15].
- Tulosten arviointia varten simuloinnin kesto on vähintään kaksi vuotta, alkaen kalenterivuoden alusta, ja jatkuen siihen asti, että samanlaisina vuodesta toiseen toistuvat olosuhteet ovat löytäneet. Simuloinnin valmistuttua rakenteeseen muodostuneiden olosuhteiden arviointi tehdään simuloinnin viimeiseltä vuodelta.

Hankkeen yhteydessä toteutettiin suuri määrä erilaisia vertailulaskelmia analysoitavan tulosaineiston muodostamiseksi. Yksi varioiduista muuttujista oli rakenteen ulkopuolinen rasiustaso, joka riippuu säädätiedostoissa olevan yleisen tilanteen (ns. lentokenttäolosuhteiden) lisäksi myös rakennuspaikan olosuhteista. Paikallisen ilmaston kuvaamiseksi käytetyt rakennustyyppit ja rakennuspaikan olosuhteet on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Laskentatapausten muodostamisessa käytetyt rakennukset ympäristöineen. Kertoimet viittaavat standardin SFS-EN ISO 15927-3 mukaiseen viistosateen laskentaan [17].

Rakennus	Korkeus	z, m	Ympäröivä maasto	Maasto-luokka	$C_{R, -}$	$C_{T, -}$	$O, -$	$W, -$
Pientalo	Matala (1 krs.)	3	Suojaisa	3	0,72	1,0	0,5	0,3
Pientalo	Korkea (2 krs.)	6	Avoin	1	1,09	1,0	1,0	0,5
Kerrostalo	Matala (3 krs.)	9	Suojaisa	3	0,75	1,0	0,5	0,3
Kerrostalo	Korkea (16 krs.)	48	Avoin	1	1,44	1,0	1,0	0,5

Simuloinneissa käytetyt rakenteet on esitetty RAMI-loppuraportin liitteessä B.1. Niin kutsuttuja päärakennetyyppejä olivat: puurankaseinä puuverhouksella, puurankaseinä tiiliverhouksella, hirsiseinä, betonisandwich-elementti, rapattu eristeharkkoseinä, eristerapattu betoniseinä, peltivilla-pelti -elementti ja kaksi erilaista yläpohjarakennetta. Neljä ensiksi mainittua rakennetta muodostivat selkeästi suurimman osan lasketuista tapauksista, koska näissä rakenteissa laskentaajat olivat maltillisia ja kyseisten rakenteiden osalta tulosten tulkinta oli selkeintä. Kaikkia ulkoseinä-rakenteita tarkasteltiin sekä etelän että pohjoisen suuntaisina. Lisäksi vertailutapauksia tehtiin auringonsäteilyn matalalla ja korkealla absorptiokertoimella. Tarkastelutapauksia oli yhteensä 393 kpl.

Ilmatieteen laitoksen tuottamissa RASMI-aineistoissa oli saatavilla ulko-olosuhteiden olosuhdemuuttujia neljältä paikkakunnalta (Sodankylä, Jyväskylä, Jokioinen ja Vantaa) ja neljältä eri 30-vuotisjaksolta (mennyt 1989–2018 -ilmasto, 2030-ilmasto, 2050-ilmasto ja 2080-ilmasto). Lisäksi tulevaisuuden ilmasto-olosuhteiden ennusteet olivat saatavissa kolmelle eri RCP-skenaariolle (RCP2.6, RCP4.5 ja RCP8.5). Näin ollen yksittäisiä vuosia oli yhteensä $4 \cdot 30 \cdot (1 + 3 \cdot 3) = 1200$ vuotta. Kukin tarkastelutapaus laskettiin läpi kaikilla 1200 vuodella. Laskenta tehtiin Tampereen tieteellisen laskennan keskuksen (TCSC) Narvi-laskentaklusterissa.

RAMI-hankkeessa täydennettiin RASMI-hankkeen aineistoja ilmakehästä alaspäin suuntautuvan pitkäaaltosäteilyn tuntiarvojen osalta. Menneen vertailukauden 1989–2018 osalta Ilmatieteen laitoksella oli käytettävissä mitattuja pitkäaaltosäteilyn arvoja, joita käytettiin Euroopan keskipitkien sääennusteiden keskuksen ECMWF:n tuottamien ERA5-uusanalyysiaineistojen soveltuvuuden arviointiin Ilmatieteen laitoksen tutkijoiden toimesta. ERA5-aineistojen todettiin vastaavan mittausarvoja hyvin, joten ERA5-aineistoja voitiin käyttää pitkäaaltosäteilyn tuntiarvoina vuosien 1989–2018 jaksolle. Tulevaisuuden ilmasto-olosuhteisiin pitkäaaltosäteilyn tuntiarvot määritettiin kouluttamalla eri koneoppimismalleja RASMI- ja ERA5-uusanalyysiaineistojen avulla ja tämän jälkeen käyttämällä parhaan ennustetarkkuuden mallia tulevaisuuden ilmasto-olosuhteisiin. Mitoitusvuosien valinnassa käytettiin aiemmin valitulla, kirjallisuudessa esitetyllä mallilla laskettuja tuntiarvoja, kun taas lopullisiin mitoitusvuosiin tuntiarvot päivitettiin ERA5- ja koneoppimismallitarkastelujen tuloksista.

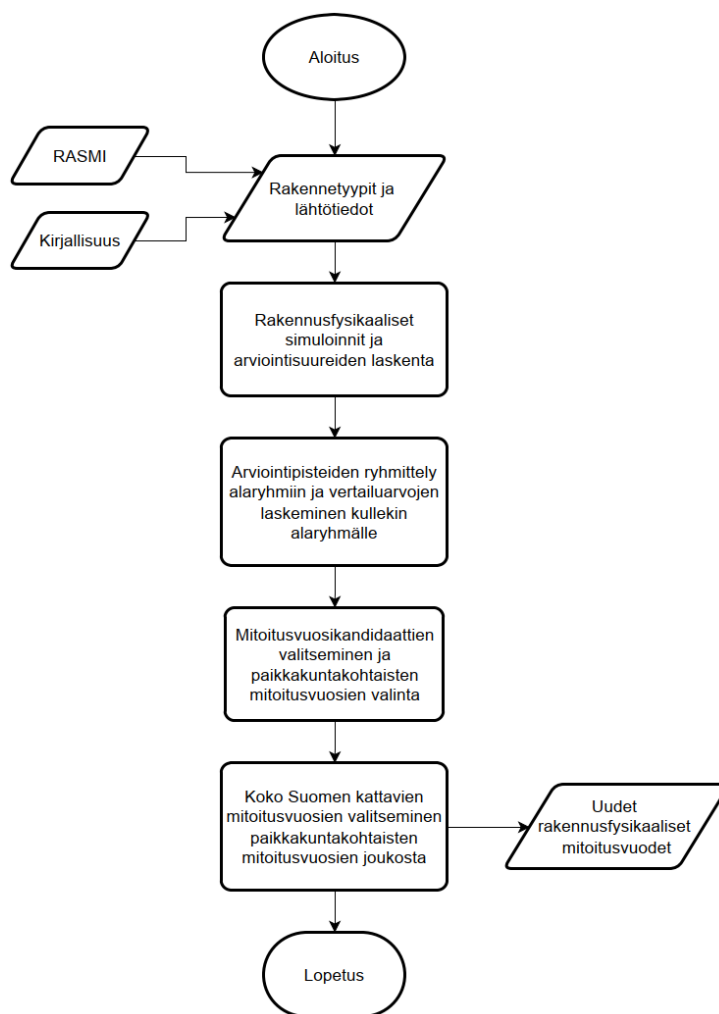
Vuosien rakenteisiin aiheuttaman rasiustason arviointia varten tuloksista laskettiin Suomalaisen homemallin mukainen homeindeksin maksimiarvo M_{max} kunkin rakenteen merkityksellisistä arviointipisteistä sekä tasapainokosteuskäyrän suhteellista kosteutta 95 % RH ylittävä kosteuden määrän maksimi Δm_{95} päälämmöneristekerroksen uloimmasta kerroksesta, tuulensuojakerroksen

sisäpinnasta ja päälämmöneristekerroksen sisäosasta höyrynsulkukerroksen ulkopuolelta. Aiemmissa tutkimuksissa homeindeksi on todettu usein kosteuden määrää tiukemmaksi vaatimukseksi, mutta jälkimmäistä seurattiin eri vuosien vaikutuksista tietoa antavana suurena sekä sellaisia tilanteita varten, jolloin homeindeksin maksimiarvo ei ole mitoittava suure.

3. Mitoitusvuosien valinta ja ohjeita niiden käyttöön

3.1 Tarkastelutapausten jako alaryhmiin ja mitoitusvuosien valinta

Simulointien jälkeen lasketut tapaukset jaettiin alaryhmiin, ja alaryhmien mukaisista tuloksista etsittiin pienintä mahdollista määrää sellaisia vuosia, jotka olisivat käyttökelpoisia mitoitusvuosia kaikille alaryhmille. Ajasta riippuviin simulointeihin tarkoitettujen mitoitusvuosien valintaprosessia on havainnollistettu kuvassa 1.



Kuva 1. Ajasta riippuvissa simuloinneissa käytettävien mitoitusvuosien valintaprosessi.

Mitoitusvuosien valinnan alussa kunkin arviointisuureen arvot (esim. M_{max}) koottiin omiin taulukoihinsa, joissa sarakkeina olivat kaikkien rakenteiden kaikki tarkastelupisteet ja riveinä RASMI-aineiston mukaiset vuodet (1200 kpl). Tulokset jaettiin ensin pääarakennetyypin ja ilmansuunnan mukaisiin alaryhmiin (pohjoisen suuntaiset puuverhotut puurankaseinät, jne.).

Tämän jälkeen alaryhmiin kuuluvat tarkastelupisteet jaettiin uudelleen pienempiin alaryhmiin scikit-learn -kirjaston

AgglomerativeClustering() ja KMeans() -ryhmittelyalgoritmien avulla. Tämän vaiheen tarkoituksena oli selvittää, oliko päärakennelilmansuunta-alaryhmissä vielä erillisiä alaryhmiä, joita voisi ja tulisi hyödyntää mitoitusvuosien valinnassa ja että kuinka hyvin eri mitoitusvuosien kriittisyysjärjestys korreloi eri alaryhmien tulosten kesken. Tulosten perusteella arvioitiin, että tulosaineistossa oli alaryhmiä esimerkiksi tarkastelupisteiden sijainnista

rakenteessa riippuen, mutta koneoppimisalgoritmit pystyivät tunnistamaan nämä ryhmät. Lisäksi ryhmien tulokset korreloivat keskenään hyvin tai melko hyvin. Tämä oli hyvä asia mitoitusvuosien valinnan kannalta, koska tällöin yksittäiset vuodet olivat samalla kertaa haastavimpien joukossa useissa eri tilanteissa.

Mitoitusvuosien valinnassa tavoitteena oli valita vuosi tai vuodet, jollaisten mukainen rasiustaso rakenteissa esiintyisi keskimäärin noin kerran kymmenessä vuodessa. Kyseinen tavoite on esitetty julkaisuissa [6,14] ja kyseinen toistuvuusaiakatavoite oli käytössä myös aiemmassa FRAME-hankkeessa [7]. Vuodet oletettiin olevan arvioitavissa toisistaan erillään, jolloin kymmenen vuoden toistuvuusaiaka tarkoittaa samalla $P = 1/10 = 10\%$ todennäköisyyttä sille, että kyseisen tasoinen vuosi esiintyisi tietynä vuotena. Yhdessä 30-vuotisjaksoissa mitoitettavia tai sitä kriittisempiä vuosia olisi keskimäärin $0,1 \cdot 30 \text{ kpl} = 3 \text{ kpl}$, eli 30 vuoden joukosta kolmanneksi kriittisin vuosi olisi ensisijainen ehdokas mitoitusvuodeksi. Tämän taustan takia tulokset jaettiin edelleen paikkakuntakohtaisiin alaryhmiin, koska paikkakuntien välillä huomattiin olevan olennaisia eroja. Jos kaikkia paikkakuntia olisi arvioitu yhdessä ryhmässä, olisivat mitoitusvuodet valittu 12. ($0,1 \cdot 120 = 12$) kriittisimmän vuoden ympäristöstä. Tällöin tietyissä tilanteissa olisi käynyt niin, että haastavimpien olosuhteiden mukaisella paikkakunnalla olisi päädytty noin $12 / 30 = 40\%$ esiintymistodennäköisyyteen, kun taas tavoitteena oli tiukempi mitoituskellinen taso eli 10% keskimääräinen esiintymistodennäköisyys.

Mitoitusvuosien valintaa olennaisesti helpottava havainto oli, että vuosien kriittisyysjärjestys pysyi melko hyvin samana eri 30-vuotisjaksojen kesken. Alaryhmiin jakamisen ja 30-vuotisjaksojen samankaltaisuuden ansiosta vuosien kriittisyysjärjestystä kuvaavat vertailuarvot laskettiin laskemalla ensin vuosikohtainen (300 kpl) mediaani kaikista kuhunkin alaryhmään kuuluvasta tapauksesta ja tämän jälkeen uudelleen mediaani viiden tärkeimmäksi arvioidun 30-vuotisjakson mediaaneista (mennyt ilmaston 1989–2018 sekä skenaariot RCP4.5 ja RCP8.5. Näillä toimenpiteillä kunkin päärakennetyypin, ilmansuunnan, koneoppimisalgoritmeilla muodostetun alaryhmän sekä paikkakunnan mukaiset tulokset saatiin käsiteltyä 30 vertailuarvon avulla.

Kun alaryhmäkohtaiset vuosien vertailulukujen tulokset olivat selvillä (30 kpl per alaryhmä), kustakin alaryhmästä valittiin viisi haastavinta vuotta paikkakuntakohtaisiksi mitoitusvuosikandidaateiksi. Rakenteiden ulko-osien M_{max} ja Δm_{95} -arvojen lisäksi mitoitusvuosikandidaatit valittiin myös rakenteiden sisäosien homeen kasvun, sekä huokoisten kiviaines pohjaisten julkisivumateriaalien pakkasrapautumisen ja betoniterästen korroosion tarkastelujen osalta. Kahden jälkimmäisen suureen osalta mitoitusvuosikandidaatit olivat 10 haastavinta vuotta kultakin paikkakunnalta ja nykyilmaston olosuhteista.

Mitoitusvuosikandidaattien listaamisen jälkeen näistä etsittiin manuaalisesti vuosia, jotka yksin tai yhdessä kattaisivat paikkakuntakohtaisesti eri mitoitustilanteet. Keskeisenä tavoitteena oli varmistaa mitoitusvuosien mitoitavuus eri tarkastelutapauksiin, mutta samalla pitää mitoitusvuosien lukumäärä mahdollisimman pienenä. Mitoitusvuosikandidaatteja vertailtaessa hyödynnettiin myös aiemmin määritettyjä alaryhmäkohtaisia arviointisuureiden vertailukuja ja näistä laskettuja järjestyslukuja.

3.2 Paikkakuntakohtaiset mitoitusvuodet ja koko Suomen kattavat homeen kasvun mitoitusvuodet

Tarkastelujen perusteella ei ollut löydettävissä yksittäistä vuotta, joka olisi voitu luotettavasti nimetä vaipparakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan mitoitusvuodeksi kaikille rakenteille ja mitoitustilanteille. Kaikki mitoitustilanteet saatiin kuitenkin katettua paikkakuntakohtaisesti käyttämällä kahta tai tietyssä tilanteessa kolmea vuotta. Paikkakuntakohtaisiksi mitoitusvuosiksi valittiin seuraavat vuodet, minkä lisäksi suluissa on paikkakunnan edustama ympäristöministeriön asetuksen 1010/2017 mukainen säävyöhyke [18]:

- Sodankylä (Säävyöhyke IV)
 - Homeen kasvu, kosteuden määrä ja betoniterästen korroosio: 2015
 - Homeen kasvu korkeiden (≥ 2 krs) tiiliverhottujen puurankaseinien sisäosissa, pakkasrasitus: 2014
- Jyväskylä (Säävyöhyke III)
 - Homeen kasvu, betoniterästen korroosio: 2011
 - Homeen kasvun riski korkeiden (≥ 2 krs.) tiiliverhottujen puurankaseinien sisäosissa, kosteuden määrä, pakkasrasitus: 1996
- Jokioinen (Säävyöhyke II)
 - Homeen kasvu (kaikki tarkastelut), pakkasrasitus, betoniterästen korroosio: 2011
 - Kosteuden määrä: 2017
- Vantaa (Säävyöhyke I)
 - Homeen kasvu rakenteen ulko-osissa, betoniterästen korroosio: 2017
 - Kosteuden määrä, pakkasrasitus: 2004
 - Homeen kasvu rakenteiden sisäosissa: Jokioinen 2011

Edellä olevaan listaukseen liittyvä erikoisuus on Jokioinen 2011 -vuoden käyttäminen Vantaan olosuhteille mitoitusvuotena. Tässä on syynä, että Vantaan paikkakunta-kohtaisten mitoitusvuosiehdokkaiden joukossa ei ollut vuosia, jotka olisivat olleet mitoittavia korkeiden tiiliverhottujen puurankaseinien sisäosien homeenkasvun lisäksi myös muille tarkastelutapauksille. Näin ollen tämän tilanteen kattaminen olisi edellyttänyt yksittäisen mitoitusvuoden valitsemista vain tälle tarkasti rajatulle tapaukselle, mikä olisi ollut vuosien yleiskriittisyystavoitteen vastaista.

Toinen huomionarvoinen seikka mitoitusvuosien valinnassa on, että yllä olevassa listauksessa ei ole eritelty tarkastelutapauksia pohjois- ja eteläsuunnan mukaan. Tämä oli mahdollista, koska aineistosta löytyi tiettyjä vuosia, jotka olivat mitoitusvuosikandidaatteja samalla kertaa molempiin ilmansuuntiin. Tämä selkiyttää mitoitusvuosien käyttöä myös silloin, kun tarkastelu suunta poikkeaa selkeästi pohjois- tai eteläsuunnasta.

Edellä oleva listaus mahdollistaa mitoitusvuosien valinnan, mutta mitoitusvuosien käytön selkeyden kannalta järjestelmää olisi hyvä edelleen yksinkertaistaa. Asettamalla homeen kasvun mitoitusaste haastavimman paikkakunta-kohtaisen mitoitusvuoden mukaan, voidaan mitoitusvuodet nimetä seuraavasti:

- Homeen kasvu vaipparakenteissa
 - Tehdään laskelmat aina käyttäen vähintään mitoitusvuotta Jokioinen 2011
 - Jos kyseessä on betonisandwich-ulkoseinä tai sisäpuolelta lisälämmöneristetty hirsiseinä, tehdään tarkastelut myös mitoitusvuoden Jokioinen 2017 avulla
 - Jos kyseessä on tiiliverhottu puurankaseinä (≥ 2 krs.), tehdään homeen kasvun tarkastelut myös mitoitusvuoden Vantaa 2017 avulla
- Kosteuden määrän rajoittaminen (kun homeen kasvu ei ole mitoittava kriteeri)
 - Paikkakunta-kohtaisten mitoitusvuosien mukaan
- Julkisivujen pakkasrasitus ja betoniterästen korroosio
 - Nykyilmastolle paikkakunta-kohtaisten mitoitusvuosien mukaan
 - Tulevaisuuden ilmastolle RAMI-loppuraportin mukaan.

Mitoitustarkastelujen tarkoituksena on, että rakenne on toimiva koko suunnitellun teknisen käyttöajan ajan. Tällöin, jos ilmastonmuutoksen ennakoidaan heikentävän rakenteen rakennusfysikaalista toimivuutta, käytetään laskelmissa käyttöajan loppuajankohdan mukaisia

kriittisimpiä ilmasto-olosuhteita. Esimerkiksi, jos tarkastellaan kantavien rakenteiden tai näihin välittömästi liittyvien materiaalien homeriskistä 50 vuoden suunnitellulla teknisellä käyttöiällä, tulee rakenteen olla toimiva mitoitusvuoden ”Jokioinen 2011 RCP8.5-2080” -olosuhteissa. Jos lämpötilojen nousun myötä nykyilmasto on tietyille tapauksissa mitoittava, käytetään tällöin nykyilmaston 1989–2018 mitoitusvuosia. Epäselvissä tapauksissa tehdään herkkyystarkasteluja eri tilanteiden välillä. Laskentatuloksia raportoitaessa käytetty vuosi tulee nimetä.

Uusien mitoitusvuosien mitoituksellisesta tasosta on esitettyjä vertailuja RAMI-hankkeen loppuraportin liitteissä. Mitoituksellisen tason muuttumisessa oli eroja eri rakennetyyppien kesken ja osa muutoksista riippui tarkasteluissa käytettävien 30-vuotisjakson muuttumisesta, osa ilmastonmuutosennusteiden päivittymisestä ja osa mitoitusvuosien valintajärjestelmien muuttumisesta. Yleisesti ottaen mitoituksellinen taso joko pysyi samana aiempiin FRAME-hankkeessa valittuihin vuosiin nähden tai kiristyi hieman.

4. Yhteenveto

Rakenteiden rakennusfysikaaliset laskentatarkastelut mahdollistavat uusien rakenneratkaisujen ja materiaalien toimivuuden arvioimisen ennen käyttöönottoa, ja toisaalta tuttujen rakenteiden tarkastelemisen uusissa ilmasto-olosuhteissa. Rakennuksiin valittavien ratkaisujen tulee olla asetetut vaatimukset täyttäviä koko suunnitellun käyttöajan ajan, minkä seurauksena rakenteiden toimivuutta tulisi arvioida kaikissa käyttöajan aikana esiintyvissä olosuhteissa tai käyttää mitoittavia vuosia, jotka kattavat suurella todennäköisyydellä kaikki käyttöajan aikana esiintyvät olosuhteet.

Rakentamisen mitoitusväylät (RAMI) -hankkeessa valittiin uudet ulko-olosuhteiden mitoitusvuodet, jotka korvaavat aiemmat FRAME-hankkeessa valitut rakennusfysikaaliset mitoitusvuodet. Lisäksi hankkeessa määritettiin ensimmäistä kertaa Suomessa huoneilman kesäaikaisen lämpötilan ja jäähdytystehontarpeen mitoituspäivät.

Uusien mitoitusvuosien valintaa varten pyrittiin ensin yksilöimään laskentamallien toteutustapa, jonka jälkeen toteutettiin runsaasti erilaisia herkkyystarkasteluja kustakin tarkastellusta päärakennetyypistä. Nyt valitut vuodet olivat mitoittavia useille eri rakenteille ja tarkastelutapauksille, josta syystä uusien vuosien arvioidaan soveltuvan useisiin eri mitoitusvuosiin, käytettäessä aiemmin kuvattuja tavanomaisia laskentamenetelmiä. Jos käytetyt laskentamenetelmät poikkeavat aiemmin esitetyistä esimerkiksi ilma- tai sadevuotojen tai kemiallisten reaktioiden huomioon ottamisen osalta, voidaan harkintaa käyttäen uusia mitoitusvuosia käyttää myös näihin tarkasteluihin. Tällöin on kuitenkin suositeltavaa tehdä vertailulaskelmia ensin perustason mallilla ja tämän jälkeen kehittyneemmällä mallilla, jonka jälkeen arvioida tuloksista uusien toiminnallisuuksien huomioon ottamisen vaikutuksia tavoiteltavaan mitoitukselliseen tasoon.

Uusien mitoitusvuosien käytön kannalta on tärkeää muistaa, että laskentatarkastelut ovat vasta yksi mahdollinen osa rakenteiden suunnittelua. Vaikka laskentatarkastelujen avulla saadaankin tuotettua teknisiä lukuarvoja päätöksenteon tueksi, tarvitaan lisäksi myös laadullista kokonaisratkaisun arviointia. Hyvässä suunnitteluratkaisussa saadaan sovitettua kattavasti yhteen eri tavoitteita laadukkaan lopputuloksen saavuttamiseksi.

Lähdeluettelo

- [1] WUFI, WUFI Software family. Fraunhofer Institut für Bauphysik. [Verkossa]. <https://wufi.de/en/>
- [2] Delphin, Bauklimatik Dresden Software GmbH. [Verkossa]. <https://bauklimatik-dresden.de/index.php?aLa=en>
- [3] COMSOL Multiphysics, COMSOL AB. [Verkossa]. <https://www.comsol.com/>
- [4] WMO (2017) WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals. World Meteorological Organization, WMO-No. 1203, 2017. https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=20130#.Xznu2ChKg2x
- [5] SFS-EN ISO 15927-4:2005. Hygrothermal performance of buildings. Calculation and presentation of climatic data. Part 4: Hourly data for assessing the annual energy use for heating and cooling. SFS ry.
- [6] Sanders, C (1996) Heat, Air and Moisture Transfer in Insulated Envelope Parts. Final Report. Volume 2. Task 2: Environmental conditions. KU Leuven, Belgium, IEA Annex 24 (HAMTIE).
- [7] Vinha, J., ym. (2013) Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, Tutkimusraportti 159, 2013. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-2949-8>
- [8] Laukkarinen, A., ym. (2022) Vaipparakenteiden rakennusfysikaalisen toimivuuden ja huonetilojen kesäaikaisen jäähdytystehontarpeen mitoitusolosuhteet: RAMI-hankkeen loppuraportti. Tampereen yliopisto, Tampere, Tutkimusraportti 3, 2022. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-03-2438-4>
- [9] Jylhä, K., ym. (2011) Rakennusten energialaskennan testivuosi 2012 ja arviot ilmastonmuutoksen vaikutuksista. REFI-A -hankkeen loppuraportti. Ilmatieteen laitos, Raportteja 2011:6, 2011. <http://hdl.handle.net/10138/33069>
- [10] Ruosteenoja K, Jylhä K, Mäkelä H, Hyvönen R, Pirinen P, & Lehtonen I (2013) Rakennusfysiikan testivuosien sääaineistot havaitussa ja arvioidussa ilmastossa: REFI-B -hankkeen tuloksia. Ilmatieteen laitos, Raportteja 2013:1 <http://hdl.handle.net/10138/38648>
- [11] Jylhä, K., ym. (2020) Nykyisen ja tulevan ilmaston säätietoja rakennusfysikaalisia laskelmia ja energialaskennan testivuotta 2020 varten. Ilmatieteen laitos, Raportteja 2020:6. <http://hdl.handle.net/10138/321164>
- [12] Laukkarinen A, Jokela T & Vinha J (2023) Rakentamisen mitoitusääät (RAMI) -hankkeessa määritetyt uudet rakennusfysikaaliset mitoitusolosuhteet. Julkaisussa *Sisäilmastoseminaari 2023, SIY Raportti 41*, Helsinki: Sisäilmayhdistys ry, 2023, s. 6 s.
- [13] TAU Rakennusfysiikka, ”Rakennusfysikaaliset mitoitusvuodet (2022)”. [Verkossa] <https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/kosteusanalysointimenetelma/rakennusfysikaaliset-mitoitusvuodet-2022/>
- [14] SFS-EN 15026:2007. Hygrothermal performance of building components and building elements. Assessment of moisture transfer by numerical simulation. SFS ry.
- [15] RIL 107-2022 Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet. ril ry, 2022.
- [16] RIL 250-2020 Kosteudenhallinta ja homevaurioiden estäminen. ril ry, 2020.
- [17] SFS-EN ISO 15927-3:2009. Hygrothermal performance of buildings. Calculation and presentation of climatic data. Part 3: Calculation of driving rain index for vertical surfaces from hourly wind and rain data. SFS ry.
- [18] Ympäristöministeriö (2017) Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. YM 1010/2017. Ympäristöministeriö. <https://ym.fi/rakentamismaaraykset>

Optimoitujen aurinkosuojakaihtimien hyödyntäminen rakennusten yllämpenemisen hallinnassa

Simo Kilpeläinen¹, Risto Kosonen^{1,2} ja Juha Jokisalo¹

¹ Aalto-yliopisto, Konetekniikan laitos

² Nanjing Tech University, Department of HVAC, Nanjing, Kiina

Tiivistelmä

Ilmastonmuutoksen myötä lisääntyneet helleaallot aiheuttavat rakennusten yllämpenemistä myös pohjoisissa oloissa. Vaikka ulkoilman lämpötila on yleensä maltillisella tasolla, aurinko lämmittää heikosti aurinkosuojattuja rakennuksia tehokkaasti nostaten helleaallojen aikana sisälämpötiloja pahimmassa tapauksessa yli asumisterveysasetuksen toimenpiderajojen, mikäli kunnollista jäädytystä ei ole.

Kiinteät, veteen tai ilmaan perustuvat aktiiviset jäädytysratkaisut ovat tehokkaita, mutta niitä ei aina pystytä hyödyntämään. Passiivisia ratkaisuja yllämpenemisen torjuntaan on myös olemassa ja tässä tutkimuksessa keskityttiin niistä optimoituihin aurinkosuojakaihtimiin. Kaihtimet on muotoiltu siten, että ne pyrkivät kesäisin heijastamaan ylimääräisen auringon lämpösäteilyn pois.

Kaihtimia tutkittiin kahdessa toimistuhuoneessa Aalto-yliopistolla. Toisessa huoneessa oli perinteiset sälekaihtimet ja toisessa optimoidut, ja molempia pidettiin mittausten aikana auki. Tulokset osoittavat, että optimoidut kaihtimet pystyivät heijastamaan auringon UVA-säteilyä jopa puolet pois ja niillä varustettu toimisto pysyi noin asteen viileämpänä kuin perinteisillä kaihtimilla varustettu verrokki.

1. Johdanto

Ilmastonmuutoksen aikaansaamat paikalliset helleaallot ovat yleistyneet viime vuosina, ja ne johtavat rakennuskannan yllämpenemiseen [1,2]. Tämä on huolestuttavaa erityisesti siksi, että ihmiset viettävät WHO:n mukaan jopa 90 % ajastaan sisätiloissa [3]. Liian kuumissa oloissa oleskelu on merkittävä terveysriski erityisesti iäkkäille tai muuten huonokuntoisille ihmisille, ja viimeisimpien pitkien helleaallojen on arvioitu kunkin aiheuttaneen Suomessa 200–400 ihmisen ennenaikaisen kuoleman [4].

Tulevaisuudessa tilanne tulee Suomessa pahenemaan entisestään, vaikka ilmastonmuutosta yritetäänkin globaalisti hillitä [5]. Täällä rakennukset on suunniteltu pitkiä talvia ajatellen, eikä koneellista jäädytystä erityisesti asuinrakennuksissa yleensä ole [6–8]. Ilman jäädytystä riskinä on asumisterveysasetuksen mukaisen toimenpiderajan (32 °C) ylittyminen asunnoissa yleisesti kesien lämmitessä. Esimerkiksi vuodelle 2050 ennustetun säämallin mukaan raja voi hellekesinä ylittyä vanhoissa asuinkerrostaloissa jopa 3000 astetunnilla [9]. Koneellisen jäädytyksen asentaminen jälkikäteen saattaa kuitenkin olla hankalaa ja jäädytyslaitteiden käyttö vaatii aina energiaa, jonka hinta tulevaisuudessa on kysymysmerkki. Niinpä tarvetta on myös passiivisille ratkaisuille, joiden avulla asuntojen yllämpenemistä voitaisiin hillitä.

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin optisesti optimoituja aurinkosuojakaihtimia, jotka korvaavat perinteiset sälekaihtimet. Kaihtimet on muotoiltu siten, että ne pystyvät kesällä heijastamaan osan auringon lämpösäteilyä pois myös auki ollessaan. Kaihtimien tehokkuutta tutkittiin mittaamalla

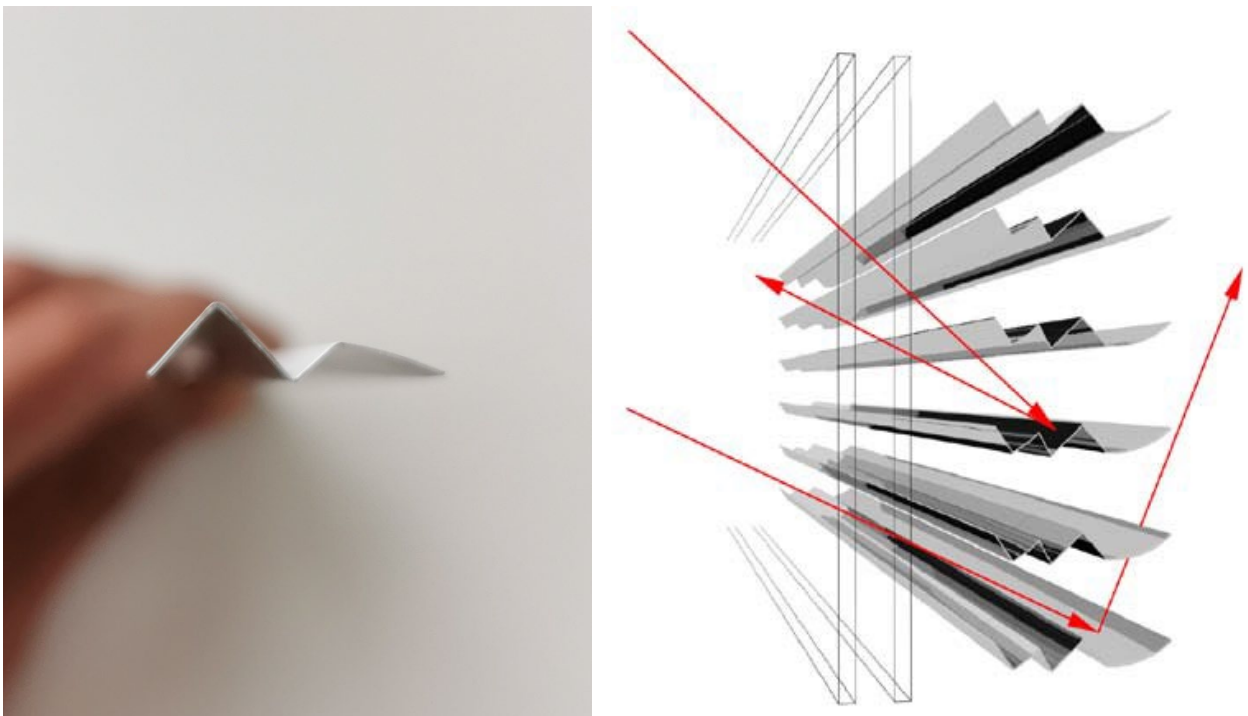
valaistusvoimakkuutta, auringon UVA-säteilyn voimakkuutta sekä sisälämpötilaa kahdessa toimistohuoneessa, joista toisessa oli optimoidut ja toisessa perinteiset kaihtimet.

2. Menetelmät

Tutkimuksessa tarkasteltiin optimoitujen auringonsuojakaihtimien kykyä heijastaa pois ylimääräistä auringon lämpösäteilyä ja täten rajoittaa sisätilojen ylikämmenemistä. Tutkimus toteutettiin Aalto-yliopiston Konetekniikan laitoksella kahdessa toimistotilassa, joista yhden ikkunoissa oli perinteiset sälekaihtimet ja toisessa optimoidut. Ikkunat olivat lounaaseen päin. Perinteisillä kaihtimilla varustettu toimisto oli kooltaan 6,0 x 3,0 m ja optimoiduilla varustettu 3,5 x 3,0 m. Toimistoissa oli koneellinen ilmanvaihto. Tuloilmavirta oli 7,0 l/s/m² ja tuloilman lämpötila 20 °C. Toimistot olivat mittausten ajan tyhjillään.

2.1 Optisesti optimoidut aurinkosuojakaihtimet

Kuvassa 1 on esitetty optimoitujen kaihdinten leikkausprofiili ja havainnollistettu niiden toimintaa. Kaihtimet on muotoiltu siten, että ne pystyvät kesäisin heijastamaan auringon lämpösäteilyä takaisin ulos ja talvisin puolestaan keräämään rajallisesta valosta mahdollisimman paljon sisätiloja valaisemaan. Kaihdinten asentoa pystyy muuttamaan samoin kuin perinteistenkin, mutta optisien ominaisuuksien ansiosta niitä ei tarvitse koskaan kääntää kiinni jäähdytysvaikutuksen aikaansaamiseksi. Täten optimoituja kaihtimia käytettäessä ikkunasta näkee aina ulos. Tässä tutkimuksissa sekä optimoidut että perinteiset kaihtimet pidettiin täysin auki eli vaakatasossa.



Kuva 1. Optimoidun kaihtimen leikkausprofiili (vas.) ja toimintaperiaate (oik. [1])

2.2 Mittauslaitteisto

Kaihdinten toimivuutta ylikämmen torjumiseen arvioitiin mittaamalla tarkastelluista toimistoista valaistustehokkuutta, UVA-säteilyn voimakkuutta sekä sisäilman lämpötilaa. Valaistusmittaukset tehtiin DeltaOHM 2102 -loggereilla, joihin oli liitetty saman valmistajan LP471 P-A-

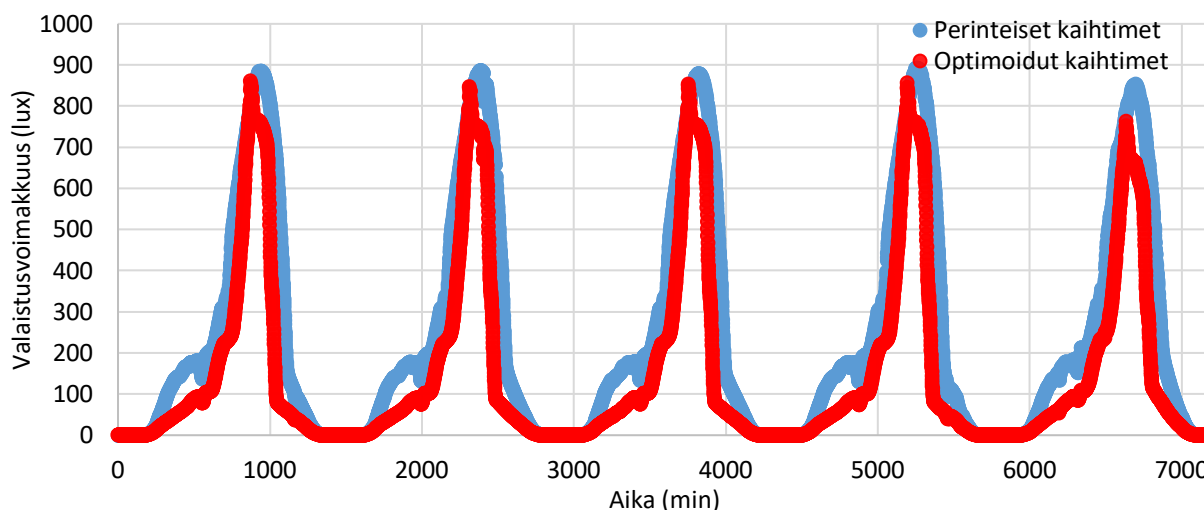
valaistusanturit. Anturit oli sijoitettu yhden metrin korkeuteen kolmen metrin etäisyydelle ikkunasta ja ne kohdistettiin suoraan ikkunaa kohti. Sisälämpötilojen mittaukseen käytettiin Tinytag Plus 2 TGP-4500-loggereita, jotka olivat toimistoissa niin ikään yhden metrin korkeudella varjoisessa paikassa. Anturien tekniset tiedot on esitetty taulukossa 1. Mittauksia tehtiin viiden vuorokauden ajan 9.6.-14.6.2023 minuutin aikaväleihin.

Taulukko 1. Mittauksissa käytetyt anturit ja niiden tekniset tiedot.

Anturi	Mitattava suure	Mittaustarkkuus
DeltaOHM LP471 P-A	Valaistusvoimakkuus (lux)	+/- 5 %, kosinivaste < 3 %
DeltaOHM LP471 P-A	UVA-säteilyn voimakkuus (W/m ²)	+/- 5 %, kosinivaste < 6 %
Tinytag Plus 2 TGP-4500	Sisälämpötila (°C)	+/- 0,2 °C

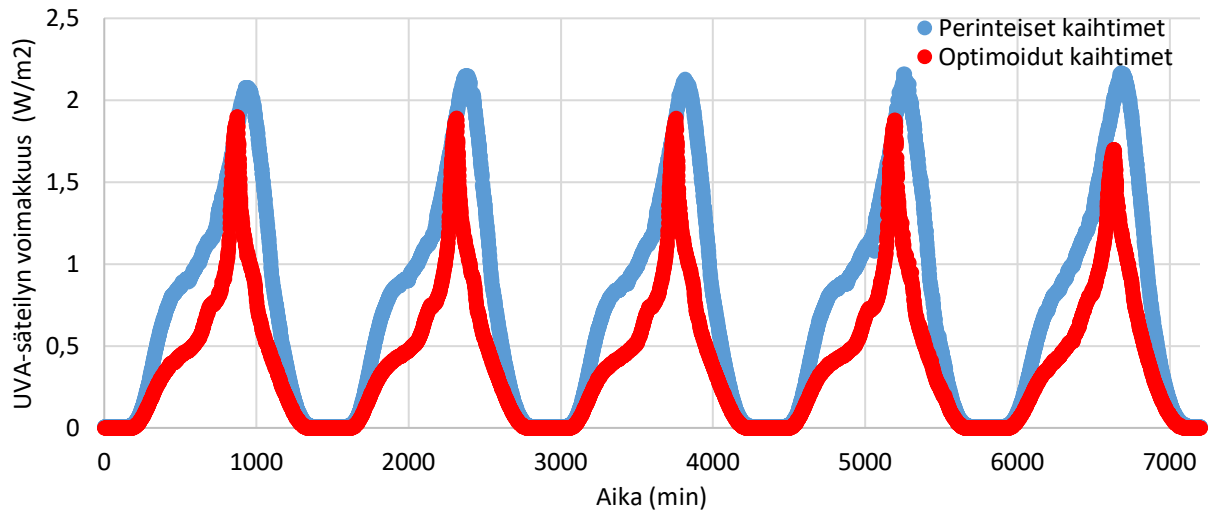
3. Tulokset

Kuvassa 2 on esitetty valaistusvoimakkuudet ajan funktiona perinteisillä ja optimoiduilla kaihtimilla. Kuvaajista nähdään, että valaistusvoimakkuus on perinteisillä kaihtimilla varustetussa toimistossa valtaosan päivästä n. 40 % korkeampi kuin optimoiduilla kaihtimilla varustetussa kaihdinten ollessa vaakatasossa. Alkuiltpäivällä auringon paistaessa suoraan kohti ikkunoita optimoiduilla kaihtimilla varustettu toimisto oli yhtä valoisa kuin verrokki. Kello 15 aikaan viereinen rakennus alkoi varjostaa optimoiduilla kaihtimilla varustettua toimistoa, mikä aiheutti äkillisen pudotuksen valaistusvoimakkuudessa. Ilman tätä varjostusta valaistusvoimakkuuden huippuarvo olisi ollut optimoiduilla kaihtimilla korkeampi kuin perinteisillä. Koska valaistusvoimakkuus riippuu myös muista tekijöistä kuin ikkunan läpi tulevasta valosta (tilan geometria, pintojen heijastukset ym.), mittauksien tulokset eivät suoraan kerro kaihtimien välisistä eroista.



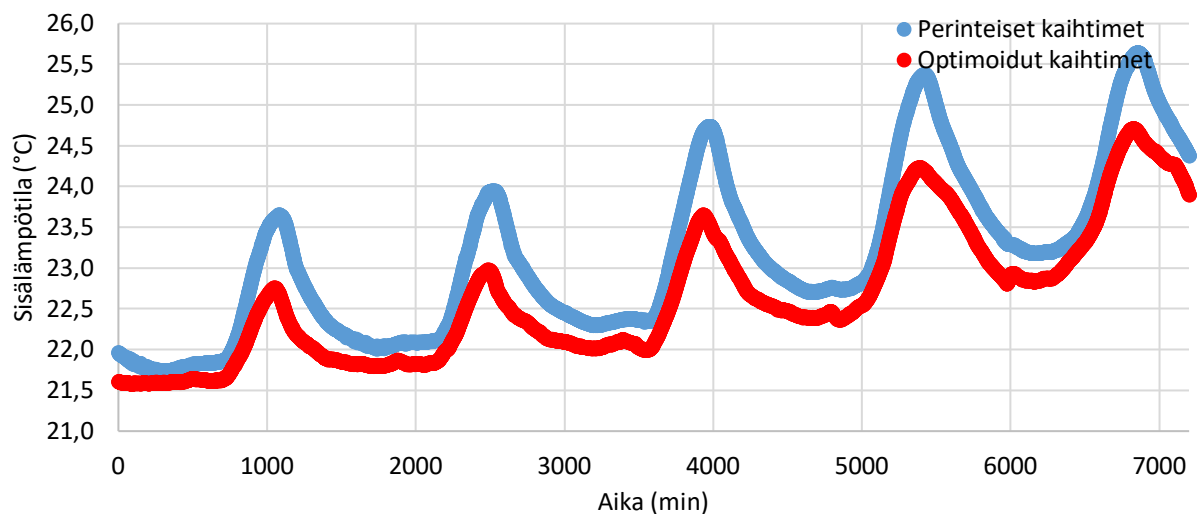
Kuva 2. Valaistusvoimakkuus ajan funktiona tutkituissa toimistotiloissa.

Kuvasta 3 nähdään auringon UVA-lämpösäteilyn voimakkuudet pinta-alayksikköä kohti toimistoissa ajan funktiona. Kuvaajat ovat muodoiltaan samankaltaiset kuin valaistusvoimakkuuksien, mutta erot kaihdintyyppien välillä ovat suuremmat. Aamupäivällä ja myöhäisiltapäivällä perinteisillä kaihtimilla varustettuun toimistoon pääsi lähes kaksinkertainen määrä lämmittävää UVA-säteilyä kuin optimoiduilla kaihtimilla varustettuun. Alkuiltpäivällä säteilyn määrä oli suunnilleen sama, kunnes varjostus tiputti sitä optimoiduilla kaihtimilla varustetussa toimistossa. UVA-säteily voi näkyvän valon tavoin heijastua erilaisilta pinnoilta, mutta se kuvaa auringon lämpövaikutusta ja on nimenomaan auringosta peräisin, joten se on yllä lämpenemistä tarkasteltaessa parempi mittari kuin valaistusvoimakkuus.



Kuva 3. UVA-säteilyn voimakkuus ajan funktiona tutkituissa toimistotiloissa.

Kuvassa 4 ovat tutkittujen toimistojen sisälämpötilat mittausjakson ajalta. Optimoiduilla kaihtimilla varustettu toimisto pysyi vuorokauden ympäri viileämpänä kuin verrokki. Öisin ero oli muutaman asteen kymmenyksen, ja alkoi kasvaa päivän edetessä. Alkuiltapäivällä ero oli huipussaan asteen verran. Osa tästä selittyy aiemmin mainitulla varjostuksella, mutta alkuiltapäivällä ennen varjostuksen alkamista ero oli jo reilusti yli 0,5 °C. Lämpötilan mittaustulokset tukevat UVA-säteilyä saatuja tuloksia eli optimoiduilla kaihtimilla pystytään kesäaikaan ehkäisemään tilan lämpenemistä verrattuna perinteisiin.



Kuva 4. Sisälämpötila ajan funktiona tutkituissa toimistotiloissa.

Tuloksista voidaan päätellä, että optisesti optimoiduilla kaihtimilla pystytään pohjoisissa oloissa ehkäisemään sisätilojen ylikämmenemistä. Erot perinteisiin kaihtimiin eivät olleet valtavan suuria, mutta kuitenkin merkittäviä. Tässä yhteydessä on myös hyvä muistaa, että kaihtimien asentoa ei mitenkään optimoitu auringon kulun suhteen, vaan ne olivat vaakatasossa. Tutkittujen kaihtimien profiili oli erityisesti suunniteltu minimoimaan matalalla olevan auringon lämpövaikutusta, joten ne saattavat toimia vielä paremmin keväällä ja syksyllä kuin lähellä keskikesää.

4. Yhteenveto

Ilmastomuutoksen myötä yleistyneet helleaallot aiheuttavat rakennusten ylikuumenemista myös pohjoisissa oloissa, sillä vaikka ulkoilman lämpötilat eivät kovin suuriksi kohoa, auringon säteily yhdistettynä mahdollisesti heikkoon aurinkosuojaukseen nostaa etenkin isoilla etelän ja lännen suuntaan olevilla ikkunoilla varustetuissa rakennuksissa sisälämpötiloja merkittävästi. Koska jäähdytyskausi on varsin lyhyt, ylikuumenemistä kannattaa ensisijaisesti torjua passiivisilla jäähdytysratkaisuilla, jotka ovat helppoja asentaa eivätkä kuluta energiaa.

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin optisesti optimoitujen aurinkosuojakaihainten tehokkuutta ylikuumenemisen ehkäisemisessä. Kaihtimet oli asennettu toimistotilaan Aalto-yliopistolla Espoossa ja verrokkikohteena toimi viereinen toimisto, jossa oli perinteiset sälekaihtimet. Kaihdinten toimintaa tutkittiin mittaamalla tiloista valaistusvoimakkuutta, UVA-säteilyn voimakkuutta sekä sisälämpötiloja. Mittauksia tehtiin viiden vuorokauden ajan kesäkuun 2023 alkupuolella.

Tulokset osoittavat, että optimoiduilla kaihtimilla pystytään vähentämään ikkunan läpi tulevan auringon UVA-säteilyn määrää ja tämän myötä laskemaan sisälämpötilaa. UVA-säteilyn voimakkuus oli optimoiduilla kaihtimilla varustetussa toimistossa lähes puolta pienempi ja tila pysyi keskimäärin reilut puoli astetta viileämpänä kuin verrokkitoimisto. Parhaimmillaan lämpötilaero oli yli asteen, mutta osa siitä selittyy toimistojen hiukan erilaisilla varjostusolosuhteilla. Kaihdinten suuntausta ei tässä tutkimuksessa mitenkään optimoitu auringon paikan suhteen, vaan molemmissa toimistoissa ne pidettiin vaakatasossa.

Kiitokset

Tätä tutkimusta on rahoitettu Euroopan Unionin Horisontti 2020-tutkimus- ja innovaatio-ohjelmasta hankenumera 894511. Tekijät haluavat kiittää kaikkia SUREFIT-projektin yhteistyökumppaneita ja erityisesti Köster Lichtplanungia, joka toimitti käyttöömmme optimoidut aurinkosuojakaihtimet.

Lähdeluettelo

- [1] Santamouris, M. 2020. Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. Synergies with the global climate change. *Energy and Buildings* 207(2020), 109482.
- [2] Hamdy, M., Carlucci, S., Hoes, P.J. ja Hensen, J.L.M. 2017. The impact of climate change on the overheating risk in dwellings – A Dutch case study. *Building and environment* 122(2017), 307-323.
- [3] World Health Organization, Regional Office for Europe. 2014. Combined or multiple exposure to health stressors in indoor built environments: an evidence-based review prepared for the WHO training workshop “Multiple environmental exposures and risks”.
- [4] Ruuhela, R., Votsis, A., Kukkonen, J., Jylhä, K., Kankaanpää, S., ja Perrels, A. 2021. Temperature-Related Mortality in Helsinki Compared to Its Surrounding Region Over Two Decades, with Special Emphasis on Intensive Heatwaves. *Atmosphere*. 12 (2021) 46. <https://doi.org/10.3390/atmos12010046>.
- [5] Ruosteenoja, K., Jylhä, K., ja Kämäräinen, M. 2016. Climate projections for Finland under the RCP forcing scenarios. *Geophysica* 51(1), 17-50.
- [6] European Union. 2010. Energy performance of buildings directive, <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/31> (katsottu 14.8.2023).

- [7] Ympäristöministeriö. 1999–2023. Suomen rakentamismääräykset. <https://ym.fi/rakentamismaaraykset> (katsottu 14.8.2023).
- [8] Ympäristöministeriö. 2017. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171009> (katsottu 14.8.2023).
- [9] Velashjerdi Farahani, A., Jokisalo, J., Korhonen, N., Jylhä, K., Ruosteenoja, K., ja Kosonen, R. 2021. Overheating Risk and Energy Demand of Nordic Old and New Apartment Buildings during Average and Extreme Weather Conditions under a Changing Climate, *Applied Sciences*. 11 (2021) 3972. <https://doi.org/10.3390/app11093972>.

Urban tree potential to reduce summertime overheating

Jonathon Taylor¹ and Tianxing Zhang²

¹ Tampere university, Civil Engineering, Urban Physics

² Tokyo Institute for Technology

Abstract

Due to the increasing frequency and severity of heatwave events, there is a growing recognition of the need to adapt urban areas to mitigate the harmful effects of heat. Increasing tree coverage is widely discussed as a way to reduce urban temperatures and can also provide shading which can limit solar gains and reduce indoor temperatures, but may result in increased space heating energy consumption. This paper describes the generation of new weather files for building simulation for areas of London with differing levels of tree coverage. Personal Weather Station data is downloaded for 612 Netatmo stations from across London from 2015–2022 and spatially linked to tree canopy coverage. A Random Forest model is then developed to predict the difference between the temperatures in different decile tree canopy coverage and the official meteorological station at Heathrow Airport. The model is then used to adjust existing standardised building simulation weather files that represent typical or hot years in London.

1. Introduction

Climate change is leading to an increased frequency and severity of extreme temperature events worldwide. In London, temperatures reached a record 40 °C during the heatwaves of 2022, a phenomena estimated to have been made 160 times more likely due to climate change [1]. In cities, temperatures may be exacerbated further by the Urban Heat Island (UHI) effect, where urban temperatures are higher than those of the surrounding rural areas due to replacing natural surfaces with human-made materials with different thermal and surface radiative properties, a lack of evapotranspiration from vegetation and water, and anthropogenic sources of heat. In London, the UHI intensity has been estimated to be around 1.4–2.9 °C [2,3], with cooler temperatures in less built-up and more vegetated areas. This heat exposure poses risks to health. For example, the aforementioned 2022 heatwaves have been estimated to have led to more than 2,985 excess deaths in England and 387 in London [4].

Due to the growing risks from heat, there has been an increasing research focus on how to mitigate exposures. Increasing vegetation is widely discussed as a means of decreasing urban near-surface temperatures, as vegetation can help cool the air through evapotranspiration. Trees have been a particular focus of research in terms of their ability to reduce outdoor temperatures through shading and transpiration [5]. Trees may also help to reduce indoor temperatures by shading buildings and reducing solar gains. As a result, and their impact on summertime cooling has been studied in various locations around the world [e.g. 6,7]. However, this shading may also have a winter heating penalty, as the reduced solar exposure leads to higher energy consumption during heating seasons.

To-date, there has been little research into the impacts of trees on indoor thermal comfort in the UK, and none that account for the impact on both outdoor and indoor temperatures from increased tree coverage. Therefore, this study aims to examine how urban trees impact upon indoor overheating in typical London dwellings and what energy penalties may exist. We describe the development of new weather files for London that represent areas with differing

levels of tree canopy coverage in London, UK for different current and future weather scenarios. These weather files then will be used to simulate indoor temperatures using EnergyPlus [8], with models accounting for external shading from trees. Results will be assessed to understand changes to indoor overheating risk and space heating energy consumption.

2. Methods

2.1 Temperature and Tree Canopy Data

Personal weather stations (PWS) have become increasingly common in recent years, and there are opportunities to use this crowd-sourced urban meteorological data in urban climate studies [e.g. 9–11]. While the meteorological measurements taken by PWS are less accurate than those from official measurement stations, they offer the benefit of increased coverage of stations in many urban areas, as well as examining how climate varies with urban form and land cover. This study takes advantage of temperature data from 612 PWS across London (Figure 1) to examine how urban temperatures vary with tree canopy coverage.

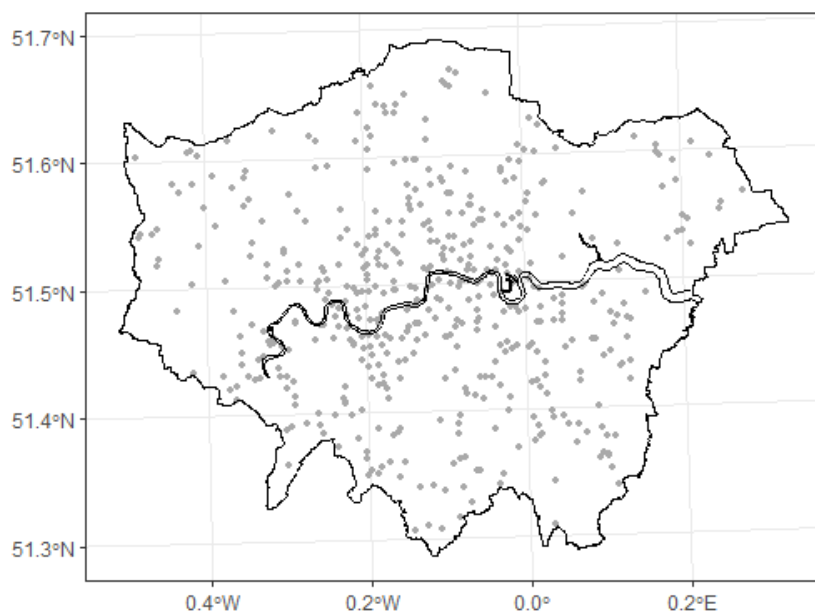


Figure 1. Netatmo stations across London with the number of days of valid temperature data, 2015–2022.

Netatmo PWS information, including station ID and coordinates, for all stations within the Greater London Authority (GLA) boundary was acquired using the Netatmo API. Hourly air temperatures for the study period were then downloaded for each station from September 2015–December 2022. This period includes temperatures in London during the heatwave events of the summer 2022, where temperatures reached a record 40 °C, meaning that the ranges within this period should be capable of covering those of future climates.

PWS suffer from greater uncertainty than official measurement stations, making data cleaning essential. Cleaning and analysis of PWS data was performed using the CrowdQC+ R package [12]. First, measurements were removed if they shared the same coordinates as another station, meaning they were duplicates. Second, the z-score was calculated for each station for each hour of data, and outliers removed. If more than 20 % of PWS hourly data during a month was an outlier, the station was removed due to poor reliability. Finally, if measurements are uncorrelated

to the median temperature of other measurements, then they were removed, as this indicates that the PWS stations are located indoors. A correction to the temperatures for their heights was applied using a 10 m Digital Elevation Model (DEM) of London [13]. Hourly air temperature data from the CWS stations were joined to the corresponding hourly official met station temperatures from Heathrow Airport, obtained from the Met Office Integrated Data Archive System (MIDAS) land surface station data [14].

Data with the percent of tree canopy coverage was obtained for the Greater London Authority (GLA) (Figure 2) [15]. The tree canopy dataset has been derived from high resolution (10 cm per pixel) infrared imagery and machine learning used to classify each pixel as to whether it is tree canopy or not [16]. Tree canopy coverage is available aggregated at different spatial units; in this case, we use 350 m hexagons that we re-classify into deciles. Tree canopy coverage decile was then spatially joined to each PWS station. For each PWS station, the anomaly – or difference between the PWS hourly temperature and corresponding official temperature measurement at Heathrow Airport - was calculated.

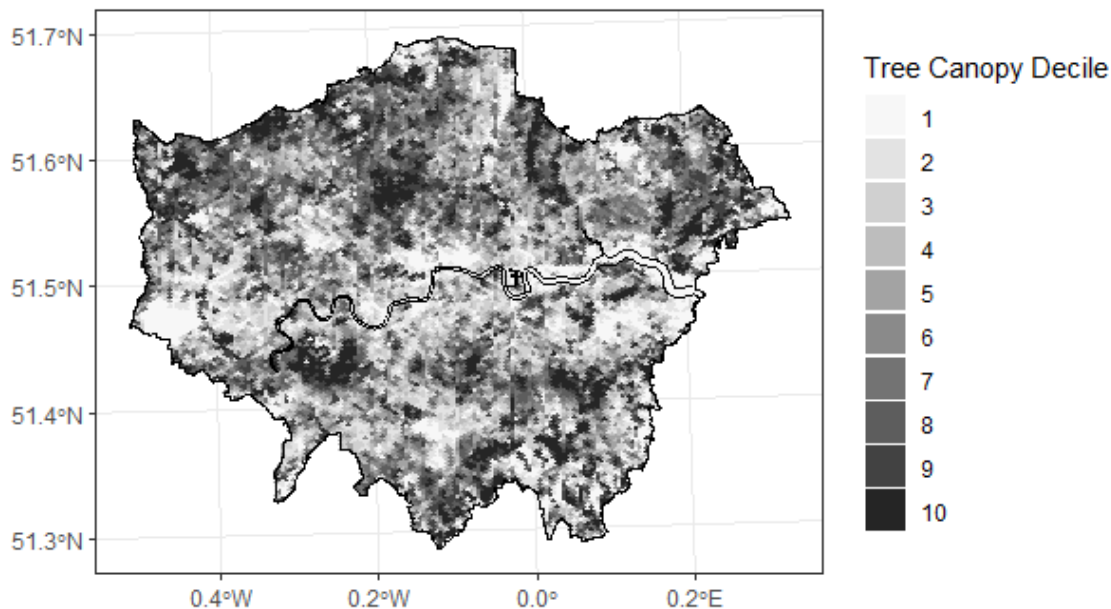


Figure 2. Tree canopy coverage across London.

2.2 Weather file development

As a basis for the new weather files, we adapted existing standardised building simulation weather files for Heathrow Airport from the Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE). Weather files include a Test Reference Year (TRY) file (representing a typical year over a 30-year baseline period), a DSY1 weather file (representing a moderately warm summer), a DSY2 (a summer with a brief intense hot spell), and a DSY3 (a summer with a long but less intense warm spell).

Hourly temperatures in the weather files were adjusted using a model that predicts temperature anomaly given the timeseries data, temperature at Heathrow Airport, and tree canopy coverage decile. To do this, we developed a Random Forest (RF) regression model using the R package *randomForest*. Hyperparameters included tree canopy coverage decile, Heathrow temperature, and dummy variables for month and time of day to account for seasonal and daily variations. The model was tuned to find the optimal number of trees and mtry using the *tune* function of

randomForest, and the best model selected using the Root Mean Square Error (RMSE) of the Out-of-the-Bag validation. The model was then applied to the different Heathrow weather files to adjust the dry bulb temperatures by the predicted anomaly for areas with the most (10th decile) or least (1st decile) amount of tree canopy coverage. We made a corresponding change to the relative humidity to account for the temperature changes.

3. Results

Differences in temperatures could be observed between the tree coverage deciles with the differences depending on the temperature at Heathrow Airport. Figure 3 shows a quantile regression of the temperatures, illustrating how daily average temperatures vary. The temperature differences appear to be greatest at lower temperatures, while they narrow as temperatures increase. During the 2022 heatwaves, for example, areas with the top 10 % tree canopy coverage were 1.2 °C cooler than those with the bottom 10 % tree canopy coverage. Differences were largest at night, when minimum temperatures were 2.0 °C cooler in the areas with the greatest tree canopy coverage. The model was fit with an R² of 64 %, showing a reasonable agreement with the measured data.

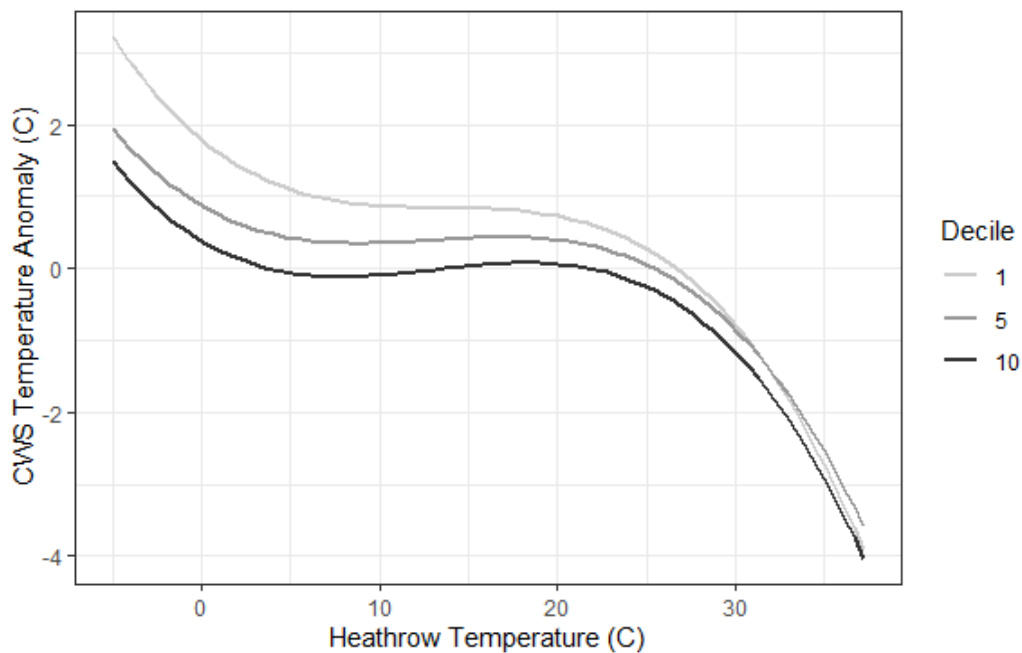


Figure 3. Quantile regression of average temperature anomaly according to Heathrow temperature for the different tree canopy coverage deciles.

3.1 Future work

Development of the building simulation models is currently ongoing. Dynamic thermal building simulation will be carried out using EnergyPlus 9.4. Representative housing archetypes for London have been taken from Taylor et al.[17], and include detached, semi-detached and terraced homes, as they occur in the in London and are at ground level, so most likely to benefit from shading from trees.

We will model two age bands of each built form, with representative wall types, loft insulation and extent of double glazing. The U-values of each building fabric element are defined by the Government's Standard Assessment Procedure for Energy Rating of Dwellings [18] and the air

permeability estimated as $20 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$ at 50 Pa as per the age of the buildings [19]. The profiles for occupancy and equipment are based on the CIBSE TM59 Design Methodology for the Assessment of Overheating Risk in Homes [20] which provide detailed guidelines for standardised modelling of home overheating. Air Conditioning is not modelled because it is rare in the English housing stock.

Sycamore (*Acer Pseudoplatanus*), a deciduous tree species, is the most planted leafy tree in Greater London [21]. Deciduous trees are selected they lose their leaves during winter, minimising shading when solar gains are needed the most. Trees will be modelled to the east, south, west and north of dwellings with solar reflectivity and transmittances adjusted for summer and winter to account for seasonal variations, interpolating using a Gaussian model between a summer minimum transmittance (0.2) and winter maximum (0.8).

Simulations for both energy penalties and summertime overheating will be conducted. Energy consumption will be calculated using the TRY weather data, outputting space heating energy consumption. Thermal comfort models will be carried out using the DSY weather files, estimating adaptive thermal comfort, Indoor Overheating Degree (IOD), and an equivalent Outdoor Overheating Degree (OOD). Having the two comparable metrics for indoor and outdoor temperatures will enable the additional shading benefit of trees on housing to be separated from the effect on outdoor temperatures.

4. Summary

The results of this study will help understand the potential summertime cooling benefits and winter cooling disbenefits of increased tree coverage in London. While there are likely to be energy penalties for increasing tree canopy coverage, there is also a pressing need to improve the energy efficiency of the UK building stock, and energy efficient retrofits can help offset potential increases in energy use, whilst also reducing cooling demands in air-conditioned buildings. The differences in temperatures found according to tree canopy coverage illustrate the importance of having weather files that can account for local climate conditions in building simulation models.

References

- [1] Christidis N, Stott PA, McCarthy M. *An attribution study of the UK mean temperature in year 2022*. London: UK Met Office, <https://www.metoffice.gov.uk/binaries/content/assets/metofficegovuk/pdf/research/climate-science/attribution/uk-2022-attribution.pdf> (January 2023).
- [2] Bassett R, Janes-Bassett V, Phillipson J, et al. Climate driven trends in London's urban heat island intensity reconstructed over 70 years using a generalized additive model. *Urban Climate* 2021; 40: 100990.
- [3] Brousse O, Simpson C, Walker N, et al. Evidence of horizontal urban heat advection in London using six years of data from a citizen weather station network. *Environ Res Lett* 2022; 17: 044041.
- [4] Heat mortality monitoring report: 2022. *GOV.UK*, <https://www.gov.uk/government/publications/heat-mortality-monitoring-reports/heat-mortality-monitoring-report-2022> (accessed 26 July 2023).
- [5] Jay O, Capon A, Berry P, et al. Reducing the health effects of hot weather and heat extremes: from personal cooling strategies to green cities. *The Lancet* 2021; 398: 709–724.

- [6] Skelhorn CP, Levermore G, Lindley SJ. Impacts on cooling energy consumption due to the UHI and vegetation changes in Manchester, UK. *Energy and Buildings* 2016; 122: 150–159.
- [7] Ko Y, Lee J-H, McPherson EG, et al. Long-term monitoring of Sacramento Shade program trees: Tree survival, growth and energy-saving performance. *Landscape and Urban Planning* 2015; 143: 183–191.
- [8] EnergyPlus. *EnergyPlus Engineering Documentation*. Berkeley, CA: US Department of Energy, April 2013.
- [9] Steeneveld GJ, Koopmans S, Heusinkveld B, et al. Quantifying urban heat island effects and human comfort for cities of variable size and urban morphology in the Netherlands. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*; 116, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2011JD015988> (2011, accessed 25 April 2023).
- [10] Wolters D, Brandsma T. Estimating the Urban Heat Island in Residential Areas in the Netherlands Using Observations by Weather Amateurs. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 2012; 51: 711–721.
- [11] Meier F, Fenner D, Grassmann T, et al. Crowdsourcing air temperature from citizen weather stations for urban climate research. *Urban Climate* 2017; 19: 170–191.
- [12] Fenner D, Bechtel B, Demuzere M, et al. CrowdQC+—A Quality-Control for Crowdsourced Air-Temperature Observations Enabling World-Wide Urban Climate Applications. *Frontiers in Environmental Science*; 9, <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2021.720747> (2021, accessed 25 April 2023).
- [13] LIDAR Composite DTM 2019 - 10m, <https://environment.data.gov.uk/portalstg/home/item.html?id=be680dca782e4e6da467552d78676bd8> (accessed 25 April 2023).
- [14] UK Met Office. Met Office MIDAS Open: UK Land Surface Stations Data 2005-2014.
- [15] GLA. Curio Canopy - London Tree Canopy Cover - London Datastore. *Curio Canopy - London Tree Canopy Cover - London Datastore*, <https://data.london.gov.uk/dataset/curio-canopy> (2020, accessed 25 April 2023).
- [16] Breadboard Labs. *Measurement & spatial analysis of London's tree canopy cover: 2018 methodology report*. London, UK: Breadboard Labs, <https://data.london.gov.uk/dataset/curio-canopy> (accessed 25 April 2023).
- [17] Taylor J, Davies M, Mavrogianni A, et al. Mapping indoor overheating and air pollution risk modification across Great Britain: A modelling study. *Building and Environment* 2016; 99: 1–12.
- [18] BRE. *The Government's Standard Assessment Procedure for Energy Rating of Dwellings*. Watford, UK: Building Research Establishment, 2009.
- [19] Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE). *CIBSE Guide A: Environmental Design*. London: Chartered Institution of Building Services Engineers, 2015.
- [20] CIBSE. *TM59: Design methodology for the assessment of overheating risk in homes*. London, UK: Chartered Institute of Building Service Engineers, 2017.
- [21] Rogers K, Sacre K, Goodenough J, et al. Valuing London's urban forest: results of the London i-Tree Eco Project: Treeconomics London.

Machine learning to apply buildings physics at urban scales

Jonathon Taylor¹ and Phil Symonds²

¹ Tampere university, Civil engineering, Urban Physics

² University College London, London, UK

Abstract

Building simulation tools are widely used to understand the energy and indoor environmental performance of buildings. Machine learning models, trained on a reduced set of inputs and outputs from such tools, enable the rapid calculation of building performance for large numbers of buildings, making it possible to estimate the performance across building stocks. This paper describes the development of a building physics metamodel, or a model of a model, using machine learning to calculate the space heating energy consumption and indoor environmental conditions for the English residential housing stock. To develop the model, building physics simulations of large numbers of dwellings were performed using EnergyPlus, and a Neural Network model developed from the outputs and a reduced set of EnergyPlus inputs. The resultant metamodel is able to rapidly estimate performance across housing stocks from the neighbourhood to national-scales and has been used to assess the energy and health implications of different housing retrofit and climate adaptation scenarios.

1. Introduction

Indoor environments are critical areas for exposure to environmental hazards due to the fact that people spend, on average, 90% of their time indoors - the majority of which is spent in their own homes [1]. These environmental hazards, such as air pollution from indoor or outdoor sources and uncomfortable or extreme temperatures, can have an important impact on the health of the occupants. The environmental burden of disease from poor quality housing, for example from low indoor temperatures, indoor air pollution, noise, and unsafe conditions is significant in Europe [2], which indicates the importance of housing as a determinant of population health.

The modifying role of housing on environmental exposures is set against a context of changes to the housing stock and environment. In Europe, buildings account for 40% of all energy consumption and 36% of greenhouse gas (GHG) emissions [3] driven primarily by space heating and cooling requirements, and there is a need to improve the energy efficiency of buildings through improved building regulations for new builds and retrofit of existing buildings. While these changes to the stock can help to mitigate climate change, the inevitable changes to the climate [4] mean that buildings also need to be adapted to future environmental conditions.

Building physics models can help to understand the energy and indoor environmental performance of buildings, identify problematic buildings, understand how exposures will change in the future, and test different adaptations to improve energy efficiency and adapt to future climates. Extending this from individual building modelling to the stock-level allows energy and adaptation policy measures to be evaluated for housing and populations at urban scales or larger.

This paper describes the development of a building physics metamodel [5] that can rapidly predict housing energy and indoor environmental performance for the UK housing stock. We then describe how it is used to evaluate space heating energy consumption, indoor air pollution from various sources, overheating, and moisture damage risk stock under various future climate and

adaptation scenarios.

2. Methods

2.1 Input Data

Various databases provide information on housing in the UK. These include the English Housing Survey (EHS) [6], which regularly collects anonymised information about housing and their occupants for a representative sample of households across England, and Energy Performance Certificates (EPCs) which are collected whenever homes are sold or rented if there is not one already available from the past 10 years. From the EHS, we are able to generate representative building archetypes with typical floorplans for different dwelling typologies. We are also able to create distributions of housing geometry, construction and energy efficiency characteristics for the housing stock (Figure 1) based on the physical survey component of the EHS.

2.2 Building Physics Modelling

The openly available information on buildings can then be used to develop building physics models. Here, we use EnergyPlus [7], a dynamic building simulation tool capable of modelling energy, indoor temperatures, simplified moisture levels and generic air pollutants.

An in-house python-based tool called EPG3 was used to generate a large number of EnergyPlus input definition files (idf) using user-defined variables. EPG3 uses Latin Hypercube Experimental design to randomly select data from the available housing typologies and distributions (e.g. Figure 1), selecting different distributions for combinations of categorical variables. In cases where the distribution is unknown, a normal distribution with a large standard deviation or a uniform distribution or is chosen. Variable ranges are large to be able to account for potential future housing and retrofit scenarios are represented. Combinations of categorical variables include eight building archetypes, two wall types, four occupancy scenarios, three climate regions, and two epochs (current and 2050s). Two occupancy scenarios were modelled assuming typical behaviours [8]: a family of four who are away during the day, and two pensioners that are home during the day. Both occupancy scenarios are modelled as per normal expected behaviour, as well as heat mitigation behaviours such as using external shutters.

A total of 230,400 EnergyPlus idf files were generated for the combinations of categorical and randomly selected input variables. These were run on a high-performance computer cluster with 7500 CPU cores. Outputs included from the EnergyPlus simulations include:

- Space heating energy consumption
- Indoor operative temperature for each room
- Outdoor temperature
- Concentration of outdoor pollution indoors
- Concentration of indoor sourced pollution
- Material surface relative humidity and temperature.

These outputs were aggregated to summary metrics such as annual energy consumption, infiltration factor, indoor air pollution concentrations, outdoor-temperature dependent indoor temperatures, and mould severity index (MSI).

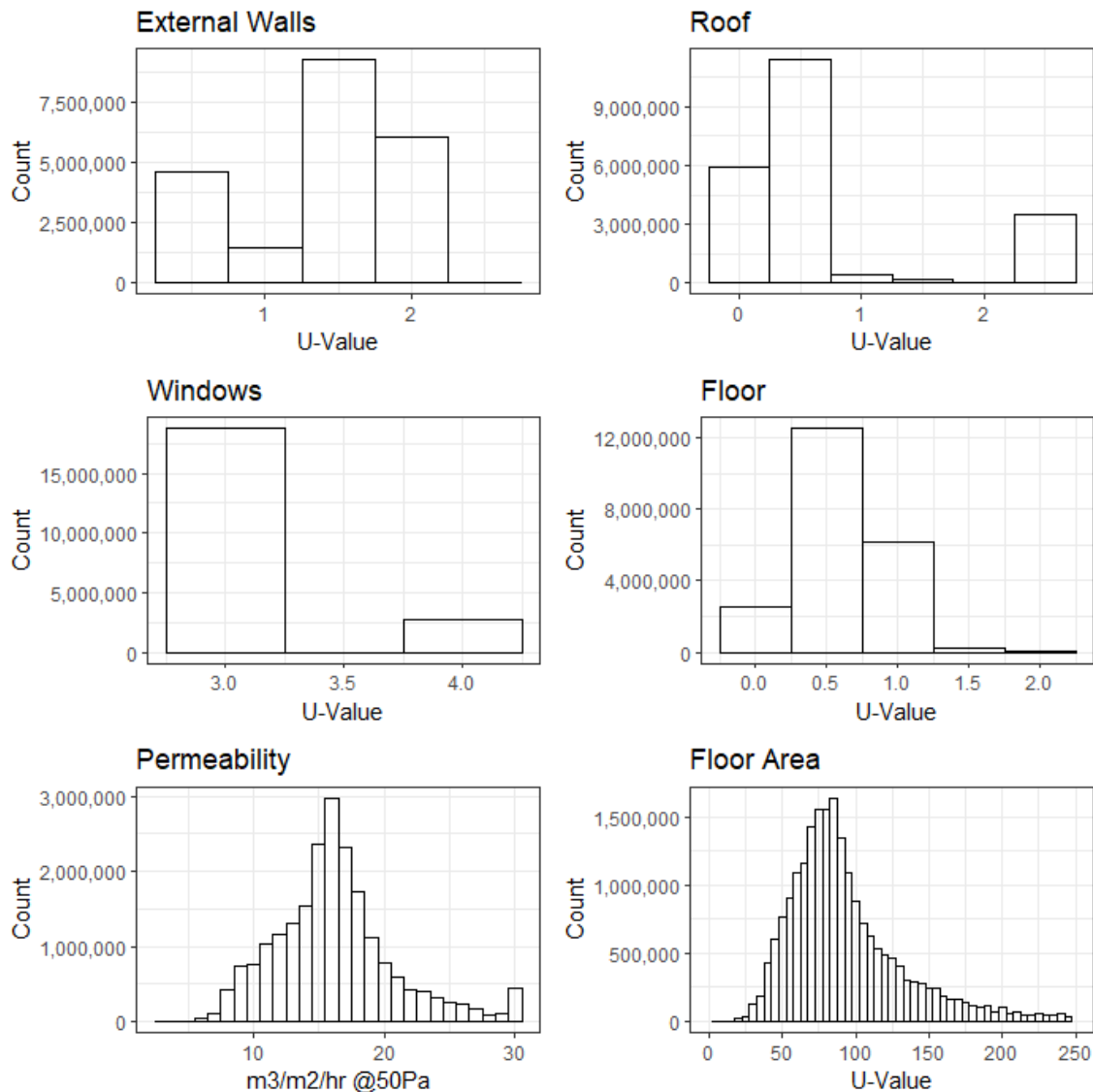


Figure 1. Distributions of selected building characteristics across England, from the EHS.

2.3 Machine Learning

From these outputs, various machine learning methods were applied to relate the randomly sampled set of input parameters to the building physics-modelled output metrics, with the objective of developing a so-called ‘metamodel’, or a model of a model that uses a reduced set of input parameters. Individual models were developed for the 384 combinations of categorical variants. EnergyPlus output metrics were divided into a training (80%) dataset, and results compared against a testing (20%) dataset. All of the continuous input and output variables were normalized to a mean of zero and standard deviation of one before training, ensuring that algorithms are not biased towards different input variables and allowing the performance output metrics to be compared.

Two types of machine learning methods were tested on the EnergyPlus data using sklearn: feed-forward Neural Networks (NNs) and Radial Basis Functions (RBF) models. NNs were developed with either one or two hidden layers, and each layer having 4-20 neurons. Backwards propagation training was used to minimise errors on the input variables, and training performed until the training error has converged. The performance of the different models was evaluated using Root

Mean Square Error (RMSE), the coefficient of determination (R^2), and the Maximal Absolute Error (MAE), which was used to select the best-performing model for each combination of categorical variables. Given that the model performed reasonably well $R^2 \sim 0.9$, no further validation was performed due to limits on data and CPU resources.

3. Results

An example of the fit between the EnergyPlus outputs and the metamodel predictions for Indoor/Outdoor ratio of air pollution and indoor temperature shown in Figure 2. The NN models outperformed RBF models, with a RMSE, R^2 and MAE around 15% better than RBF models and could be trained 90% faster. As a result, models were developed using NN models, with the optimal architecture selected for each combination of categorical variables.

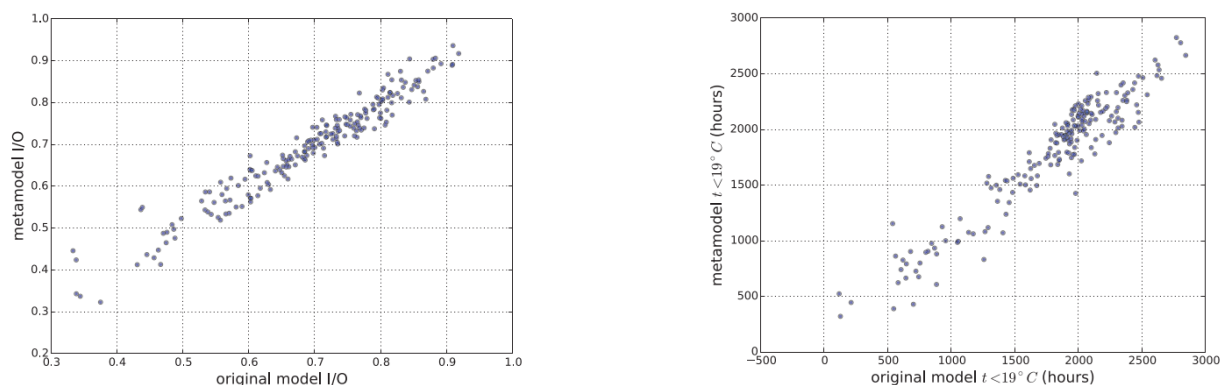


Figure 2. Comparison between the Neural Network metamodel predictions for Indoor/Outdoor ratio of PM_{2.5} air pollution (left) and indoor temperature when outdoor temperatures are above 19 °C (right).

3.1 Applications

The model allows a more rapid calculation of building performance across a large number of buildings, for example cities. While an individual EnergyPlus model takes between 5-30 minutes to simulate on a typical laptop, depending on the model complexity, the metamodel is able to calculate around 30,000 buildings in 5 minutes and a national housing stock in around 5 hours.

The resultant metamodel can then be applied across large sets of housing stock data. This has included the EHS, where information exposure information can be combined with occupants data to estimate the health impact of indoor environmental conditions using age-specific exposure-response functions [10]. Changes to the housing stock, such as energy efficient retrofit or heat adaptation measures, can be tested to evaluate how they may change indoor environments, energy performance, and health at a stock and population-level. The model can also be applied to EPCs, which are openly available in UK at the address-level, but without occupant data. The spatial application of the model allows for calculations to account for variations in the outdoor environment, such as the Urban Heat Island or outdoor air pollution levels [11].

An illustration of the application of the model to predict heat risk spatially is shown in Figure 3, where the model has been used to map dwelling overheating across London for around 1.6 million dwellings with EPC information. The model has been used to estimate the indoor temperatures during a hot summer period, and the anomaly (or difference in indoor temperature of a dwelling and the average temperature across the entire stock) has been calculated. Further

work can apply incorporate UHI temperatures into this modelling to identify the areas at increased risk of elevated indoor temperatures in London due to both UHI and housing effects.

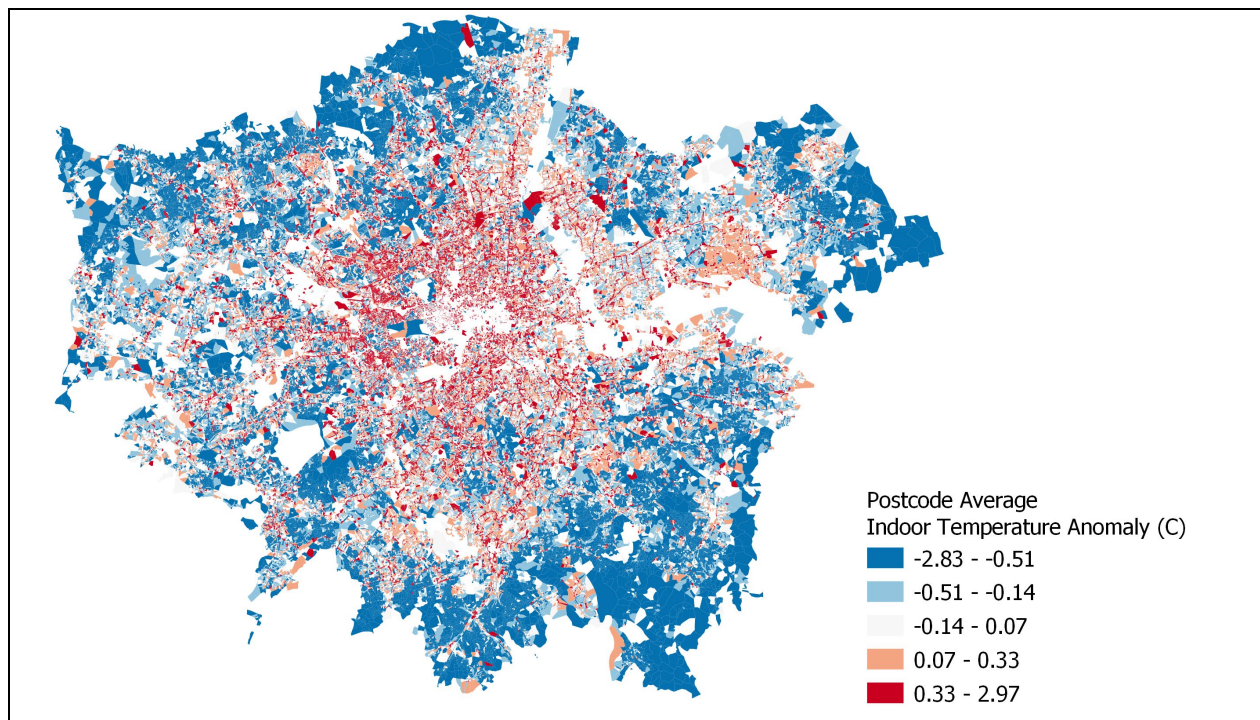


Figure 3. Application of the model across all Energy Performance Certificates (EPCs) across London ($n=1.6$ million) to show heat risk in homes on days when outdoor temperatures exceed 25 C. The indoor temperature anomaly refers to the difference between a dwellings daily average temperature and the average temperature across the entire stock.

4. Summary

The machine learning approach uses a large number of building simulation outputs to develop a metamodel, with the purpose of rapidly estimating building performance buildings at the stock-level. The tool can enable the rapid testing of different retrofit interventions and climate adaptation measures on energy and indoor environment, as well as the identification areas with large numbers of houses that may be at increased risk of poor indoor environments.

Metamodel results for the various combinations of categorical variables indicate that a high level of accuracy is achieved. In the future, the model will be undergoing continued development. This includes validation and calibration against measured indoor temperature and air pollution data [12], while the metamodel framework allows for optimization and sensitivity analyses to be conducted.

The approach has a number of limitations. We have yet to model alternative ventilation systems, such as Mechanical Heat and Ventilation Recovery, as the vast majority of UK homes are naturally ventilated only. Occupant behaviours can play a significant role in the indoor environmental conditions and energy use. While we model different occupancy scenarios, the model does not capture the wide range of possible behaviours by occupants. This is a particular limitation in the model when applied spatially, as any estimates of the energy consumption and indoor environmental conditions of an individual dwelling will be subject to significant uncertainty. Currently, building geometry can be varied by floor area and ceiling height, but the floorplans are held static for each dwelling variant. Finally, energy calculations do not account for the ‘take-back’ factor and assume that changes to the building fabric lead to changes in energy

consumption.

Despite these limitations, the ability to rapidly calculate indoor exposure risks and energy use for the housing stock means the model can support urban planners, policy makers and public health experts evaluate the role of the housing stock on population exposure to heat, cold, air pollution, and moisture risks inside dwellings across England.

References

- [1] Schweizer C, Edwards RD, Bayer-Oglesby L, et al. Indoor time-microenvironment-activity patterns in seven regions of Europe. *Journal of exposure science & environmental epidemiology* 2007; 17: 170–81.
- [2] Braubach, M., Jacobs, D.E., Ormandy, D. Environmental burden of disease associated with inadequate housing. Bonn, Germany: WHO European Centre for Environment and Health, 2011.
- [3] European Commission. Energy performance of buildings directive, https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en (2019, accessed 15 November 2021).
- [4] IPCC Sixth Assessment Report (AR6): Climate Change 2022 - Impacts, Adaptation and Vulnerability: Regional Factsheet Europe | Policy Commons, https://policycommons.net/artifacts/2264317/ipcc_ar6_wgii_factsheet_europe/3023371/ (accessed 30 May 2022).
- [5] Symonds P, Taylor J, Chalabi Z, et al. Development of an England-wide indoor overheating and air pollution model using artificial neural networks. *Journal of Building Performance Simulation* 2016; 9: 606–619.
- [6] DCLG. English Housing Survey 2010–2011, <http://www.communities.gov.uk/housing/housingresearch/housingsurveys/englishhousingsurvey/> (2011).
- [7] United States Department of Energy. EnergyPlus V8, <http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus> (2013).
- [8] Mavrogianni A, Wilkinson P, Davies M, et al. Building characteristics as determinants of propensity to high indoor summer temperatures in London dwellings. *Building and Environment* 2012; 55: 117–130.
- [9] Schaul T, Bayer J, Wierstra D, et al. PyBrain. *Journal of Machine Learning Research* 2010; 11: 743–746.
- [10] Taylor J, Wilkinson P, Picetti R, et al. Comparison of built environment adaptations to heat exposure and mortality during hot weather, West Midlands region, UK. *Environment International* 2018; 111: 287–294.
- [11] Taylor J, Shrubsole C, Symonds P, et al. Application of an indoor air pollution metamodel to a spatially-distributed housing stock. *Science of the Total Environment*; 667. Epub ahead of print 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.341.
- [12] Symonds P, Taylor J, Mavrogianni A, et al. Overheating in English dwellings: comparing modelled and monitored large-scale datasets. *Building Research & Information* 2016; 45: 195–208.

A10. Rakenteet muuttuvassa ilmastossa

Vihreän siirtymän hinta rakennuskannassamme

Arto Toorikka ja Mikko Koskivuori
AFRY Rakennusfysiikka

Tiivistelmä

Rakennuskantaamme kohdistuu erilaisia vaatimuksia, joista tässä artikkelissa käsitellään ilmastonmuutosta ja vihreää siirtymää keskittyen ulkovaipparakenteisiin ja energiatehokkuuteen. Vihreän siirtymän ja ilmastonmuutoksen edellyttämistä toimenpiteistä syntyy lyhyehköllä aikajänteellä väistämättä merkittäviä kustannuksia. Osa toimenpidetarpeista liittyy suoraan muuttuvan ilmaston – ja korjausvelan – aiheuttamiin kosteusteknisiin haasteisiin. Suuri osa kustannuksista aiheutuu muista kuin teknisistä tekijöistä. Toisaalta, mikäli toimenpiteisiin ei ryhdytä tarpeenmukaisessa laajuudessa, voi sekin olla pitkällä aikavälillä erityisen haitallista niin talouden kuin ympäristönkin näkökulmasta. Tasapainottamalla tuleva kunnossapito ja korjaaminen vastaamaan muuttuvaa toimintaympäristöämme voidaan saavuttaa paras lopputulos. Keskeisintä on huomioida energiatehokkuus ja vaipparakenteiden toimivuus kokonaisuutena.

1. Johdanto

Ilmastonmuutos sekä kestävä kehityksen tavoitteet ja sääntely muokkaavat toimintaympäristöä missä rakennuksiamme ylläpidetään ja korjataan. Jotta rakennuskantamme toimii tulevaisuudessakin, tulee korjaushankkeissa investoida ilmastonmuutoksen hillintään ja ilmastonmuutokseen sopeutumiseen kestävä rakentamisen näkökulmasta. Uudisrakentamisen näkökulmia ei arvioida artikkelissa.

2. Vihreän siirtymän ajurit

Rakennusfysiikan lainalaisuudet ovat pysyviä – vaikka tieto lisääntyy ja sitä sovelletaan uusin tavoin, eivät perusasiat muutu. Toimintaympäristömme kuitenkin muuttuu erityisesti ympäristöön ja ilmastoon liittyvän kehityksen johdosta. Suomen rakennuskannan rakennusfysikaaliseen toimivuuteen vaikuttavat tulevana vuosikymmeninä erityisesti lämpötilan ja sademäärän kasvu sekä ääri-ilmiöiden lisääntyminen [1-3]. Ilmastonmuutoksen fyysisten vaikutusten ohella ja seurauksena myös säädösympäristömme, asenneilmastomme ja taloudelliset toimintamallit kehittyvät. Lisäksi osittain erillisistä syistä johtuen energiamarkkinat ovat murroksessa.

2.1 Muuttuvan ilmaston suorat vaikutukset

Suurin osa Suomessa yleisesti käytössä olevista ulkoseinärakenteista toimii kosteusteknisesti myös muuttuvassa ilmastossa. Sademäärien ja tuulisen sään lisääntyminen lisää yleisesti rakennusten ulkovaipparakenteisiin kohdistuvaa kosteusrasitusta. Lisääntyvät pilviset säät myös heikentävät rakenteiden kuivumiskykyä. Erityistä riskiä liittyy ulkoseinärakenteisiin, jotka päästävät viistosadetta lävitseen, pidättävät vettä rakenteen huokosverkostossa ja joiden tuuletus ja/tai vedenohjauskyky on heikkoa. Nykyohjeistuksen mukainen ja myös hieman vanhempi betoni julkisivuissa kestää muuttuvankin ilmaston rasituksia. Sisälämpötilojen hallintaan liittyvät riskit ovat merkittäviä. Ilman lisätoimia tulevat korkeiden lämpötilojen terveyshaitat huomattavasti lisääntymään Suomessa jo lähitulevaisuudessa väestön ikääntyessä. [1,2]

2.2 Euroopan Unionin ohjaus ja kansallinen lainsäädäntö

2.2.1 Vihreän kehityksen ohjelma ja 55-valmiuspaketti

Euroopan komission vihreän kehityksen ohjelman tavoitteena on tehdä Euroopasta ilmastoneutraali vuoteen 2050 mennessä. Päästökseen tähän kaikki 27 EU-maata ovat sitoutuneet vähintään 55 % päästövähennyksiin vuoteen 2030 mennessä vuoteen 1990 verrattuna. Eurooppalaisessa ilmastolaissa EU:n ilmastotavoitteesta tehdään oikeudellinen velvoite. EU-maat valmistelevat lainsäädäntöä, tavoitteen saavuttamiseksi. Keskeinen osa lainsäädäntötyötä on rakennusten energiatehokkuusdirektiivin päivitys ja kestävän rahoituksen luokittelujärjestelmä eli taksonomia. [4-6]

Rakennusten energiatehokkuusdirektiivin päivitys on kesken ja lopullisen muotonsa direktiivi saanee loppuvuodesta 2023. Uudistus sisältää vaatimukset uudisrakennusten päästöttömyydestä, olemassa olevien rakennusten energiatehokkuuden parantamisesta sekä aurinkoenergiatuotannon lisäämisestä rakennuksiin. Lisäksi uudistus sisältäisi tiukennuksia esimerkiksi energiatodistuksiin (kaikille yhtenäinen malli), automaatio- ja ohjausjärjestelmiin sekä lämmitys-, ilmastointi- ja ilmanvaihtojärjestelmien tarkastuksiin. Monet vaatimukset otettaisiin käyttöön portaittain. Esimerkiksi rakennusten keskimääräistä primäärienergiankäyttöä tulisi parantaa seuraavasti (poikkeuksena esimerkiksi historialliset rakennukset):

- Vuonna 2033 energiatehokkuusluokkaa D
- vuonna 2040 tasolla, jolla varmistetaan päästöttömän rakennuskannan saavuttaminen vuoteen 2050 mennessä
- vuonna 2050 kaikki olemassa olevat rakennukset muutettu päästöttömiksi.

Peruskorjausten toteuttamista tuettaisiin suoralla taloudellisella ja hallinnollisella tuella sekä veronalennuksilla. [6,7]

Muitakin kuin rakennusalaa koskevan energiatehokkuusdirektiivin päivitys on hyväksytty heinäkuussa 2023. Direktiivi sisältää mm. vaatimuksen, että kukin jäsenvaltio veloitetaan kunnostamaan vuosittain vähintään 3 % kaikkien julkisten rakennusten kokonaispinta-alasta lähes nollaenergiarakennuksiksi tai päästöttömiksi rakennuksiksi. [8]

2.2.2 EU-taksonomia

EU-taksonomia määrittelee, mitkä sijoituskohteet ja hankkeet ovat kestäviä ilmaston ja ympäristön kannalta ja minkälainen liiketoiminta edistää taksonomiaan sisällytettyjä ympäristötavoitteita. Esimerkiksi uusien rakennusten rakentaminen, rakennusten peruskorjaus sekä rakennusten hankinta ja omistaminen ovat taksonomiakelpoisia toimenpiteitä. Tällöin niiden taksonomianmukaisuutta voidaan tarkastella kriteeristön mukaisesti. Jotta toiminto olisi taksonomian mukainen, tulee sen edistää merkittävästi yhtä tai useampaa ympäristötavoitetta, olla aiheuttamatta merkittävää haittaa muille tavoitteille sekä täyttää vähimmäissuojaperiaatteet. Yksi arviointikriteeri ilmastonmuutokseen sopeutumisen näkökulmasta on ilmatoriskiarvio. [9]

Välillisesti EU-taksonomia vaikuttaa lähes kaikkiin Euroopassa toimiviin yrityksiin. Keskeisiä kannusteita taksonomianmukaisuuteen ovat mm. (edullisemmän) rahoituksen saatavuus, toiminnan vertailtavuus ja kehittäminen sekä kestävyuden kommunikointi uskottavasti.

2.2.3 Kansallinen lainsäädäntö

Uudessa rakentamislaisissa tavoitteena voidaan nähdä kestävät, toimivat ja ympäristöystävälliset

rakennukset ja rakentamisen prosessi. Keskeisimpiä lisäyksiä ovat uudet tekniset vaatimukset rakennuksen vähähiilisyydestä ja rakennuksen elinkaariominaisuuksista. Myös esimerkiksi purkumateriaali- ja rakennusjätteselvityksen laatiminen, materiaaliselosteen laatiminen, kansallinen päästötietokanta, digitaalinen käyttö- ja huolto-ohje sekä vaatimus uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian vähimmäisosuudesta ovat osa vihreän siirtymän toimia. Rakentamislaki edellyttää, että rakennukset toteutetaan tavoitteelliselta tekniseltä käyttöältään pitkäikäiseksi ympäristöstä aiheutuvien olosuhteittensa edellyttämällä tavalla. [10]

Rakentamislain ohella tulemme todennäköisesti näkemään säädösmuutoksia esimerkiksi EU-direktiivien toimeenpanon seurauksena. Lisäksi meihin vaikuttavat suoraan velvoittavat EU-asetukset. Esimerkiksi rakennustuoteasetuksen päivitys tulee asettamaan runsaasti vihreään siirtymään kytkettyjä vaatimuksia rakentamisessa käytettäville tuotteille [11].

2.3 Energiamarkkinat

Suomessa ja Euroopassa sähkön hinta nousi merkittävästi vuoden 2021 loppukesällä. Vuoden 2022 aikana sähkön markkinahinta saavutti Suomessa tähänastiset huippunsa elo- ja joulukuussa. Sähkön hintojen nousun taustalla on moninaisia erilaisia syitä, joista eräs on liiallinen riippuvuus fossiilisista polttoaineista. [12]

Sähkön ohella päästöoikeuksien, kivihiilen ja maakaasun hinnat ovat nousseet runsaasti viime vuosina, ja tämä on nostanut kaukolämmön hintaa [13]. Niin kutsutun ”vihreän lämmön” voidaankin arvioida olevan tulevaisuudessa selvästi edullisempaa kuin fossiilisilla tuotetun.

Arvioiden mukaan energiahintojen lähitulevaisuuden kehitys riippuu pitkälti Venäjän hyökkäyssodan jatkosta sekä Venäjän tuottamien fossiilisten polttoaineiden hinnoista. Sähkön kysyntä ja tuotanto lisääntyvät vuoteen 2060 mennessä noin 50 % ja tuotantomuodoista erityisesti aurinko- ja tuuli kasvavat paljon. Oletuksena on, että Euroopan energiasektori muuttuu hiilivapaaksi vuoteen 2060 mennessä. Keskimääräisen sähkönhinnan oletetaan pysyvän noin 50...110 eurossa megawattitunnilta. Koska tuotanto vaihtelee suhteessa aikaan, tulee tuntihinnoissa olemaan merkittävää vaihtelua. [14]

3. Ulkovaipparakenteisiin kohdistuvat vaatimukset

3.1 Tekninen toimivuus ja käyttöikä

Yleisesti voidaan odottaa, että lisääntyneen kosteusrasituksen seurauksena kosteusvaurioiden esiintyminen nykyisessä rakennuskannassamme kasvaa tulevaisuudessa. Ilmastonmuutos siis lisää rakenteiden kosteusteknisen toiminnan vaatimuksia ja rakennusten ylläpidon tarvetta. Ulkovaipparakenteisiin kohdistuvien rasitustekijöiden kasvaessa nykyiset riskit korostuvat, mikä todennäköisesti yleisellä tasolla alentaa rakenteiden käyttöikää ja näin ollen nykyisen rakennuskannan peruskorjausväli lyhenee.

Uusi rakentamislaki edellyttää, että lisääntyvät rasitustekijät on huomioitava nykyisten riskitasojen rinnalla suunniteltaessa peruskorjauksia. Rakenteiden suunnittelussa tulee kiinnittää entistä enemmän huomiota rakenteiden vikasietoisuuteen ja korjattavuuteen. [10]

3.2 Energiatohokkuus

Rakennusten energiatohokkuusdirektiivin vaatimukset johtaisivat merkittäviin korjaustarpeisiin

rakennuskannan energiatehokkuuden parantamiseksi. Tarkoittaen esimerkiksi rakenteiden lämmöneristyskyvyn parantamista. Vaatimukset johtaisivat korjaustarpeisiin nykyisessä rakennuskannassa jo ennen rakenteiden varsinaisen teknisen käyttöiän päättymistä.

Rakenteellisten toimenpiteiden yhteydessä tulee huomioida rakenteen kosteustekninen toiminta. Lisälämmöneristämisen myötä ulkovaipparakenteiden kosteusteknisen toiminnan mahdollinen heikkeneminen saattaa johtaa pelkkää lisäeristystoimenpidettä laajempiin muutostarpeisiin lähentyen rakenneosakohtaisesti peruskorjauslaajuutta. Taloteknisten järjestelmien muutokset ja osakorjaukset eivät poista muita korjaustarpeita.

4. Kustannukset

Suomessa rakennetaan vuosittain uutta kerrosalaa noin kahdeksan miljoonaa neliötä, josta asuinrakennuksia on noin 45 %. Uudisrakentamisen määrä koko rakennuskannan määrästä on noin 1–1,5 %. Rakennuskannan energiatehokkuuden parantamisen vaatimukset kohdistuvat siis ennen kaikkea olemassa olevaan rakennuskantaan. [15]

Ilmastonmuutokseen varautumisen ja sopeutumisen vaikutuksista julkiseen talouteen on vielä vähän tutkimuksia, ja tieto siitä on epävarmaa. Rakennuksiin vaikutuksia on erityisesti keskimääräisillä lämpötilan nousulla ja sademäärien lisääntymisellä sekä kertaluonteisina toistuvilla sään ääri-ilmiöillä. Suorat vaikutukset ovat todennäköisesti vähäisiä suhteessa useisiin muihin maihin. Keskeistä on riskeihin varautuminen ja sopeutumispolitiikka yleisesti. [16]

4.1 Olemassa olevan rakennuskannan parantaminen

Energiatodistusrekisterin tietoihin pohjautuvan selvityksen perusteella 28 % nykyisestä asuinrakennuskannasta sisältää korjausvelkaa suhteessa rakennusten energiatehokkuusdirektiivin ehdotukseen. Heikoin tilanne sähkönkulutuksen suhteen oli sairaalarakennuksilla. Ehdotuksen mukaisten toimenpiteiden kustannukset Suomen rakennuskantaan olisivat noin 14...21 miljardia euroa seuraavan 10 vuoden aikana. Osa euromäärästä käytettäisiin joka tapauksessa rakennusten energiatehokkuutta parantaviin korjauksiin, mutta ei varmastikaan vastaavissa määrin tai aikataulussa. [15,17]

Ulkovaipan lämmöneristävyyden lisäämisellä saavutettava energiansäästö tulee talvien lämpenemisen myötä pienenevän. Lämmöneristävyyden parantamisen vaikutukset energiankulutukseen ovat sitä pienempiä, mitä energiatehokkaammat talotekniset järjestelmät ovat. Energiankulutuksen näkökulmasta on suositeltavaa hyödyntää ensisijaisesti rakenteellisia tai passiivisia jäähdytysratkaisuja pelkän koneellisen jäähdytyksen sijasta. [18]

Energiainnoittelun muuttuessa dynaamisemmaksi kiinteistökohtaisen energian lyhytaikaisvarastoinnin merkitys esimerkiksi rakennusten termistä massaa hyödyttämällä saattaa olla tulevaisuudessa varteenotettava vaihtoehto kulutuksen tasaamiseen rakennuksissa.

4.2 Johtopäätökset

Vihreän siirtymän hinta Suomen rakennuskantaan on monimutkainen kokonaisuus ja asioita tulisikin tarkastella kokonaisuutena ja toimenpiteitä toteuttaa hallitusti. Hiilidioksidipäästöjen minimoimisen ja kiinteistönomistajille aiheutuvien kustannusten näkökulmasta vihreän siirtymän aiheuttamat toimenpiteet, kuten energiatehokkuuden parantaminen olisi usein kannattavinta ajoittaa rakennusten tekniseen korjaustarpeeseen perustuvien hankkeiden yhteyteen.

Teknisen tarpeen mukaan ajoitettujen korjausten kustannus- tai päästövaikutus ei todennäköisimmin ole niin merkittävä, kuin esimerkiksi erillisten energiatehokkuustoimien toteuttaminen. Rakenteiden kosteusteknisen toiminnan ja vaurionsietokyvyn parantamiseen tähtäävien toimenpiteiden tarve ei johdu pelkästään säätelystä, vaan on seurausta muuttuvasta ilmastosta sisältyen vähintään osittain jo nykyiseen korjausvelkaan.

Epäsuorina kustannusvaikutuksina tulisi huomioida myös muuttuvan ilmaston vaikutukset muun muassa rakennusten ylläpitotoimenpidetarpeiden lisääntymiseen sekä rakenteiden ja järjestelmien vikaantumisesta aiheutuvien riskien kasvuun. Suositeltavaa olisi toteuttaa säännöllisiä rakenteidenkin tarkastuksia (katsastukset) varsinaisten korjaustarveselvitysten rinnalla.

Huomioiden lisälämmöneristyksen kosteusteknistä toimintaa heikentävät vaikutukset, olisi korjaussuunnittelussa suositeltavaa painottaa rakenteiden kosteusteknistä toimintaa energiatehokkuustoimien keskittyessä jäähtymisen ja lämmityksen ratkaisujen toteutukseen.

Vihreän siirtymän riskeinä voidaan nostaa esiin ainakin seuraavia tekijöitä:

- Huonoimmissa rakennuksissa on paljon potentiaalia energiatehokkuuden ja kestävyuden parantamiseksi, mutta pakollinen korjaaminen johtaa myös resurssien tehottoomaan kohdistamiseen. Näin voi olla esimerkiksi tilanteessa, jossa joudutaan korjaamaan elinkaarensa loppupuolella oleva rakennus vain asetettujen tavoitteiden saavuttamiseksi.
- Jos rakenteiden kosteusteknistä toimintaa ja vaurionsietokykyä ei huomioida vihreään siirtymään liittyvien toimenpiteiden yhteydessä, saattaa se johtaa rakenteiden vaurioitumiseen ja ennenaikaiseen korjaustarpeeseen.
- Jos kohdekohtaisia ilmastomuutokseen liittyviä riskejä ei tunnisteta tai ne ylimitoitetaan, saattaa se johtaa resurssien kohdentamiseen väärin (yli- tai alikorjaukset).
- Liian korkeiksi nousevat korjauskustannukset voivat estää sinänsä tarkoituksenmukaisten korjausten toteuttamisen ja aiheuttaa rakennusten poistumista käytöstä.

5. Yhteenveto

Monet tulevat vihreän siirtymän seuraukset ovat hankalasti ennustettavia. Hyvin todennäköistä kuitenkin on, että muutos on merkittävä ja myös rakentamisen kustannukset jatkavat niiden seurauksena kasvuaan. Toisaalta mikäli toimenpiteitä ei tehtäisi, kasvaisivat muut rakennusten elinkaaren kustannukset. Kaikki tiedossa olevat ja ennakoidut velvoitteet, mitä esimerkiksi säännösten kehittämisestä seuraa eivät varmastikaan ole sinänsä teknistaloudellisesti kannattavia niin investointien kuin elinkaarensa kustannusten tai ilmastovaikutusten suhteen.

Emme pysty estämään toimintaympäristössämme tapahtuvia muutoksia. Voimme kuitenkin tunnistaa ne sekä niistä seuraavat riskit ja pyrkiä hallitsemaan niitä ennakoiden. Näin tarpeettomia kustannuksia, päästöjä ja rakennuskannan kunnon heikentymistä voidaan hallita.

Lähdeluettelo

- [1] T. Pakkala. 2020. Assessment of the Climate Change Effects on Finnish Concrete Facades and Balconies. Väitöskirja. Tampereen Yliopisto.
- [2] J. Lahdensivu, T. Pakkala, J. Pikkuvirta, et al. 2023. Rakennusten kosteusvauriot ja ylläpidon muuttuvassa ilmastossa – RAIL. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2023:2. Valtioneuvoston kanslia.
- [3] IPCC. 2023. Verkkosivusto. Luettu 8.8.2023. Saatavissa: <https://interactive-atlas.ipcc.ch/regional-synthesis>

- [4] Euroopan komissio. Euroopan vihreän kehityksen ohjelman toteuttaminen. Verkkojulkaisu. Luettu 2.8.2023. Saatavissa: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_fi.
- [5] Euroopan komissio. 55-valmiuspaketti. Verkkojulkaisu. Luettu 2.8.2023. Saatavissa: <https://www.consilium.europa.eu/fi/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>.
- [6] Euroopan unionin neuvosto, ”Infografiikka – 55-valmiuspaketti”. 2023. Verkkojulkaisu. Luettu 2.8.2023. Saatavissa: <https://www.consilium.europa.eu/fi/infographics/fit-for-55-making-buildings-in-the-eu-greener/>.
- [7] M. Haakana. 2023. Vähähiilisen rakentamisen vuosiseminaari, seminaariesitys. Ympäristöministeriö.
- [8] Euroopan komissio. 2023. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi energiatehokkuudesta ja asetuksen (EU) 2023/955 muuttamisesta (uudelleenlaadittu teksti). PE-CONS 15/23.
- [9] Euroopan komissio. EU Taxonomy Navigator. Verkkosivusto. Luettu 2.8.2023. Saatavissa: <https://ec.europa.eu/sustainable-finance-taxonomy/home>
- [10] Rakentamislaki 751/2023.
- [11] Euroopan komissio. 2022. Proposal for a regulation of the european parliament and of the council laying down harmonised conditions for the marketing of construction products, amending Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Regulation (EU) 305/2011.
- [12] Energiategollisuus ry. 16.5.2023. Sähkön kohonneet hinnat johtuvat monista markkinailmiöistä. Verkkosivusto. Luettu 2.8.2023. Saatavissa: https://energia.fi/energiapolitiikka/ajankohtaista_sahkomarkkinoista
- [13] Helen Oy. 31.8.2022. Verkkosivusto. Luettu 2.8.2023. Saatavissa: <https://www.helen.fi/uutiset/2022/merkittava-kustannusten-nousu-vaikuttaa-kaukolammon-hintaan>
- [14] A. Schmitt ja Z. Huangloulun. 2022. EU Energy Outlook to 2060: how will power prices and revenues develop for wind, solar, gas, hydrogen + more. Verkkojulkaisu. Luettu 2.8.2023. Saatavissa: <https://energypost.eu/eu-energy-outlook-to-2060-how-will-power-prices-and-revenues-develop-for-wind-solar-gas-hydrogen-more/>
- [15] Suomen Pankki. 2023. Asuinrakennusten energiatehokkuudessa on parannettavaa. Verkkojulkaisu. Luettu 2.8.2023. Saatavissa: <https://www.eurojalous.fi/fi/2023/artikkelit/asuinrakennusten-energiatehokkuudessa-on-parannettavaa/>
- [16] T. Valkonen, T. Kuusi, J. Pohjola et al. 2023. Ilmastonmuutoksen kokonaistaloudelliset vaikutukset julkiseen talouteen. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2023:17. Valtioneuvoston kanslia.
- [17] Kiinteistöliitto. 2023. Rakennusten energiatehokkuusdirektiivin vaikutukset ja kehittämistarpeet. Verkkojulkaisu. Luettu 2.8.2023. Saatavissa: <https://www.kiinteistoliitto.fi/kiinteistoliitto/edunvalvonta/energiatehokkuusdirektiivi/>
- [18] Juha Vinha, Anssi Laukkarinen, Mikael Mäkitalo et al. 2013. Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Rakennetekniikka. Tutkimusraportti 159

Nykyisen rakennuskannan kosteustekninen toimivuus muuttuvassa ilmastossa

Jukka Lahdensivu, Jussa Pikkuvirta ja Toni Pakkala
Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka, Korjausrakentaminen ja rakenteiden elinkaaritekniikka

Tiivistelmä

Ilmatieteen laitoksen laatimien ennusteiden mukaan lämpötilan nousun seurauksena Suomen ilmasto lämpenee erityisesti talvisin. Ilmastomuutoksen seurauksena säälle alttiiden rakenteiden, kuten julkisivujen parvekkeiden ja vesikattojen saama viistosaderasitus aiheuttaa näille rakenteille merkittävää korjaustarvetta nykyisessä rakennuskannassa, koska vanhojen rakenteiden säilyvyysominaisuudet ovat usein puutteellisia. Myös kosteus- ja mikrobivaurioiden ennakoitaan lisääntyvän kohoavan kosteuspitäisyyden seurauksena.

Tutkimuksessa tehtiin laskennallisia tarkasteluja ulkoseinärakenteiden rakennusfysikaalisesta toimivuudesta nykyisessä ja projisoiduissa tulevaisuuden ilmastoskenaarioissa. Suurin osa Suomessa yleisesti käytössä olevista ulkoseinärakenteista pärjää myös muuttuvassa ilmastossa. Homehtumisriski nousee sellaisissa ulkoseinärakenteissa, jotka päästävät viistosadetta lävitseen, pidättävät vettä rakenteen huokosverkostossa (tiili, läpäisevä betoni) ja tuuletus on heikkoa.

1. Johdanto

Globaalin ilmastomuutoksen seurauksena ilmasto on lämmennyt Suomessakin noin kaksi astetta viimeisen sadan vuoden aikana [1]. Ilmatieteen laitoksen laatimien ennusteiden mukaan lämpötilan nousun seurauksena Suomen ilmasto lämpenee erityisesti talvisin [2]. Ilmastomuutoksen seurauksena säälle alttiiden rakenteiden, kuten julkisivujen parvekkeiden ja vesikattojen saama viistosaderasitus aiheuttaa näille rakenteille merkittävää korjaustarvetta nykyisessä rakennuskannassa, koska vanhojen rakenteiden säilyvyysominaisuudet ovat usein puutteellisia [3]. Myös kosteus- ja mikrobivaurioiden ennakoitaan lisääntyvän kohoavan kosteuspitäisyyden seurauksena [4]. Rakennusten kosteus- ja mikrobivauriot ovat yksi viidestä keskeisestä ilmastomuutoksen aiheuttamasta terveysuhasta [5]. Nykyisen rakennuskannan kosteusvaurioiden korjaamisen on arvioitu olevan 30 miljardia euroa [6].

Ilmastomuutoksen myötä rakennusten kosteusvaurioiden odotetaan pahenevan viistosateiden ja tulvien lisääntymisen vuoksi. Myös energiatehokkuuden parantaminen muuttamalla lämmöneristystä ja rakennusten ilmanvaihtoa vaikuttaa kosteusvaurioriskiin [4,7]. Rakenteiden tietyyntyyppisten kosteusongelmien odotetaan yleistyvän pääasiassa rakennusten julkisivussa (sade, tuuli) ja kellareissa (tulvat) [4,8,9]. Suurin osa, mutta ei kaikki [9], aiemmat tutkimukset ovat keskittyneet ilmastomuutoksen vaikutuksiin uusiin rakennuksiin, eikä missään aiemmassa tutkimuksessa ole tutkittu vaikutuksia olemassa olevien rakennusten seinärakenteiden sisäosiin.

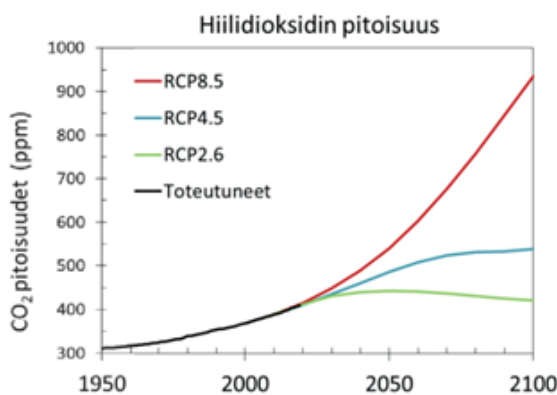
Valtioneuvoston kanslian rahoittamassa Rakennusten kosteusvauriota ja ylikäynnemisen muuttuvassa ilmastossa – RAIL-hankkeessa tehtiin laskennallisia tarkasteluja ulkoseinärakenteiden rakennusfysikaalisesta toimivuudesta nykyisessä ja projisoiduissa tulevaisuuden ilmastoskenaarioissa.

2. Ilmastonmuutosennusteet

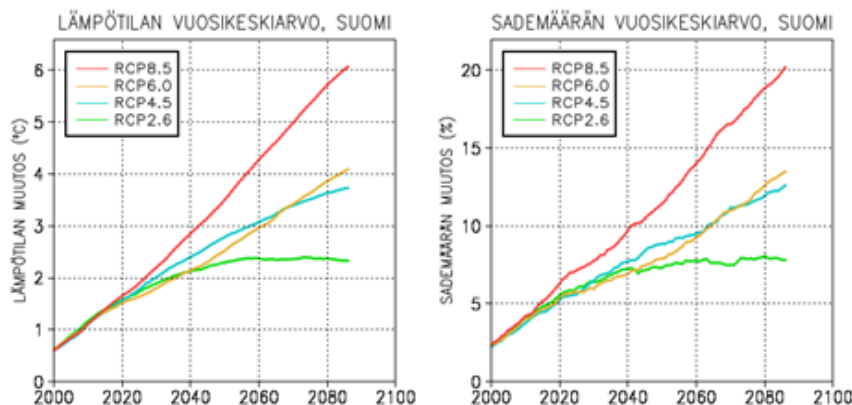
Ilmatieteen laitos on laatinut ennusteita Suomen tulevasta ilmastosta kolmelle eri kasvihuonekaasupäästöskenaariolle:

- RCP2.6 (Representative Concentration Pathways) kuvaa vähäistä ilmastonmuutosta, jossa globaalit hiilidioksidipäästöt kääntyisivät laskuun noin vuonna 2020
- RCP4.5 kuvaa kohtalaista ilmastonmuutosta, jossa globaalit hiilidioksidipäästöt kääntyisivät laskuun noin vuonna 2040
- RCP8.5 kuvaa hyvin voimakasta ilmastonmuutosta, jossa globaalit hiilidioksidipäästöt eivät käänny laskuun vielä vuoteen 2100 mennessä. [11]

Kuvassa 1 on esitetty ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden muutos mitattuna ja ennustettuna eri RCP-skenaarioiden mukaan. Kuvassa 2 on esitetty arvio Suomen lämpötilan noususta ja sademäärän kasvusta eri skenaarioilla.



Kuva 1. Ilmakehän hiilidioksidipitoisuus kolmen eri RCP-skenaarion mukaan. Alkuosan käyrä esittää havaittuja pitoisuuksia [10,11].



Kuva 2. Vuoden keskilämpötilan (vasen kuva) ja sademäärän (oikea kuva) muutos Suomessa vuosina 2000–2085 verrattuna jakson 1971–2000 keskimääräisiin arvoihin. Käyrät esittävät 28 maailmanlaajuisen ilmastonmuutosmallin tulosten keskiarvoa neljälle eri RCP-kasvihuonekaasuskenaariolle. [12]

3. Tutkimusaineisto ja menetelmät

Ulkoseinärakenteiden rakennusfysiikaaliset laskennat suoritettiin WUFI-2D laskentaohjelmalla. Säädatana laskennassa käytettiin RASMI-hankkeessa [11] tuottamaa aineistoa, johon kuuluu

kerätty säädata nykyilmastossa (vuodet 1989–2018) sekä 30-vuotiset ennusteet kolmella eri ilmastomuutoskenaariolla tulevaisuuden ilmastoon: 2015–2046 (nimetty keskikohtansa mukaan: 2030), 2035–2064 (2050) ja 2065–2094 (2080).

Laskenta toteutettiin simuloimalla 30 vuoden pituisia aikajaksoja nykyilmastossa sekä tulevaisuuden ilmastossa. Laskenta aloitettiin suorittamalla eri rakennetyyppien rakennusfysikaalinen tarkastelu nykyilmaston lisäksi voimakasta ilmastomuutosta kuvaavan RCP8.5-skenaarion vuoden 2080 ilmastossa. Myöhemmin tarkastelua laajennettiin osassa rakenteita suorittamalla laskenta kohtalaista ilmastomuutosta kuvaavan RCP4.5-skenaarion vuoden 2080 sekä RCP8.5-skenaarion vuoden 2050 säätietoennusteilla.

Rakenteiden simuloinnista saatujen olosuhdetietojen pohjalta rakenteiden homehtumisriskiä arvioitiin laskemalla kunkin 30 laskentavuoden maksimihomeindeksi hyödyntämällä Suomalaista homemallia. Homeindeksin avulla voidaan arvioida todennäköisyyttä sille, esiintyykö rakenteessa hometta ja vertailemalla eri skenaarioiden ilmastodatalla saatuja tuloksia.

4. Tulokset ja tulosten tarkastelu

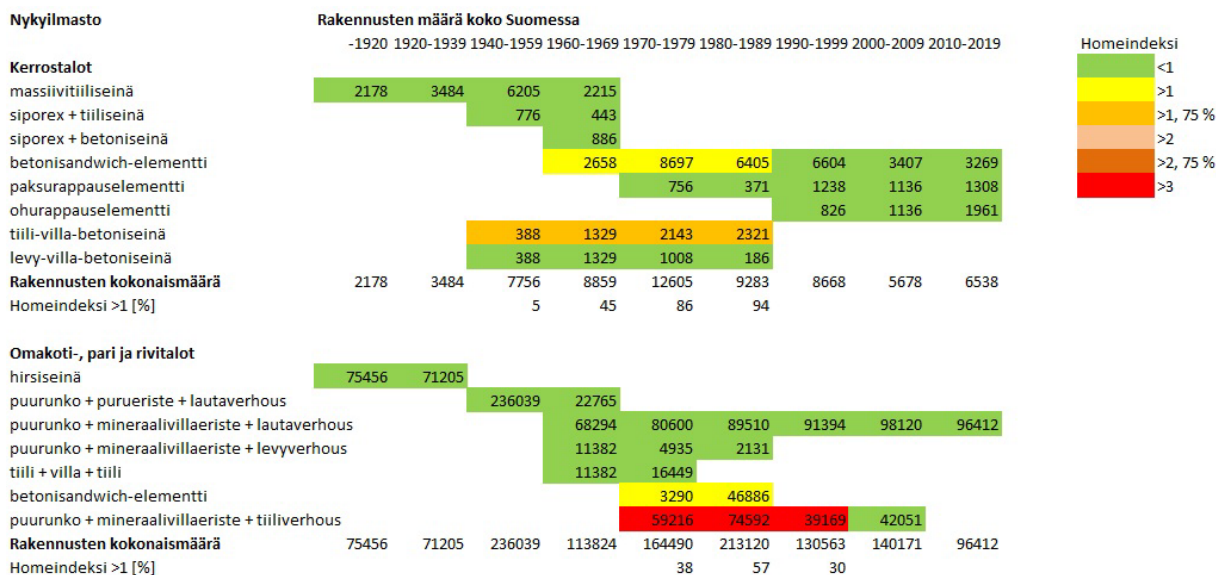
Laskennallisten tarkastelujen perusteella on tehty arvio Suomen asuinrakennuksissa olevien ulkoseinärakenteiden homeindeksistä ja sen muutoksesta ilmastomuutoksen seurauksena. Ilmastomuutoksen vaikutustarkastelu on tehty ainoastaan ankarimmalle skenaariolle RCP8.5 ja vuodelle 2080. Ulkoseinärakenteiden tarkastelussa omakoti-, pari- ja rivitalojen määrät on laskettu yhteen rivitalojen pienen määrän vuoksi. Asuinkerrostalot on tarkasteltu omana joukkonaan.

Kuvassa 3 on esitetty asuinrakennuskannan ulkoseinärakenteiden laskennallinen homeindeksi eri ulkoseinärakenteilla nykyilmastossa. Kuvan ulkoseinärakenteiden jakauma on laadittu Kerrostalot-kirjasarjan [13] sekä Forecon Oy:n laatiman eri julkisivumateriaalien jakauman perusteella. Kuvasta on jätetty pois harvinaisemmat ulkoseinätyypit, kuten lasi, luonnonkivi ja metallilevyt, koska niiden osuudet ovat tyypillisesti 1–2 prosentin luokkaa.

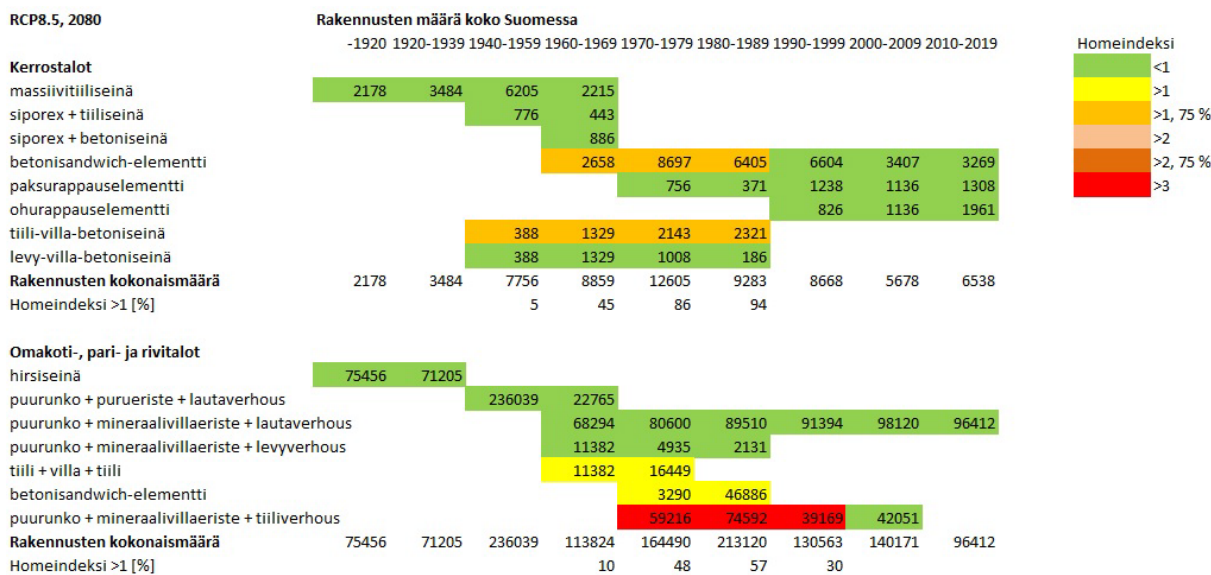
Asuinkerrostaloissa vaurioherkimpiä ulkoseinärakenteita ovat tiili-villa-betoniseinät, joiden tuuletusväli on ennen 1990-lukua ollut olematon tai hyvin pieni. Vasta 1990-luvulla on yleisesti ohjeistettu tuuletusrakoa tiiliseiniin. Toinen seinärakenne, jossa homeindeksi ylittää 1:n on betonisandwich-elementti, jonka ulkokuoren betoni on tehty korkealla vesi-sementtisuhteella ja näin betonin tiiviys on jäänyt heikoksi. Tämä näkyy myös näiden ennen 1990-lukua valmistuneiden julkisivubetoneiden karbonatisoitumisnopeudessa [3]. 1990-luvulla valmistuneiden sandwich-elementtien betoni on huomattavasti tiiviimpää, ja karbonatisoituminen hidasta [14]. 1990-luvulla ja sen jälkeen tiiviistä betonista valmistuneissa sandwich-elementeissä ei siten viistosade pääse kastelemaan lämmöneristeitä ja homeindeksi pysyy alhaisella tasolla.

Kaikkiaan homeindeksi on koholla yhteensä 23941:ssä asuinkerrostalossa, jos oletetaan, että koko julkisivurakenne on kuvan 3 mukainen. Erityisesti 1960- ja 70-lukujen asuinkerrostaloissa esiintyy erilaisia ulkoseinärakenneyhdistelmiä. Usein päädyissä on tiili-villa-betonirakenne ja rakennuksen pitkillä sivuilla betonisandwich-elementit. Näiden lisäksi esimerkiksi parvekkeiden taustaseinillä on tuohan aikaan käytetty kevyitä puurankunkoisia seiniä sekä rakennuksen pitkillä sivuilla levy-villa-betoni -rakenteita. Yksittäisen asuinkerrostalon kohdalla onkin syytä

tarkastella useamman seinärakenteen homeindeksiä, jotta voidaan arvioida ko. rakennuksen vaurioherkkyyttä.



Kuva 3. Suomen asuinrakennuskannan homeindeksit eri ulkoseinärakenteilla nykyilmastossa vuosikymmenittäin jaoteltuna.



Kuva 4. Suomen asuinrakennuskannan homeindeksit eri ulkoseinärakenteilla skenaariolla RCP8.5 vuodelle 2080 vuosikymmenittäin jaoteltuna.

Omakoti-, pari- ja rivitalojen kohdalla selvästi vaurioherkin rakenne on tiiliverhoiltu puurunkoinen seinä. Näissä seinärakenteissa ilmarako on ohjeistettu vasta 1990-luvulla ja silloinkin osassa rakennuksia laastipurseet voivat tukkia ilmarakoa. Toinen vaurioherkkä ulkoseinärakenne on betonisandwich-elementti samasta syystä kuin asuinkerrostaloissa. Betonisandwich-elementtejä on kuitenkin käytetty varsin vähän omakoti-, pari- ja rivitaloissa verrattuna puu- ja tiilijulkisivuihin. Kaikkiaan homeindeksi on koholla 223154:ssä rakennuksessa, jos oletetaan, että koko julkisivurakenne on kuvan 3 mukainen. Homeindeksi ylittää arvon 3 ainoastaan yhdellä ulkoseinärakenteella, eli muuratulla puurunkoisella seinärakenteella. Tällaisia rakennuksia on yhteensä 172977 kappaletta. Pientaloissa

julkisivumateriaalit vaihteleva vähemmän kuin kerrostaloissa. Tiiliverhoilluissa puurunkoisissa rakennuksissa saattaa osa julkisivusta olla lautaverhoilua.

Ankarimmalla RCP8.5 skenaariolla ilmastonmuutos nostaa asuinkerrostaloissa betonisandwich-elementin homeindeksiä, mutta kokonaisuutena koholla olevien homeindeksien määrä on asuinkerrostaloissa täsmälleen sama kuin nykyilmastossa, ks. kuva 4. Pientaloissa merkittävin muutos on tiili-villa-tiili -rakenteen homeindeksin nousu yli yhden. Tämä lisää sellaisten rakennusten määrää 27831:llä, joissa homeindeksi on koholla. Kaikkiaan näitä on tällä skenaariolla 200808 kappaletta.

Kaikkiaan muutokset RCP8.5 skenaariolla nykyilmastoon verrattuna ovat pieniä. Ne ulkoseinärakenteet, joissa homeindeksi on koholla jo nykyilmastossa kärsivät tulevaisuuden ilmastosta eniten.

5. Päätelmät

Suurin osa Suomessa yleisesti käytettävistä ulkoseinärakenteista toimii rakennusfysikaalisesti hyvin sekä nykyisessä että tulevassa ennustetussa ilmastossa. Hyvän rakennusfysikaalisen toimivuuden edellytyksiä ovat ulkoverhouksen takana oleva avoin tuuletusrako, viistosadetta heikosti läpäisevä julkisivupinta sekä heikosti homehtuvat materiaalit. Yleistäen voidaan todeta, että ne rakenteet, jotka toimivat hyvin nykyilmastossa toimivat hyvin myös tulevaisuuden ilmastoskenaarioissa, vaikka homeindeksit niissä rakenteissa hieman kohoavatkin.

Laskennallisissa tarkasteluissa rakenteen homehtumisriski on suurin erilaiset tiilijulkisivuilla sekä korkean vesi-sementtisuhteen betonisandwich-julkisivuilla. Näissä julkisivumateriaaleissa ulkopinta on huokoinen ja kapillaarinen ja siksi hyvin viistosadetta läpäisevä ja toisaalta suuren huokostilavuuden vuoksi myös hitaasti kuivuva. Tuuletusraon puute tai heikko toimivuus lisää oleellisesti näiden ulkoseinärakenteiden homehtumisriskiä.

Rakennusmateriaalien homehtumisherkkyyksiluokalla on suuri vaikutus laskentatuloksiin. Puurunkoisissa ulkoseinissä yleisesti käytetyn kipsilevytuulensuojan pinnassa oleva kartonki kuuluu herkimmin homehtuviin, joten se yhdessä heikosti tuulettuvan kuorimuurirakenteen kanssa on riskirakenne jo nykyilmastossa ja homehtumisriski kasvaa tulevaisuuden ilmastoskenaarioilla.

Asuinkerrostaloissa ulkoseinärakenteen homehtumisriski on suurin 1960–1989 välillä rakennetuissa betonielementtikerrostaloissa, joissa betoniulkokuoren säilyvyysominaisuuksissa on yleisesti puutteita betonin pakkasenkestävyyden ja raudotteiden korroosion kannalta. Näissä rakennuksissa on tyypillisesti 1960- ja 70-luvuilla rakennusten päädyt tehty tiili-villa-betoni-rakenteina, joissa 75 %:ssa tapauksissa homeindeksi nousee yli 1:n.

Vakavin tilanne sekä nykyisessä että tulevassa ilmastossa on puurunkoisissa pientaloissa, joissa on tiiliverhous huonosti toimivalla tuuletusraolla. Tällaisia rakennuksia on rakennettu paljon 1970 ja 80-luvuilla.

Lähdeluettelo

- [1] Ilmatieteen laitos. Ilmastokatsaus 7/2022
- [2] Jylhä, K., Ruosteenoja, K., Räisänen, J., Venäläinen, A., Tuomenvirta, H., Ruokolainen, L., Saku, S. ja Seitola, T. 2009. Arvioita Suomen muuttuvasta ilmastosta sopeutumistutkimuksia varten. ACCLIM-hankkeen raportti 2009. Ilmatieteen laitos. Raportteja 2009:4. 102 p.
- [3] Lahdensivu, J. 2012. Durability properties and actual deterioration of Finnish concrete facades and balconies. Tampere. Tampere University of Technology. Publication 1028. 117 p + app. 37 p.
- [4] Vinha, J., Laukkarinen, A., Mäkitalo, M., Nurmi, S., Huttunen, P., Pakkanen, T. Kero, P., Manelius, E., Lahdensivu, J., Köliö, A., Lähdesmäki, K., Piironen, J., Kuhno, V., Pirinen, M., Aaltonen, A., Suonketo, J., Jokisalo, J., Teriö, O., Koskenvesa, A., Palolahti, T. 2013. Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, tutkimusraportti 159. 354 s. + 43 liites.
- [5] Tuomenvirta H., Haavisto R., Hildén M., Lanki T., Luhtala S., Meriläinen P., Mäkinen K., Parjanne A., Peltonen-Sainio P., Pilli-Sihvola K., Pöyry J., Sorvali J., Veijalainen N. 2018. Sää- ja ilmatoriskit Suomessa – Kansallinen Arvio. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 43. 107 s.
- [6] Reijula, K., Ahonen, G., Alenius, H., Holopainen, R., Lappalainen, S., Palomäki, E. & Reiman, M. 2012. Rakennusten kosteus- ja homeongelmat. Eduskunnan tarkastusvaliokunnan julkaisu 1/2012. Espoo. 178 s. + 28 liites.
- [7] Leivo, V. Kiviste, M., Aaltonen, A., Prasauskas, T., Martuzevicius, D., Haverinen-Saughnessy, U. 2019. Analysis of hygrothermal parameters in Finnish and Lithuanian multi-familybuildings before and after energy retrofits. Journal of Building Physics Vol. 42(2). Pp. 441-457.
- [8] Pakkala, T.A., Lemberg, A.M., Lahdensivu, J., Pentti, M. 2016. Climate change effect on wind-driven rain on facades. Nordic Concrete Research. Publication no. 54. Pp. 31-49.
- [9] Pakkala, T.A. 2020. Assessment of the Climate Change Effects on Finnish Concrete Facades and Balconies. Tampere University. PhD Thesis. Tampere University Dissertations 204. 98 pages. 23 app.
- [10] IPCC, 2013: Annex II: Climate System Scenario Tables [Prather, M., G. Flato, P. Friedlingstein, C. Jones, J.-F. Lamarque, H. Liao and P. Rasch (eds.)]. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [11] Jylhä, K., Ruosteenoja, K., Böök, H., Lindfors, A., Pirinen, P., Laapas, M., Mäkelä, A., 2020. Nykyisen ja tulevan ilmaston säätietoja rakennusfysikaalisia laskelmia ja energialaskennan testivuotta 2020 varten. Ilmatieteen laitos, Raportteja 2020:6.
- [12] Ruosteenoja, K. 2013. Maailmanlaajuisiin ilmastomalleihin perustuvia lämpötila- ja sademääräskenaarioita. Sektoritutkimusohjelman ilmastoskenaariot (SETUKLIM) 1.osahanke. Ilmatieteen laitos, Helsinki.
- [13] Neuvonen, P. 2006. Kerrostalot 1880-2000. Arkkitehtuuri, rakennustekniikka, korjaaminen. Helsinki. Rakennustieto Oy. 288 s.
- [14] Lahdensivu, E. 2022. Betonielementtikerrostalojen julkisivujen ja parvekerakenteiden vaurioituminen 1990-luvun rakennustuotannossa. Tampere. Tampereen yliopisto. Rakennetun ympäristön tiedekunta. Diplomityö. 91 s.

Sisäpuolisen lämmöneristämisen vaikutukset rakenteiden kosteustekniseen toimintaan liitosalueilla

Katja Karhunen, Petteri Huttunen ja Juha Vinha
Tampereen Yliopisto, Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka

Tiivistelmä

Tutkimuksessa selvitettiin massiiviseinäisten rakenneliitosten sisäpuolisen lisälämmöneristykseen vaikutuksia rakenteiden kosteustekniseen toimintaan liitosalueilla. Tutkimus on osittain jatkanut aiemmin julkaistun diplomityön *Sisäpuolisen lämmöneristämisen vaikutukset massiivitiiliseiniä kosteustekniseen toimintaan* pohjalta tutkimusta. Sisäpuolinen lisälämmöneristäminen on haastavaa toteuttaa kosteusteknisesti turvallisesti, sillä eristäminen viilentää vanhaa rakennetta. Liitosalueita tutkittiin Comsol Multiphysics -ohjelmalla, jossa liitosmallit eristettiin 100 mm paksulla kalsiumsilikaattieristeellä. Lisäksi tutkittiin ulkopuolisen impregnoinnin vaikutusta liitosalueisiin. Tutkimuksessa todettiin ulkoseinien sisäpuolisen eristämisen pahentavan kosteusolosuhteita liitosalueilla ja kosteuden ulottuvan pidemmälle rakenteisiin, mikäli eristys ulotetaan seinärakenteeseen liittyvään rakenteeseen. Useiden tutkittujen liitosten osalta huomattiin, että sisäpuolinen eristys aiheuttaa kosteusteknisiä riskejä, mikäli sen yhteydessä ei voida tehdä ulkopinnalle viistosateen imeytymistä merkittävästi vähentävää impregnointikäsitelyä.

1. Johdanto

Suomessa vanhojen rakennusten energiatehokkuus on heikkoa nykyrakentamiseen verrattuna. Ilmastonmuutos ajaa tarkastelemaan vanhojen rakennusten energiatehokkuutta ja pohtimaan ratkaisuja energiatehokkuuden parantamiseksi. Tutkimuksessa tarkasteltiin laskennallisilla menetelmillä lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa liitosalueilla, joihin on lisätty sisäpuolinen lämmöneristys. Tutkimuksessa tutkittiin esimerkitapauksia hyödyntäen 1960- ja 70-luvuilla rakennettujen julkisten rakennusten ulkoseinärakenteita. Tarkasteltuja liitoksia olivat ulkoseinien liittymät välipohjiin, yläpohjiin, väliseiniin sekä ikkunoihin.

Lisälämmöneristämisen toteutukseen ulkopuolinen eristäminen olisi kosteusteknisesti toimivampi ratkaisu, mutta useiden rakennusten julkisivut ilmentävät oman aikansa rakentamista kaupungeissa, minkä vuoksi julkisivut ovat usein suojeltuja. Näin ollen ulkopuolinen lisälämmöneristäminen ei ole vaihtoehto. Sisäpuolisen lisälämmöneristykseen tiedetään olevan kosteusteknisesti toimimattomampi ratkaisu, sillä sisäpuolelle asennettu lämmöneristys johtaa vanhan rakenteen viilenemiseen kylminä kuukausina, joka nostaa suhteellisen kosteuden arvoja vanhan rakenteen sisällä ja voi siten aiheuttaa kosteusperäisiä vaurioita.

Artikkeli esittelee erilaisia tutkittuja sisäpuolisen eristämisen toteutustapoja liitosalueilla, sekä ulkopintaan asennettavan impregnointikäsitelyn vaikutuksia yhdessä lisäeristämisen kanssa. Tutkimus toteutettiin käyttäen Comsol Multiphysics 6.1 sekä WUFI Pro 6.5 -ohjelmia. WUFI-ohjelmaa käytettiin säädätään liittyvien lähtötietojen muuntamiseen ja Comsol-ohjelmalla toteutettiin varsinainen tutkimus tekemällä liitoksia kuvaavia kaksiulotteisia malleja, joita simuloitiin nykyilmastoa vastaavassa 2050-ilmastossa sekä tulevaisuuden 2100-ilmastossa.

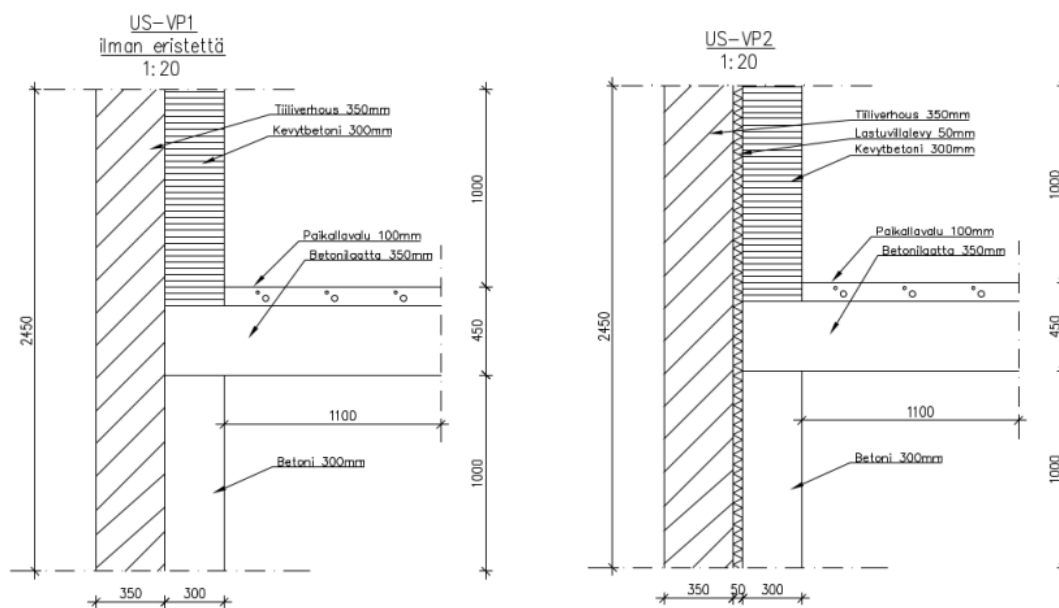
Tämä tutkimus on tehty osana BusinessFinlandin rahoittamaa FutureSpaces-tutkimushanketta, jonka tavoitteena oli luoda uusi palvelukonsepti korjausrakentamiseen.

2. Lisälämmöneristettyjen liitosten kosteusteknisen toimivuuden arviointi laskennallisesti

Laskentatarkastelujen tarkoitus oli vertailla erilaisten massiivirakenteisten liitosten kosteusteknistä toimivuutta. Vertailua tehtiin Suomalaisen homemallin avulla tutkien homeindeksien suuruutta, sekä lämpötilaindeksin arvoja eri tutkimuspisteissä. Lisäksi liitoksista tarkasteltiin suhteellisen kosteuden jakaumia liitosalueilla. Laskentatarkasteluissa liitosten lähtötilanteisiin, jotka on esitelty kappaleessa 2.1, lisättiin seinärakenteiden sisäpuolelle 100 mm paksu kalsiumsilikaattilevy. Kalsiumsilikaatti on kivipohjainen lämmöneriste, joka kykenee siirtämään kosteutta kapillaarisesti ja mahdollistaa eristetyn vanhan rakenteen kuivumista sisään päin. Lisäksi liitoksia vertailtiin ulkopuolisen pinnoittamisen eli impregnoinnin osalta.

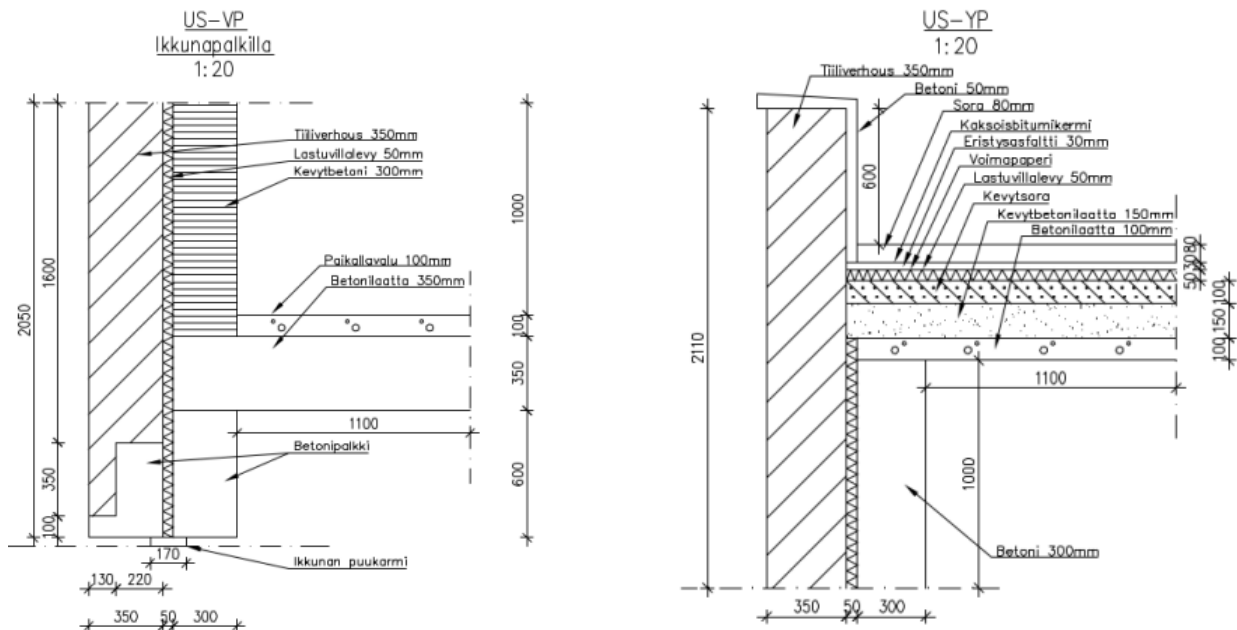
2.1 Tarkasteltavat liitokset

Laskentatarkasteluja tehtiin viidelle erilaiselle liitokselle, joiden tyypit on saatu A-insinöörit Oy:n arkistoista. Ensimmäinen US-VP1 liitos on esitetty kuvassa 1 vasemmalla ja on pilari-palkkirunkoisen rakennuksen tiiliverhotun seinän liitos betonirakenteiseen välipohjaan. Välipohja on kannatettu betonipalkein ja välipohjan yläpuolella on kevytbetoninen sisäkuori. Toinen US-VP2 liitos eroaa ensimmäisestä liitoksesta ainoastaan siten, että ulko- ja sisäverhouksen välissä on eriste, joka on 50 mm paksu lastuvillalevy, joka on esitetty kuvassa 1 oikealla.



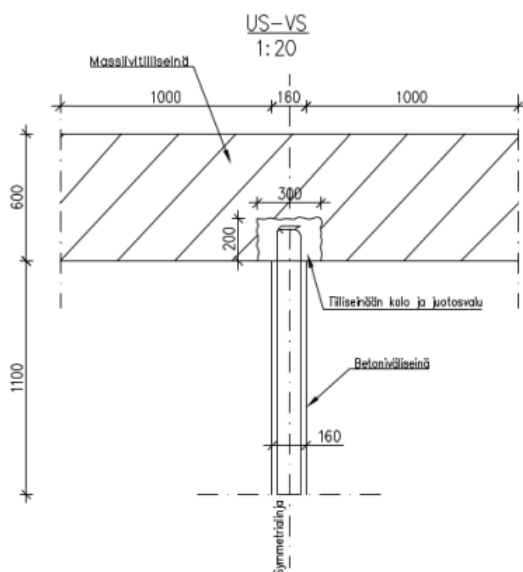
Kuva 1. US-VP1 lähtötilanne. (vas.) ja US-VP2 lähtötilanne (oik.).

Kolmas liitos US-IK on samanlainen toisen liitoksen kanssa, mutta siihen on lisätty ikkunan liittyminen ulkoseinään, joka on esitetty kuvassa 2. Neljäs liitos US-YP on sisäpuolelta lastuvillalla eristetyn ulkoseinän liitos yläpohjaan. Yläpohjassa on betoni- ja kevytbetonilaatan päällä kevytsora, lämmöneristeenä lisäksi lastuvillalevy ja vedeneristeenä voimapaperin päällä eristysasfaltti ja kaksinkertainen bitumikermikate. Päällimmäisenä kerroksena yläpohjassa on sora.



Kuva 2. US-*IK* lähtötilanne (vas.) ja US-*YP* lähtötilanne (oik.)

Viimeinen US-*VS* liitos eroaa massiivitiiliseinän osalta eniten muista liitoksista. Massiivitiiliseinään on liitetty 160 mm leveä betoniseinä raudoitteiden ja juotosvalun avulla. Massiivitiilirakenteen osalta laskennassa ei huomioitu muurauslaastia erikseen, vaan rakennetta käsiteltiin homogeenisenä rakenteena.



Kuva 3. US-*VS* lähtötilanne.

2.2 Materiaaliominaisuudet

Laskentatarkasteluissa käytettiin pääosin edellisessä tutkimuksessa [1] käytettyjä materiaaliominaisuuksia, jotka oli suurimmaksi osaksi valittu WUFI:n materiaalikirjastosta. Materiaaliominaisuuksia valittiin lisäksi RIL 255-1-2014-kirjasta [2] ja FRAME-tutkimuksen loppuraportista [3], sekä vähäisesti muista lähteistä.

2.3 Laskennan reunaehdot

Laskennallisiin tarkasteluihin valitaan ulkoilmanolosuhteiksi rakenteiden toiminnan kannalta kriittiset olosuhteet, joita kuvataan rakennusfysikaalisten testivuosiavun avulla. [2] Tutkimukseen valittiin Vantaan testivuodet ja ilmansuunnaksi etelä, sillä ne soveltuvat rakenteisiin, joiden sisäosan kosteustekniseen toimintaan vaikuttaa ulkoilman suhteellisen kosteuden lisäksi keskeisesti viistosade. Lisäksi auringonsäteily voimistaa kosteuden siirtymistä diffuusiolla ulkopinnasta rakenteen sisäosiin.

Ilmastonmuutoksen on huomattu etenevän ennakoitua nopeammin rakennusfysikaalisesti kriittisten ilmiöiden kannalta ja aiempien ennusteiden mukaisen vuoden 2050 olosuhteita vastaava vuosi kävi toteen jo 2010-luvulla. Tämän vuoksi nykyilmasto-olosuhteiden mitoitukseksi valittiin testivuosi Vantaa 2050. Tulevaisuuden ilmastoksi valittiin 2100-ilmasto. Näitä testivuosia on käytetty myös jo aiemmin mainitussa Pekka Karhusen diplomityössä [1], johon tämä tutkimustyö osin pohjautuu.

Sisäilman lämpötilana käytettiin vakioarvoa 21°C, jota suositellaan käytettävän rakennuksille, joissa pyritään pitämään normaali sisälämpötila. [2] Sisäilman suhteellisen kosteuden arvot määriteltiin ulkoilman suhteellisen kosteuden ja sisäilman kosteuslisän avulla toimisto-/liikerakennusten kosteusluokan mukaisesti.

2.4 Laskennan toteuttaminen

Laskenta toteutettiin WUFI Pro ja COMSOL Multiphysics ohjelmia apuna käyttäen. WUFI Pro 6.5-ohjelmaa käytettiin tutkimuksessa lähtötietojen etsimiseen, sekä säädataan liittyvien lähtötietojen muuntamiseen Comsol-ohjelmaan sopivaan muotoon. WUFIsta Comsoliin poimittiin olosuhteisiin liittyvät tiedot:

- sisä- ja ulkoilman kosteus
- sisä- ja ulkoilman lämpötila
- rakenteeseen kohdistuva lyhytaaltainen auringonsäteily ja pitkäaaltainen taivaan vastasäteily
- rakenteeseen kohdistuva viistosade

Liitoksia tarkasteltiin ohjelmasta löytyvän lämmönsiirtomodulin avulla, joka mahdollistaa rakennusmateriaaleille tarkoitetun yhdistetyn lämmön ja kosteuden simuloinnin. Laskennan toteuttamisen osalta pyrittiin optimoimaan numeeriset asetukset siten, että laskenta-aika ei kasva liian pitkäksi, mutta laskennan tarkkuus on hyvä. Laskenta suoritettiin kahden vuoden ajalta, sillä aiemman tutkimuksen pohjalta oli todettu, että rakenne tasaantuu ensimmäisen vuoden aikana.

3. Tulokset

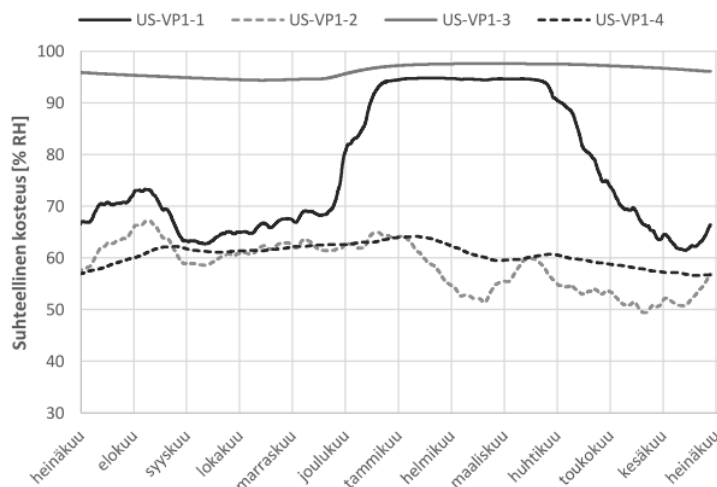
Tutkittaessa liitoksia huomattiin, että suhteellinen kosteus ylittää kriittisen tason rajan 80 % RH kaikissa liitoksissa rakenteen sisäpinnassa talviaikaan, mutta laskee keväällä alle kriittisen tason rajan pysytellen kesä- ja syysajan rajan alapuolella jo nykyilmastossa. Tutkimuksessa huomattiin myös, että sisäpuolinen eristäminen nostaa suhteellista kosteutta rakenteen sisällä kaikissa tutkituissa liitoksissa, pitäen suhteellisen kosteuden kriittisen tason rajan yläpuolella läpi vuoden lisäeristeen ja seinän välissä. Lisäksi tutkituissa tapauksissa, joissa sisäpuolista eristettä lisättiin liittyvään rakenteeseen, huomattiin kosteuden ulottuvan pidemmälle liittyvään rakenteeseen (esimerkiksi välipohjaan). Lisäksi tulevaisuuden ilmasto pahentaa tilannetta entisestään kaikissa tapauksissa. Tutkimuksessa havaittiin vastaavasti kuin edellisessä diplomityössä [1], että

rakenteiden kosteustekninen toiminta muuttuu merkittävästi paremmaksi, mikäli ulkopintaan voidaan tehdä impregnointi.

Homeindeksin osalta huomataan kaikissa liitoksissa toistuvan sama tilanne. Homeindeksi ylittää homeindeksin maksimiarvon jo nykyilmastossa seinärakenteen sisäpinnassa, jonka arvo suurenee entisestään tulevaisuuden ilmastossa. Kun rakenteeseen lisätään sisäpuolinen eristys, samaisen tutkimuspisteen homeindeksin arvo nousee entisestään. Kuitenkin vain harvassa sisäpuolelta eristetyssä tapauksessa seinän uuden sisäpinnan homeindeksin arvo ylittää arvoa 1. Vastaavasti impregnointi pienentää kaikissa tapauksissa homeindeksin arvoon nolla tai hyvin lähelle sitä.

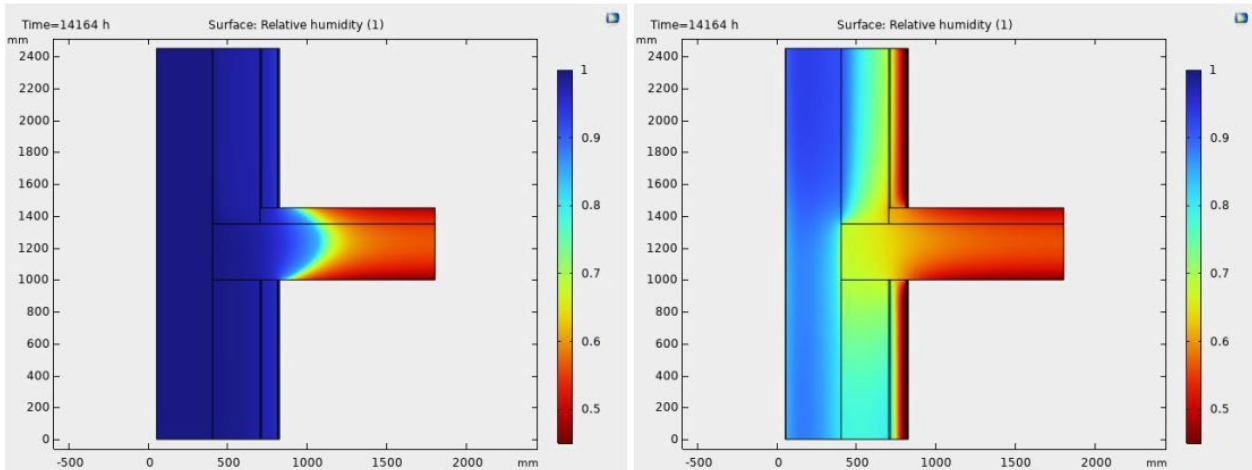
Lämpötilaindeksin osalta lähes kaikissa tapauksissa pistemäinen pintalämpötila ja lämpötilaindeksi pysyy sallituissa rajoissa. Poikkeuksen tekee yläpohjan liitos, jonka lämpötilaindeksi ja pistemäinen pintalämpötila on tutkitussa sisäpinnan nurkkapisteessä alle sallitun rajan. Tämä ilmenee myös tapauksessa, jonka seinä on sisäpuolelta eristetty. Tulos antaa viitteitä siitä, että kyseisen yläpohjan eristävyys ei ole riittävän hyvä. Impregnoinnin huomattiin vaikuttavan myös sisäpintojen lämpötiloihin, kun kosteus ei pääse imeytymään huokoiseen julkisivuun, jolloin lämmönjohtavuus tiilessä on matalampi.

Esimerkkitapauksena suhteellisen kosteuden tuloksia esitellään ensimmäisen liitoksen US-VP1 osalta. Valittu tarkastelupiste on välipohjan ja kevytbetonisäkuoren nurkkapisteessä, joka sisäpuolelta eristetyissä tapauksissa jää eristeen ja seinän väliin. Tarkastelupisteen suhteellinen kosteus nykyilmastossa on esitetty kuvassa 4. neljässä tutkitussa tapauksessa; lähtötilanne US-VP1-1, ulkopuolelta impregnoitu tapaus US-VP1-2, sisäpuolelta eristetty US-VP1-3, sekä sisäpuolelta eristetty ja ulkopuolelta impregnoitu tapaus US-VP1-4.



Kuva 4. Suhteellinen kosteus sisänurkassa kevytbetonin sisäpinnassa. (Vantaa 2050)

Kuvasta 4 nähdään, että ilman impregnointia sisäpuolinen eristys (US-VP1-3) johtaa lopulta vanhan rakenteen kastumiseen ja heikentää sen kuivumiskykyä merkittävästi. Tarkastelupisteen homeindeksi simuloinnin jälkimmäiseltä vuodelta ylittää arvon 3. Lähtötilanteen käyrä nousee talviaikaan yli kriittisen tason rajan, mutta pysyttelee muutoin rajan alapuolella. Ylimpänä oleva käyrä kuvaa sisäpuolelta eristettyä tilannetta, jonka kosteus pysyy kriittisen tason rajan 80 % RH yläpuolella läpi vuoden. Pistekatkoviivalla kuvatut käyrät ovat impregnoituja tapauksia, joista huomataan, että impregnointi laskee merkittävästi suhteellista kosteutta sekä eristetyssä että eristämättömässä tapauksessa. Saman tutkimuspisteen tulokset tulevaisuuden ilmastossa on suhteellisen kosteuden osalta vielä korkeammalla ja lähtötilanteen tapauksessa talvijakson jälkeen suhteellinen kosteus pysyy korkeammalla pidempään.



Kuva 5. Suhteellisen kosteuden jakauma helmikuussa (Vantaa 2050) rakenteissa US-VP1-3 (vas.) ja US-VP1-4 (oik.).

Kuvassa 5 on esitetty suhteellisen kosteuden jakauma ulkoseinän ja välipohjan liitosalueella helmikuussa, kun rakenne on pelkästään eristetty sisäpuolelta (US-VP1-3) ja kun rakenteessa on sisäpuolisen eristyksen lisäksi impregnointi ulkopinnassa (US-VP1-4). Kuvasta nähdään kuinka merkittävä vaikutus viistosateella on rakenteen toiminnan kannalta. Tulosten mukaan sisäpuolinen eristäminen johtaa suhteellisen kosteuden merkittävään nousuun koko ulkoseinärakenteen alueella eikä rakenne kuivu tehokkaasti lämpiminä kausina.

4. Yhteenveto

Viidelle erilaiselle rakenneliitokselle tehtiin laskennallisia tarkasteluja, joilla selvitettiin kuinka vanhojen rakenteiden liitosalueiden kosteustekninen toiminta muuttuu sisäpuolisen lisäeristämisen tapauksessa. Tulokset vahvistavat jo aiemmin tehtyjä johtopäätöksiä siitä, että vanhojen tiiliseinien sisäpuolinen eristäminen johtaa hyvin kapillaarisellakin lämmöneristemateriaalilla kosteusteknisiin riskeihin. Rakenteiden sisäpuolisen lisäeristämisen yhteydessä tulisi tehdä ulkopintaan viistosateen imeytymistä merkittävästi estävä impregnointi. Markkinoilla olevien impregnointituotteiden käyttöön liittyy kuitenkin tällä hetkellä avoimia kysymyksiä siitä, ovatko ne riittävän huomaamattomia ja voidaanko käyttö siten sallia rakennussuojelun kannalta.

Lähdeluettelo

- [1] Karhunen, P. (2022) Sisäpuolisen lämmöneristämisen vaikutukset massiivitiiliseinien kosteustekniseen toimintaan. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto.
- [2] RIL 255-1-2014 (2014). Rakennusfysiikka 1, Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset, Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL r.y., Helsinki, 384 s. + 116 liites.
- [3] Vinha, J., Laukkarinen, A., Mäkitalo, M., Nurmi, S., Huttunen, P., Pakkanen, T., Kero, P., Manelius, E., Lahdensivu, J., Köliö, A., Lähdesmäki, K., Piironen, J., Kuhno, V., Pirinen, M., Aaltonen, A. & Suonketo, J. (2013). Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden ja rakennusten rakennusfysikaalisessa toiminnassa, Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Rakennetekniikka, Tutkimusraportti 159, 354 s. + 43 liites.

Yritysten ja yhdistysten ilmoitukset

ABRESTO

KALSIUMSILIKAATTILEVYT KOKEMUKSELLA

» **Kokenut toimija**

Kalsiumsilikaattilevyjen toimittaja jo vuodesta 1985

» **Luotettava Saksalainen valmistaja**

» **Hyvä saatavuus**

Toimitukset varastostamme Vantaan Tuupakasta tai suuremmissa erissä suoraan tehtaalta

*Lue lisää osoitteessa
www.abresto.fi*

redstone
A Company of the
CALSIHERM® Group

CALSITHERM®
Silikatbaustoffe GmbH

*Aidot
kapillaarisesti
aktiiviset ja
diffuusioavoimet
kalsiumsilikaatti-
levyt sisäpuoliseen
eristämiseen!*

Oy Abresto Ab - Juhanilantie 2 FI-01740 Vantaa
info@abresto.fi - www.abresto.fi



TURUN
YLIOPISTO

TURUN YLIOPISTO | Biodiversiteetti

AEROBIOLOGIA

TURKU



Turun yliopiston Aerobiologian laboratorio analysoi rakennusmikrobiologisia ja mineraalikuitunäytteitä luotettavasti ja nopeasti. Panostamme laatuun, asiantuntemukseen ja asiakasneuvontaan.

Järjestämme myös sisäilma-alan koulutusta sekä osallistumme tutkimushankkeisiin. Sisäympäristöön ja sen altisteisiin liittyvissä aamukahvitietoiskuissamme pääset helposti tutustumaan toimintaamme.

Aerobiologian laboratorio
20014 Turun yliopisto
050 526 7795 - aerobiologit@utu.fi
utu.fi/aerobiologia





AFRY Rakennusfysiikka: Soveltavaa rakennusfysiikkaa vuosikymmenten kokemuksella

Tarjoamme asiantuntijapalveluita mm. ilmanvaihtoteknisiin ja kosteusvaurioituneiden rakenteiden kuntotutkimuksiin sekä rakennusfysikaaliseen suunnitteluun, mallinnukseen ja suunnitelmatarjontaan.

Käytettävissä on vuosikymmenten kokemuksen ja tarvittavien pätevyyksien omaavat asiantuntijat.

Making Future

afry.com



**Kestävästi
ihmisille ja
ympäristölle.
Yhdessä ja
paremmin.**

 **A-INSINÖÖRIT**

Ihmisiä, joiden kanssa
rakennat rohkeasti parempaa

ains.fi



Täydennä ammattitaitoasi ARDEX-Opiston kursseilla!

Hyvä rakentamisen ammattilainen,
ARDEX-yhteistyö on hyvä aloittaa maksuttomalla ARDEX-Opiston kurssilla.

Katso koulutusaikataulu ja ilmoittaudu ardex.fi/ardex-opisto



MÄRKÄTILAPÄIVÄ

Koulutuksessa käydyt ratkaisut palvelevat sekä uusien märkätilojen, että nopeiden linjasaneerausten toteuttamista. Märkätilan riskikohdat ja yksityiskohdat kuten läpivientien ja lattiakaivon liitos käydään käytännössä läpi. Voimassa olevat ohjeet ja määräykset. Koulutus hyväksytään märkätilojen vedeneristäjän sekä märkätilatöiden valvojan Rakentamisen sertifikaattien täydennyskoulutukseksi.

SISÄILMAPÄIVÄ

Koulutus sisäilmakorjausten työtekniikoista mm. ilmavuotojen, rakennekosteuden ja radonin hallintaan. Kurssipäivän aikana käydään läpi betonin pintarakenteessa huomioitavia asioita. Alustan esikäsittelyyn tutustutaan käytännönläheisesti eri höyrünsulkuratkaisujen kautta, mm. kapillaarikosteuden ja haitta-aineiden hallinnassa.

Koulutus hyväksytään rakenteiden tiivistäjän sekä rakennusterveysasiantuntijan (RTA) ja sisäilma-asiantuntijan (SISA) Rakentamisen sertifikaattien täydennyskoulutukseksi.

SUURIKOKOISTEN LAATTOJEN KIINNITYS

Isojen ja ohuiden laattojen asentaminen vaatii asentajalta osaamista ja käytettäviltä laasteilta erityisominaisuuksia. Koulutuksessa tutustutaan alan yleisten ohjeiden mukaisesti, laatoitettavien alustojen toleransseihin sekä laattojen asentamisen vaatimuksiin.

UIMA-ALLASPÄIVÄ

Tietopaketti uima-altaiden ja allasta ympäröivien tilojen pintarakenteen rakentamisesta. Sisältää teorian ja käytännön, mm. uima-altaiden oikaisu, vedeneristyksen detaljit sekä epoksisaukaus nähdään käytännön työnäytöksissä.





bauroc

KAIKKEEN RAKENTAMISEEN

Karkaistu kevytbetoni on palamaton, eristävä, kevyt, kestävä ja monikäyttöinen rakennusmateriaali, josta valmistetut rakenteet ovat yksinkertaisia ja toimivia. Kevytbetonin ainutlaatuinen huokosrakenne mahdollistaa yksiaineiset, massiiviset ulkoseinärakenteet.

Baurocin tuotevalikoimaan kuuluvat ulkoseinäharkot, väliseinäharkot ja -laatat, raudoitettut palkit sekä seinä- ja tasoelementit. Tuotteilla on EPD ympäristöselosteet.

www.bauroc.fi



BMI Järjestelmätakuu



Tarjoo asiakkaillesi ainutlaatuinen takuu, joka erottaa sinut luotettavana vedeneristyksen huippuosaajana.

BMI Järjestelmätakuu on täydellinen tekninen kattojärjestelmä, joka kattaa korkealaatuiset ja testatut Icopalin alus- ja pintakermit sekä BMI:n hyväksymät ja testaamat SFS-kiinnikkeet.

Valitse BMI Järjestelmätakuu **25 vuoden vedeneristystakuulla**.

Part of 



Ratkaisut rakennusten tärinä- ja runkomeluongelmiin.



Sovelluskohteita:

- Talotekniikan koneet- ja laitteet
- Tilojen välinen äänieristys,
- Raideliikenteen runkomelueristys

Ota yhteyttä!

Christian Berner Oy +358 9 2766 830
infofi@christianberner.com
www.christianberner.fi

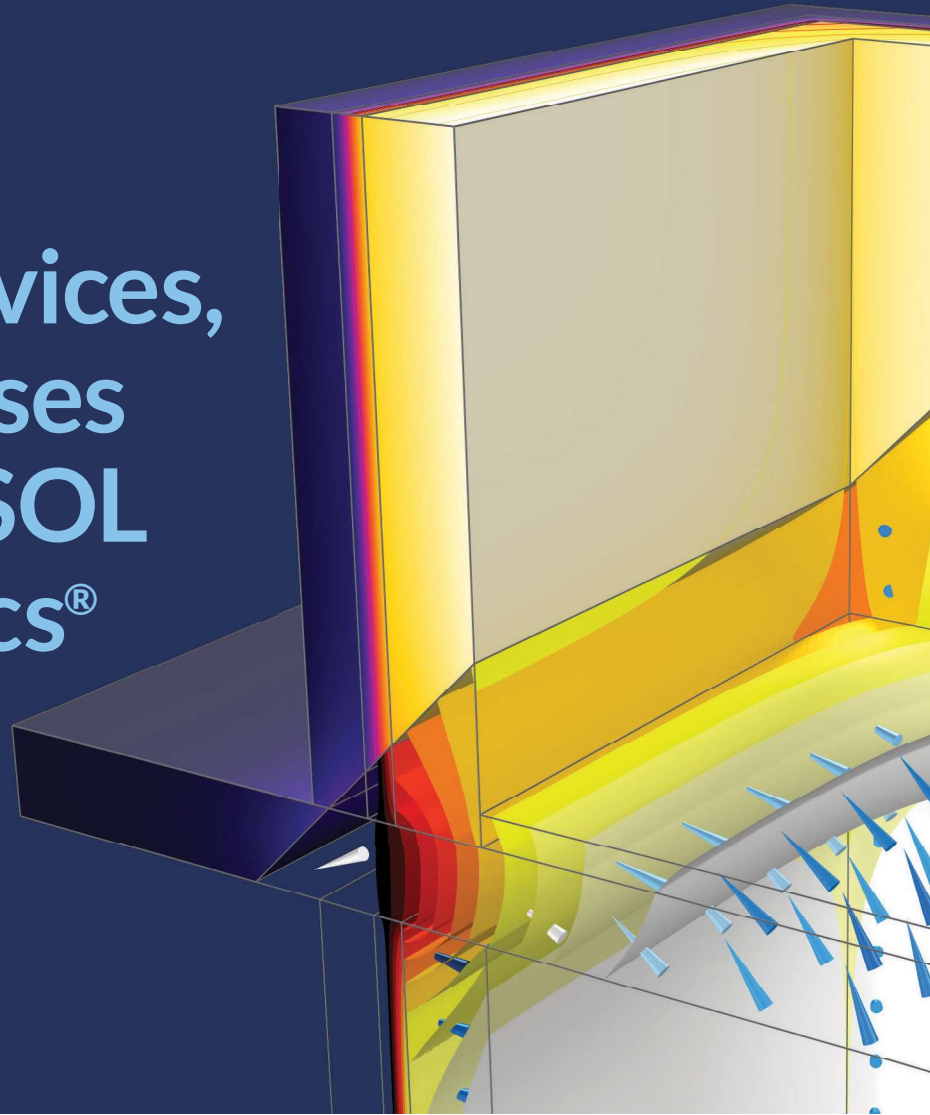



**CHRISTIAN
BERNER**

Expect more

Simulate real-world designs, devices, and processes with COMSOL Multiphysics®

[comsol.com/feature/
multiphysics-innovation](https://comsol.com/feature/multiphysics-innovation)



Innovate faster.

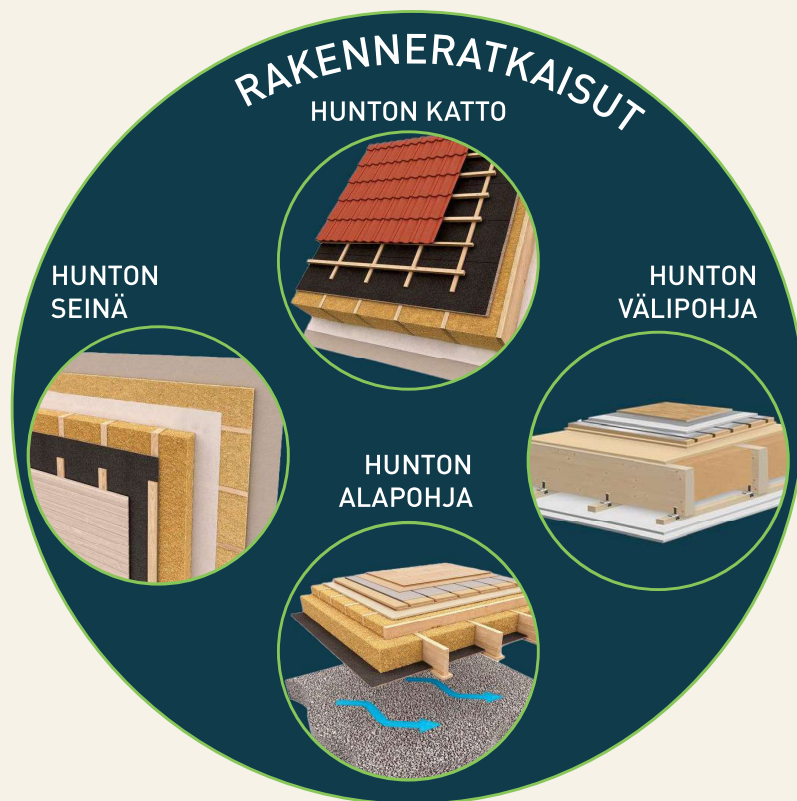
Test more design iterations before prototyping.

Innovate smarter.

Analyze virtual prototypes and develop a physical prototype only from the best design.

Innovate with multiphysics simulation.

Base your design decisions on accurate results with software that lets you study unlimited multiple physical effects on one model.

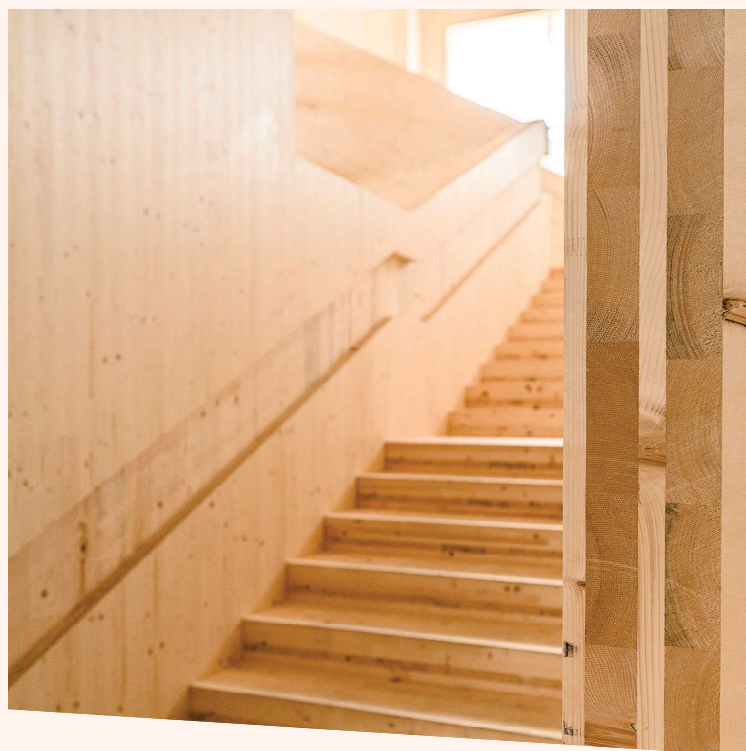
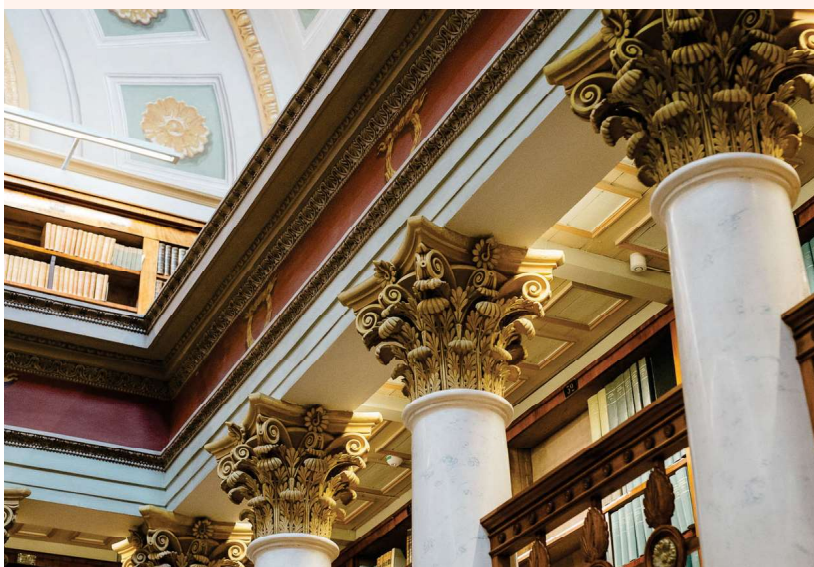


Hunton Rakeneratkaisut

- Kokonaisratkaisut seiniin, kattoon ja lattiaan.
- Tuotteet perustuvat pääasiassa puukuituun, uusiutuvaan ja luonnolliseen raaka-aineeseen.
- Tuotteet on suunniteltu yhdessä käytettäviksi ja ne muodostavat ”hengittävän” rakenteen.



HUNTON
Luonnosta. Luonnolle.



**Kestävän
rakentamisen
asiantuntija**

 IdeaStructura

INSINÖÖRITOIMISTO
sulin

MONIPUOLISET RATKAISUT
**RAKENTEIDEN
TIIVIYTEEN**

40
YEARS
PRODUCTION

ISO
CHEMIE
Use the blue technology.

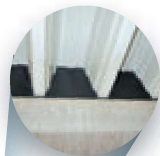
ISO-BLOCO
ONE CONTROL



ISO-CONNECT
OUTSIDE EPDM



ISO-PROFIL
FILLER STRIPS & FILLER PIECES



ISO-ZELL
THERMAL TAPE



ISO-CONNECT
HB-BAND



ISO-BLOCO 600



ISO-BLOCO ONE



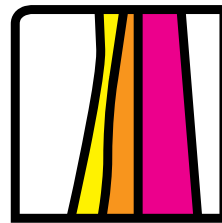
ISO-CONNECT
VARIO SD



ISO-MEMBRA SX



Jaatimet



Jaatilantie 77 • 31400 Somero
puh. 0207 401 111 • faksi 0207 401 110

www.jaatimet.fi

**Koko paketti
mittauksesta
asennukseen!**

**Kaikki Jaatimet-ovet
valmistetaan mittatilaustyönä
– kysy erikoisratkaisuja!**

- ThermoFin®-ovi
- murtosuojaovi
 - teräslasiovi
 - desibeliovi
- liukupalo-ovi
- Oiva-umpiovi



Sibelius-Akatemia 2014 © Mikael Lindén

Tutustu tuotteisiin:
www.jaatimet.fi

Ajattele isommin.



www.xamk.fi/tki

XAMK

Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu

ULTRASLIM
150



Knauf UltraSlim -järjestelmä

Lisää lattiapinta-alaa ohuemmal-
la HVS-väliseinärakenteella

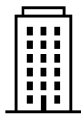
- Palonkestävyys EI90
- Ääneneristys >55 dB

**Laske lisätila
laskurilla:**

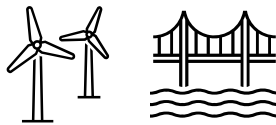


Olosuhteiden hallinta langattoman jatkuvatoimisen mittauksen avulla

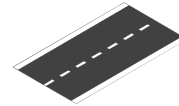
MATologin patentoidun anturitekniikan avulla rakentaminen nopeutuu ja laatu paranee, kun rakenteiden olosuhteita ohjataan hallitusti. Jatkuva reaaliaikainen mittaus rakenteista ja betonivaluista luo kokonaisvaltaisen tilannekuvan rakennustyömaan reaaliaikaisista olosuhteista, jonka avulla työmaan tilannekuva selkeytyy ja rakenteet saadaan kuivattua haluttuun suuntaan halutussa ajassa. Näin kustannustehokkuus paranee ja vältetään rakennustyömaan pitkittymiseltä. Samalla kuivattamiseen käytetty energia ja hiilijalanjälki pienenevät.



Kiinteistörakentaminen



Infrarakentaminen



Tieolosuhteiden seuranta

Uudet anturimme 2023

MATolog
CURE
DUALHEAD



Uudet ominaisuudet

- Betonivalun olosuhteiden mittaus samanaikaisesti kahdesta eri korkeudesta



Mittapisteen
haluilla korkeuksilla

Uudet ominaisuudet

- Massiivivalujen lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittaus neljästä eri syvyydestä yhdellä laitteella



MEHTO

Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy

Mitta tarjoaa luotettavinta betonitestausta, -mittausta ja -tutkimusta sekä rakennusfysikaalista mittausta ja tutkimusta kaikkialla Suomessa. Meiltä saavat avun niin rakennusliikkeet, julkishallinnon rakennuttajat, taloyhtiöt kuin yksityishenkilöt.

Uusin vahvuutemme on Wiiste Oy. Rakenteiden langattoman kosteuden-seurannan älyratkaisujen markkinajohtaja Wiiste on nyt osa Mitta Groupia.

Kuntotutkija

Näin me palvelemme sinua:

Akkreditoidut testauslaboratoriot

- FINAS-akkreditointipalvelun akkr. (T272 ja T354)

Nopeat tulokset

Laadukkaat raportit

Yhden laboratorion periaate

- Analyysit tehdään Mitan laboratorioissa. Hoidamme myös vähemmän kysytyt analyysit yhteistyökumppaneiden verkoston kautta.

Valtakunnallinen betonilaboratorioiden verkosto

Betonianalyysit

Asbesti- ja haitta-aineanalyysit

Mineraalikuidut ja pölyanalyysit

Wiiste IoT olosuhde- ja

rakennekosteussensorit sekä

pilvipalvelu

Rakentaja

Näin me palvelemme sinua:

Koko Suomen kattava laaja

rakennusfysikaalisten mittausten palveluntarjonta

Rakennusakustiset mittaukset

- ilmäääni (ilmääänitasoeroluku DnT,w)
- askelääni (askeläänitasoluku L'nT,w)
- jälkikaiunta-ajan mittaukset (T)
- melumittaukset (IV-, liikenne- ja laitemelu)

Rakennuksen ilmatiiviiden määrittäminen

- tiiviysmittaus (sertifioituna)
- vuotopaikannus lämpökameralla tarvittaessa

Wiiste IoT olosuhde- ja

rakennekosteussensorit sekä

pilvipalvelu

Kysy lisää, meiltä saat nopeasti myös tarjouksen!

Sami Pekkarinen

Keski- ja Itä-Suomi

sami.pekkariinen@mitta.fi

+358 503 057 722

Jari Martikainen

Etelä-Suomi

jari.martikainen@mitta.fi

+358 444 211 211

Tommi Bimberg

Pohjois-Suomi

tommi.bimberg@mitta.fi

+358 469 204 342

Jari Salokangas

(Wiiste)

jari.salokangas@mitta.fi

+358 400 623 619

MoistMaster

– kosteushaittoja ehkäisevä älykäs kuivanapitolämmitys

MoistMaster® E10 LD -säädin mahdollistaa edistyksellisen, älykkään kuivanapitolämmityksen, joka:

- EHKÄISEE KOSTEUSVAURIOITA
- OPTIMOI LÄMMITYKSEN ENERGIANKULUTUSTA
- TAKAA TILAN KOSTEUSTURVALLISET OLOSUHTEET HUOLETTOMASTI VUODENAJASTA RIIPPUMATTA

Älykäs kuivanapitolämmitys soveltuu ajoittain tai kokonaan käyttämättömiin rakennuksiin ja tiloihin, kuten mökeille, ulkovarastoihin, ullakoille, kellareihin, veneisiin sekä matkailuautoihin ja -vaunuihin.



Lisätietoa



Osta omasi



Lue lisää:
www.moistmaster.fi

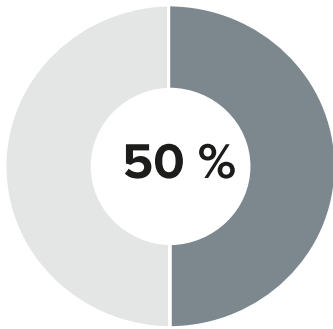
Ota yhteyttä:
info@moistmaster.fi
+358 40 5590904



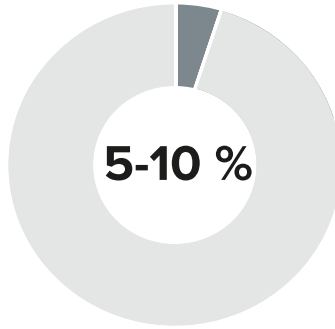
MUOTTIKOLMIO



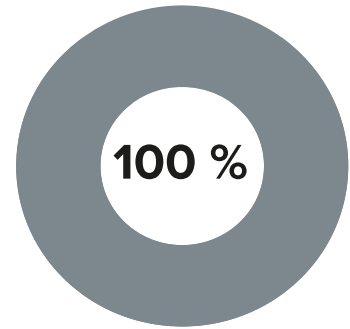
**PEIKON DELTABEAM® GREEN -LIITTOPALKKI ON
VASTUULLISEN SUUNNITTELIJAN JA RAKENTAJAN VALINTA:**



Puolita palkkien
CO₂-päästöt



Vähennä rungon
CO₂-päästöjä



Edistä
kiertotaloutta

DELTABEAM® Green sopii yhteen kaikkien laattatyyppeiden kanssa. Se tarjoaa matalia välipohjia ja pitkiä jännevälejä. Päästösäästön lisäksi rakennuksen elinkaari pitenee muuntojoustavien tilojen ansiosta.

Lue lisää: peikko.fi/deltabeamgreen





Pietiko Oy

MITTAUSONGELMIESI RATKAISIJA

Kuuluuko?

PihlaPRO Antennilasi

Tutkitusti toimiva ratkaisu sisätilojen kuuluvuusongelmiin.



KUULUU KAIKKIALLA

Antennilasi siirtää mobiilisignaalin keilamaisesti sisälle ja jakaa sen laajasti koko huoneeseen, jolloin kuuluvuus on hyvä koko tilassa.



HUOMAAMATON

Antenni on hiuksen hieno kuvio lasissa, jota on vaikea erottaa paljaalla silmällä. Pystysuora kuvio peittää vain pienen osan lasipinnasta.



TUTKITUSTI TOIMIVA

3G, 4G ja 5G-verkossa tehdyissä kenttäkokeissa mobiiliverkon toimivuus on noussut täysin uudelle tasolle operaattorista riippumatta.



YHTEISTYÖSSÄ:

STEALTHCASE

PihlaPRO valmistaa hinta-laatusuhteiltaan parhaita kotimaisia ikkunoita ja ovia ainoastaan rakennusliikkeiden ja alan ammattilaisten käyttöön.

Ota yhteyttä ja pyydä tarjous: **0800 550 880** | www.pihlapro.fi

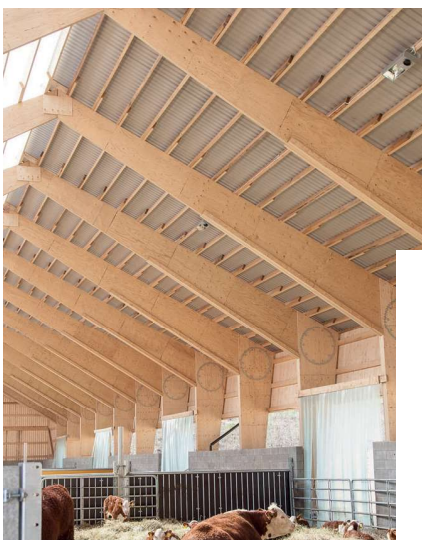


PURMO



Puurakentamisen ohjelma

Ympäristöministeriö



Kustannustehokasta puurakentamista
mittatarkoilla puuelementeillä.

**KONEISTETUT LVL, LIIMAPUU JA CLT MASSIIVI-
PILARIT, -PALKIT JA KOLMINIVELKEHÄT.**

Ota yhteyttä ammattitaitoiseen
puuosatoimittajasi Punkaharjulta

myynti@puutaito.fi

www.puutaito.fi / www.punkalive.fi



f @punkalivedesign
@punkaharjunpuutaitooy



Koulutettujen ammattilaisten oma media

Rakennusalalla tapahtuu koko ajan. Jos todella haluat tietää, miten rakennettu ympäristö muodostuu nyt ja tulevaisuudessa, tee kuten 50 000 Rakennuslehden lukijaa. Ryhdy tiedonsaajaksi.

**Rakennuslehti,
siellä missä sinäkin!**

rakennuslehti.fi

sanoma

tekniikkajulkaisut





RTY



Rakli

**Kiinteistönomistajat
ja rakennuttajat**

PALVELUJAMME OVAT INNOVATIIVISET JA KESTÄVÄT RATKAISUT
KAUPUNKIEN, INFRASTRUKTUURIN, LIIKENTEEN, YMPÄRISTÖN
JA RAKENNUSTEN SUUNNITTELUSSA, RAKENNUTTAMISESSA,
RAKENTAMISESSA JA YLLÄPIDOSSA.



RAMBOLL

Bright ideas.
Sustainable change.

© Arco Architecture Company

Kumppanisi kestävään muutokseen

Huolehtimalla uudesta ja säilytettävästä rinnakkain
pidämme rakennetun ympäristön elinvoimaisena.
Yhdessä luomme parhaat ja kestävät ratkaisut.

ramboll.fi



RESTART

RAKENNUSRESTAUROINTI



RIA

Rakennusinsinöörit
ja -arkkitehdit RIA ry
www.ria.fi

ASIAANTUNTIJA, JOHON VOIT LUOTTAA

S A F A

SAFE 
Drying



 **gyproc**
SAINT-GOBAIN

 **isover**
SAINT-GOBAIN

 **weber**
SAINT-GOBAIN

Suomalaisiin olosuhteisiin suunniteltujen
ja testattujen rakennusmateriaalien
kotimainen valmistaja


SAINT-GOBAIN

SIRATE

SISÄILMAYHDISTYS JÄRJESTÄÄ

SISÄILMAPAJA14

Uusin silmin

Joensuu 22-23.11.2023

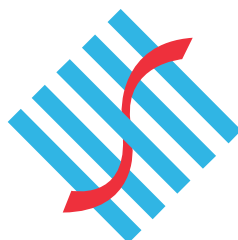


SISÄILMASTOSEMINAARI

12.3.2024

Jätä esitelmäehdotuksesi viim. 31.10.2023!

Lue lisää tapahtumistamme:
sisailmayhdistys.fi/tapahtumat



SISÄILMAYHDISTYS



SOSIAALI- JA
TERVEYSMINISTERIÖ



Sweco on Suomen suurin rakennetun ympäristön suunnittelutalo. Rakennusfysiikan osaamisemme varmistaa toimivat ja pitkäikäiset rakenteet sekä terveellisen sisäilmaston. Palvelumme kattavat koko rakentamisen ketjun sekä kiinteistön ylläpidon koko Suomessa.

Ydinosaamistamme:

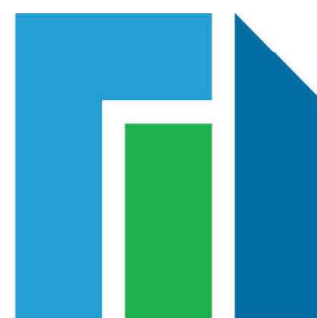
- rakennusfysikaalinen suunnittelu ja kosteusvaurion korjaussuunnittelu
- rakennusfysikaalinen mallinnus – rakenteiden toiminnan varmistamisen ja kehityksen tukena
- 1-, 2- ja 3-D, lämpö- ja kosteustekniset analyysit (Wufi, Comsol, Delphin)
- virtauslaskenta (CFD)
- tutkimus- ja tuotekehityspalvelut
- 3. osapuolen suunnitelmatarkastus
- asiantuntijalausunnot
- kosteuden- ja puhtaudenhallintakoordinaattorin palvelut
- työmaan laadunvarmistusmittaukset
- sisäilma- ja kosteustekniset kuntotutkimukset sekä muut sisäilmatekniset palvelut

Transforming
society
together

Lue lisää



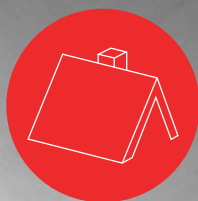
**TAMPEREEN
TILAPALVELUT**



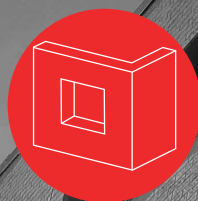


tectis

RAKENNUSKALVOT • PAPERIT • TEIPIT • NAUHAT • TARVIKKEET



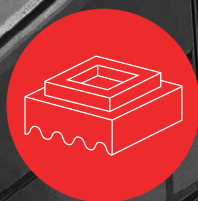
KATTO



SEINÄ



LATTIA



PERUSTUS



MAAPERÄ

We've Got You COVERED



(0)9 4393 460



www.tectis.fi



info@tectis.fi



Kannattaa tutkia ennen kuin hutkia.

Termex-Selluvilla on turvallinen ja tutkittu puhallusvilla ekologiseen moderniin rakentamiseen

On tärkeää, että jo kattorakenteiden suunnitteluvaiheessa kiinnitetään erityistä huomiota eristemateriaalien ja asennustapojen valintaan. Suomen pohjoisen ilmastolämpötilaolot, rakennusosien paksut sekä tehokkaat lämmöneristykset ovat alttiita ilmavirtausten (luonnollisen konvektion) vaikutuksille paljon voimakkaammin kuin etelämpänä Euroopassa. Tästä syystä lämmöneristeen ilmanläpäisevyyden vaikutukset on huomioitava rakenneosien lämmönläpäisykerroimen (U-arvon) laskennassa nk. modifioidun Rayleighin luku (**R_{am}**) -tarkasteluna.

Lämpöhäviöt kuriin

Suuri ilmavirranvastus (**AF_r**) ehkäisee haitallisen konvektion (ilmanliikkeen) aiheuttamaa lämpöhäviötä. Termex-Selluvilla-eristeen ilmavirranvastus muuttuu tiheyden muuttuessa ja esimerkiksi 400 mm eristevahvuudessa ilmavirranvastus on > 6 kPa*s/m², jolloin konvektiota ei esiinny.



Selluvilla



Katso lisätietoa
Termex-Selluvillan
ominaisuuksista
U-arvotaulukoineen

www.termex.fi

Terveet tilat 2028

on hallituksen 10-vuotinen toimintaohjelma, jonka tavoitteena on tervehdyttää julkiset rakennukset ja tehostaa sisäilmasta oireilevien hoitoa ja kuntoutusta.

Tilaa Terveet tilat -uutiskirje verkkosivujemme kautta ja pysy kärryillä ohjelman etenemisestä!

tilatjaterveys.fi

→ Ohjelma

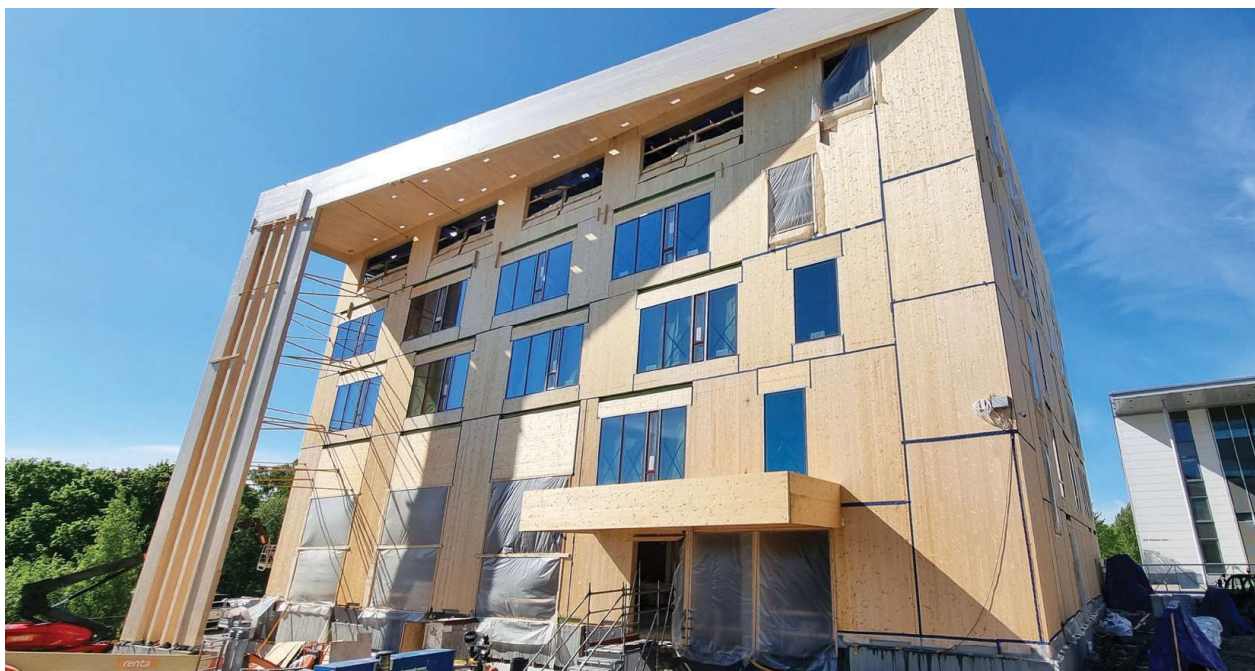
→ Tilaa uutiskirje

**Seuraa meitä Twitterissä:
[@TerveetTilat](https://twitter.com/TerveetTilat)**

TERVEET
TILAT 2028

TIIVISTALO

TIIVISTYSJÄRJESTELMÄT RAKENTAMISEEN



**Valikoimamme täydentyy kaudelle 2024
uusilla tuoteryhmillä:**



KIINNIKKEET

Vahvat Simpson Strong-Tie -kiinnikkeet puurakentamiseen



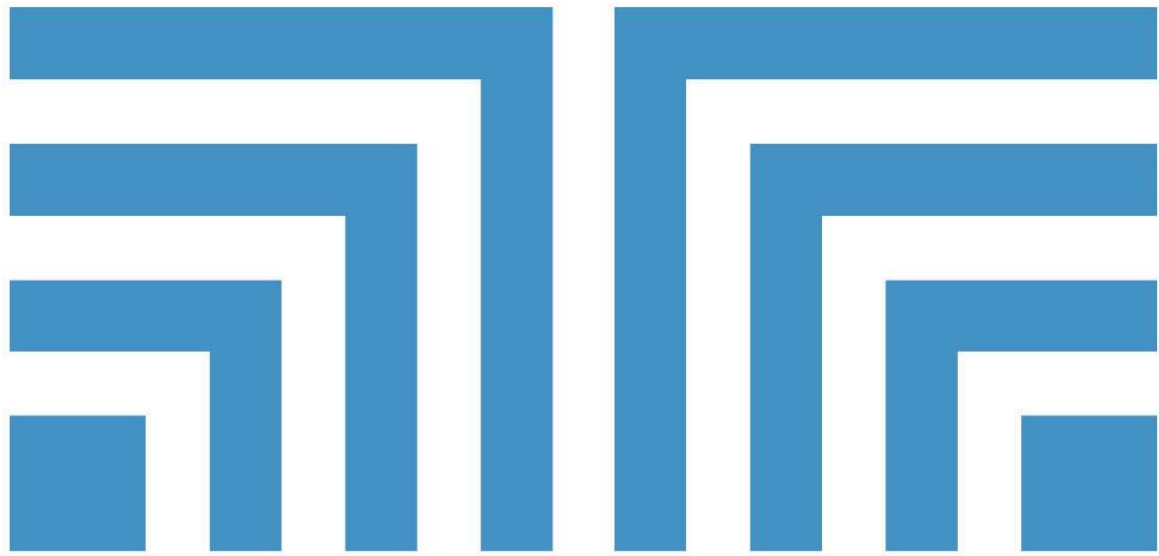
RUUVIT

Itävallassa valmistetut korkealuokkaiset rakenneruuvit vaativaan massiivipuurakentamiseen



PALOKATKOMATERIAALIT

Itävaltalaiset Air Fire Tech -palokatkomateriaalit puurakentamiseen



Timberfinder®

**top
ten**

Rakentamisen
yhteiset
käytännöt



Tutustu
uudistuneeseen
palveluun
www.toptenrava.fi

Mitä ovat Topten-käytännöt?

Kuntien rakennusvalvontojen ja rakennusalan toimijoiden yhteistyössä laatimien Rakentamisen Topten-käytäntöjen tavoitteena on:



EDISTÄÄ hyvää rakentamista-paa ja ennaltaehkäistä rakentamiseen liittyviä virheitä



TÄYDENTÄÄ rakentamislainsäädännön jättämiä katvealuetta ja tukea lain soveltamistyötä



YHDENMUKAISTAA rakennusvalvontojen lupa- ja tarkastusprosesseja sekä parantaa rakennusvalvontapalvelun ennakoitavuutta asiakkaan suuntaan

Topten-käytännöt pähkinänkuoressa

Ilmaisen verkkopalveluna
jaettava kortisto



Suunnattu rakennusvalvontaviranomaisille, rakennushankkeisiin ryhtyville, rakennusten suunnittelusta ja toteuttamisesta vastaaville tahoille sekä muille rakennusalan toimijoille



Käsittää runsaat 80 erilaista voimassa olevaa tulkinta-, ohje- ja lomakeasiakirjaa



Virallisesti käytössä jo 35 kunnassa

Uudistunut sivusto

Topten-kortisto on saanut uuden ilmeen ja uusia toiminnallisuuksia, ja on jatkossa osa Rakennustarkastusyhdistys RTY:n tarjoamaa palvelukokonaisuutta.



Tutustu RTY:n muuhun palvelutarjontaan
www.rakennustarkastusyhdistys.fi



Messuosasto
20
Duetto

Älykäs rakenteiden kosteudenhallinta-järjestelmä säästää aikaa ja rahaa

Havaitsee ja hälyttää reaaliajassa vuodoista ja liiallisesta kosteudesta rakenteissa

Tuulettaa tarpeen mukaan

- Varhainen kosteuden havaitseminen auttaa rajoittamaan kosteusvaurioita ja vähentää siten kalliita remontteja.
- Ehkäisee home- tai sienikasvuston muodostumista ja ylläpitää eristyskerroksen toimivuutta.
- Auttaa kohdistamaan kunnossapitoa säästäen aikaa ja rahaa.

Tarjolla on kaksi tuotetta, joita voi käyttää yhdessä tai erikseen:

VILPE Sense -vuotopaikannin paikallistaa vuodot nopeasti ja tarkasti kattorakenteissa ja seinissä. Se on erityisen kätevä laajoilla pinta-aloilla.

VILPE Sense -kosteudenhallinta tuulettaa kattorakenteet ja alapohjan tarpeen mukaan huippuimurin avulla. Näin rakenteet pysyvät kuivina ja terveinä.

> [VILPE.COM/FI/SENSE](https://vilpe.com/fi/sense)

VILPE[®] Sense



Kiinnostaako
massiivitiilirakentaminen?



Poroton U8 ja S8 P -kennoharkot massiivitiilirakentamiseen.

Yksiaineinen, massiivinen tiili tekee uutta tuloaan runkorakentamiseen. Ilmaeristeinen tai vaihtoehtoisesti vulkaanisella perliittirouheella täytetty Poroton-kennoharkko on ratkaisu niin pientalojen, asuinkerrostalojen kuin julkisten rakennusten kuten koulujen ja päiväkotien runkorakentamiseen.

Rakennusfysikaalisesti optimaalinen ja sisäilmaesteetön kennoharkkorakenne on investointi kestävään ja turvalliseen tulevaisuuteen.

www.wienerberger.fi



Wienerberger



Ympäristöalan sitoutumaton ammattilehti

Ympäristö ja Terveys-lehti

Ilmestyy 8 numeroa vuodessa.

KUSTANTAJAN HINNAT 2023:

Painettu lehti: kestopilaus 70 €, vuositilaus 75 €, irtonumero 12 €

Näköislehti: 70 €

Painettu lehti + näköislehti (kombo):

kestopilaus 98 €, vuositilaus 103 €

Tilaukset verkkosivujemme kautta.



Ympäristökustannus Oy
www.ymparistojaerveys.fi

